

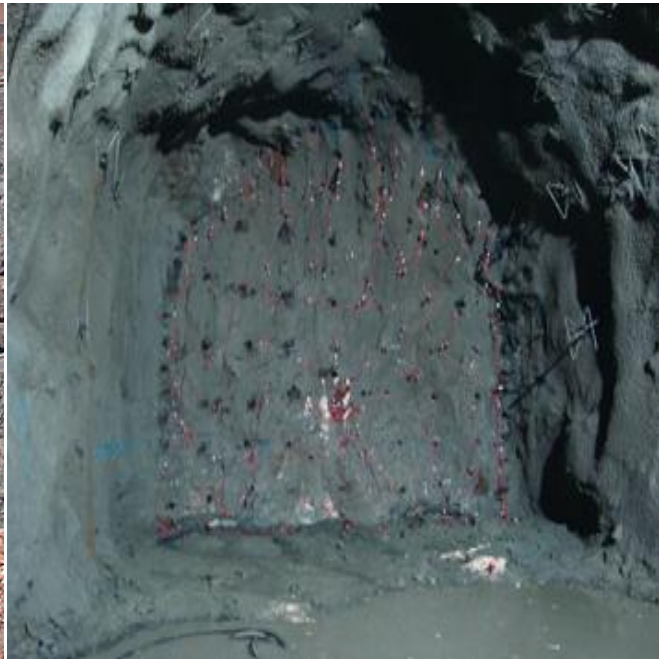


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Συσχέτιση χαρακτηριστικών βραχομάζας σε επιφανειακές και υπόγειες
ανατινάξεις

Διπλωματική εργασία

Θεοφανοπούλου Άννα



Εξεταστική Επιτροπή :

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Μιχάλης Γαλετάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Κωνσταντίνος Κακλής, Δρ.

Χανιά, Σεπτέμβριος 2012.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου.

Πρόλογος- Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους εκείνους που βοήθησαν στην πραγματοποίησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία, για την ανάθεση του θέματος, τη διόρθωση της εργασίας, τις συμβουλές του, τη βοήθεια που μου προσέφερε, την ενθάρρυνση του και την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους κκ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο και Κακλή Κωνσταντίνο για το χρόνο που διέθεσαν για τη διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας, καθώς και για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιστημονική συνεργάτιδα του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων Φωτεινή Σταθογιάννη για την αμέριστη βοήθειά της και την υποστήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και στους φίλους μου που με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια που περάσαμε μαζί σε αυτή τη σχολή.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη συσχέτιση των χαρακτηριστικών ποιότητας της βραχομάζας με τις παραμέτρους ανατίναξης σε υπαίθρια και υπόγεια τεχνικά και μεταλλευτικά έργα.

Πιο συγκεκριμένα, συσχετίστηκαν τα δύο πιο διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας RMR και Q με τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό μιας ανατίναξης. Οι παράμετροι αυτοί είναι ο συντελεστής ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικών, ο υπεθρυμματισμός, ο δείκτης HCF (εκφράζει τον λόγο του μήκους των ορατών ιχνών των διατρημάτων στην περίμετρο της σήραγγας προς το συνολικό μήκος αυτών) και ο δείκτης "η" (που εκφράζει το ποσοστό της πραγματικής ως προς τη θεωρητική προχώρηση ανά κύκλο ανατίναξης).

Από την μελέτη των διαθέσιμων στοιχείων διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες μετρήσεις και αναλύσεις για τις υπαίθριες ανατινάξεις και ότι οι ερευνητές σε διεθνές επίπεδο επικεντρώνονται στις υπόγειες ανατινάξεις. Οι συσχετίσεις που προέκυψαν και αναλύθηκαν παρουσιάζονται σε διαγράμματα και πίνακες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	3
ΕΛΑΦΗ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	3
2.1 Εδάφη	3
2.2 Πετρώματα	4
2.2 Δομή του πετρώματος.....	5
2.2.1 Θεώρηση του ασυνεχούς πετρώματος	7
2.2.2 Θεώρηση του ακέραίου πετρώματος	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	13
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ	13
3.1 Βασικές έννοιες	13
3.2 Εισαγωγή	16
3.2 Παράμετροι σχεδιασμού ανατινάξεων.....	20
3.2.1 Διάμετρος διατρήματος	21
3.2.2 Ύψος βαθμίδας.....	23
3.2.3 Φορτίο (B).....	24
3.2.4 Απόσταση διατρημάτων (S)	28
3.3 Υπόγειες ανατινάξεις.....	30
3.3.1 Η αρχική κοπή	31
3.3.2 Η κύρια ανατίναξη.....	34
3.4 Υπολογισμός φορτίου	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	38
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	38

4.2 Στόχοι της ταξινόμησης των πετρωμάτων	40
4.2.1 Παράμετροι των συστημάτων ταξινόμησης	41
4.2.2 Δείκτης σημειακής φόρτισης	44
4.3 Ταξινόμηση του ακέραίου πετρώματος.....	49
4.4 Ταξινόμηση της βραχομάζας.....	50
4.4.1 Η γεωμηχανική ταξινόμηση, κατά Bieniawski, με τη μέθοδο RMR	51
4.4.2 Η ταξινόμηση κατά Barton et al. –Q system (NGI).....	55
4.4.3 Το σύστημα GSI	61
4.4.4 Συσχέτιση Δεικτών Ταξινόμησης.....	64
4.5 Παρατηρήσεις επί των Συστημάτων Ταξινόμησης	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	73
ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	73
5.1 Εισαγωγή	73
5.2 Συσχέτιση παραμέτρων ανατίναξης με το σύστημα RMR.....	74
5.2.1 Εισαγωγή	74
5.2.2 Συσχέτιση παραμέτρου η με το σύστημα ταξινόμησης RMR.....	78
5.2.3 Συσχέτιση παραμέτρου OB με το σύστημα ταξινόμησης RMR	85
5.2.4 Συσχέτιση παραμέτρου HCF με το σύστημα ταξινόμησης RMR.....	88
5.3 Συσχέτιση των παραμέτρων ανατίναξης με το σύστημα ταξινόμησης Q.....	92
5.3.1 Εισαγωγή	92
5.3.2 Συσχέτιση συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών με το σύστημα ταξινόμησης Q93	
5.3.3 Συσχέτιση παραμέτρου OB με το σύστημα Q.....	97
5.4 Συγκριτικά διαγράμματα συσχέτισης των παραμέτρων ανατίναξης με τα συστήματα ταξινόμησης Q και RMR	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	103
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	103
6.1 Συμπεράσματα	103

6.2 Προτάσεις.....	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Με τον όρο εξόρυξη πετρώματος ή άλλου φυσικού σχηματισμού (πχ. έδαφος) εννοείται η απόσπαση τεμαχίων πετρώματος από τη φυσική θέση τους. Οι διαδικασίες εξόρυξης αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα κάθε σύγχρονου τεχνικού έργου. Τα τεχνικά έργα περιλαμβάνουν αφ' ενός μεν τα μεταλλευτικά έργα, όπως τις επιφανειακές και υπόγειες εκμεταλλεύσεις, όσο και τις διάφορες κατασκευαστικές δραστηριότητες σε πετρώματα ή εδαφικά υλικά, όπως ορύξεις σηράγγων, διαμόρφωση πρανών, εκσκαφές για θεμελιώσεις, κλπ. Η φάση της εξόρυξης ακολουθείται στις περισσότερες περιπτώσεις από τη φάση της αποκομιδής (φόρτωσης, μεταφοράς και απόθεσης του εξορυσσόμενου υλικού).

Η εξόρυξη των πετρωμάτων και άλλων φυσικών υλικών επιτυγχάνεται σήμερα με δύο κυρίως τρόπους (Αγιουτάντης, 2009):

- χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών αλλά με την άσκηση κατάλληλων μηχανικών, θερμικών, και άλλου τύπου δυνάμεων, και
- με την χρήση εκρηκτικών υλών, δηλαδή με τη δυναμική φόρτιση και θραύση των υλικών.

Για την πραγματοποίηση της εξόρυξης ενός τμήματος πετρώματος ή εδάφους απαιτείται η άσκηση κατάλληλου τύπου (όπως θλιπτική, εφελκυστική, διατμητική κλπ.) και κατάλληλου μεγέθους δυνάμεων. Η γενίκευση της άσκησης μηχανικών δυνάμεων καταλήγει στην προσφορά ενέργειας στο πέτρωμα ή αντίστοιχα στην κατανάλωση έργου από τα μέσα εξόρυξης.

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εξορυσσόμενων υλικών αφορά κυρίως στη μελέτη των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο υλικό, των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, των οριακών τάσεων ή παραμορφώσεων, δηλαδή των αντοχών του υλικού στις διάφορες καταπονήσεις κλπ.

Αντικείμενο επομένως αποτελεί για τη Μηχανική Πετρωμάτων ή Βραχομηχανική, είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων τόσο στο φυσικό τους περιβάλλον, όσο και στο εργαστήριο, κάτω από διάφορες εντατικές καταστάσεις.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται μια προσπάθεια να συσχετιστούν συγκεκριμένες παράμετροι που αφορούν στην ανατίναξη ενός πετρώματος με παραμέτρους που περιγράφουν την αντοχή του πετρώματος (ή της βραχομάζας). Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει προσπάθεια συσχετισμού ορισμένων σημαντικών παραμέτρων σχεδιασμού μιας ανατίναξης όπως το φορτίο, η απόσταση των διατρημάτων μεταξύ τους, η διάμετρος του διατρήματος, με τους δείκτες των συστημάτων ταξινόμησης του πετρώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΛΑΦΗ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

2.1 Εδάφη

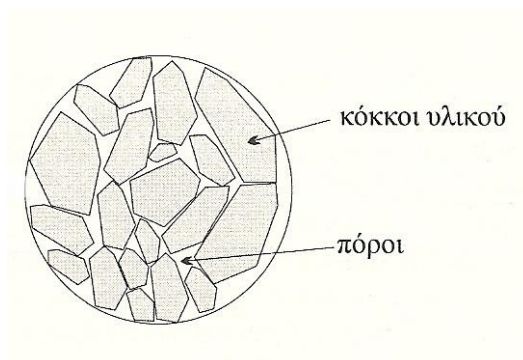
Έδαφος είναι το ανώτατο στρώμα του φλοιού της γης, δηλαδή το καλλιεργήσιμο επιφανειακό στρώμα σε πάχος 35 ως 50 cm. Το κάτω από το έδαφος στρώμα λέγεται υπέδαφος. Το υπέδαφος φτάνει στο 1,5 ως 2 m, ως εκεί δηλαδή που προχωρούν οι ρίζες των φυτών και μπορεί να γίνει γεωργική εκμετάλλευσή του. Το έδαφος προήλθε από την αποσάθρωση (διάβρωση) των πετρωμάτων της γήινης επιφάνειας. Η αποσάθρωση αυτή οφείλεται σε πολλές αιτίες: στη θάλασσα, τη βροχή, τον ήλιο, το κρύο, τον αέρα, τα φυτά και τα ζώα. Το έδαφος, όταν δεν καλλιεργείται, πλουτίζεται ακατάπανστα. Τα αυτοφυή φυτά (χόρτα, θάμνοι, δέντρα) με τις ρίζες τους το αποσαθρώνουν κάθε μέρα και το πλουτίζουν με τροφές που παίρνουν απ' τον αέρα (άζωτο κλπ.) και με τα φύλλα τους και τους κορμούς τους, που, όταν σαπίζουν, μεταβάλλονται σε τροφές για τα νέα φυτά.

Όλα τα εδάφη δεν σχηματίστηκαν με τον ίδιο τρόπο. Αλλού επέδρασε πιο πολύ το νερό και απόθεσε σε αυτά περισσότερη άμμο, αλλού έζησαν κατά εποχές περισσότερα ζώα και φυτά και πλούτισαν ανάλογα τα εδάφη με θρεπτικές ουσίες, πολλές απ' αυτές μεταφέρθηκαν με τα νερά των βροχών στις κοιλάδες, αλλού τα γύρω βουνά ήταν ασβεστολιθικά κλπ. Έτσι σήμερα τα καλλιεργήσιμα εδάφη χωρίζονται στις παρακάτω γενικές κατηγορίες (<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%88%CE%B4%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%82>):

- Σε αμμώδη.
- Σε αργιλώδη ή κοκκινοχώματα.
- Σε ασβεστολιθικά ή ασπροχώματα.
- Σε χουμώδη ή κηποχώματα ή μαυροχώματα.
- Σε ανάμεικτα.

Τα εδάφη αποτελούνται από στερεά σωματίδια που ανάμεσα τους παρεμβάλλονται κενά. Τα κενά αυτά, που ονομάζονται πόροι, μπορεί να είναι πλήρη αέρα ή και νερού (Σχήμα 2.1). Όταν λοιπόν τα κενά του εδάφους είναι πλήρη, τότε αυτό καλείται

κορεσμένο. Εάν μέρος των κενών πληρούται με αέρα (ή κάποιο άλλο αέριο), τότε το έδαφος καλείται μερικώς κορεσμένο ή μη κορεσμένο. Τα εδάφη διακρίνονται επίσης σε συνεκτικά, όπως είναι η άργιλος και γενικά τα αργιλικά εδάφη, και μη συνεκτικά όπως η άμμος, το χαλίκι και υλικά που αποτελούνται από μη εξαλλοιωμένα τεμάχια πετρώματος.



Σχήμα 2.1: Εδαφικά σωματίδια (Αγιουτάντης, 2002).

2.2 Πετρώματα

Γενικά ως πετρώματα χαρακτηρίζονται τα υλικά από τα οποία αποτελείται ο στερεός φλοιός της Γης. Γεωλογικά τα πετρώματα μπορούν να ταξινομηθούν ως προς την ηλικία τους και ως προς τον τρόπο γένεσής τους:

- Πυριγενή, όπως γρανίτες, βασάλτες κλπ.
- Ιζηματογενή, όπως ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι κλπ.
- Μεταμορφωμένα, όπως μάρμαρα, σχιστόλιθοι κλπ.

Με βάση τη σύσταση τους, την προέλευσή τους, αλλά και τα τεκτονικά φαινόμενα τα οποία επιδρούν σ' ένα πέτρωμα, είναι δυνατόν να διαμορφωθούν συγκεκριμένα μικροσκοπικά και μακροσκοπικά χαρακτηριστικά όπως κοκκομετρία, επίπεδα σχιστότητας, επίπεδα αδυναμίας, επίπεδα ασυνεχειών κλπ.

Στις εφαρμοσμένες επιστήμες, ως πέτρωμα αναφέρεται ένα υλικό κάποιας σκληρότητας και συνέχειας το οποίο είναι ανομοιογενές, ανισότροπο και χωρίς σταθερή χημική σύσταση. Οι μηχανικοί ενδιαφέρονται για τις συγκεκριμένες

ιδιότητες των πετρωμάτων όπως το πορώδες, οι ελαστικές σταθερές ενός υλικού, η ανισοτροπία του, η ψαθυρότητά του, η αντοχή του στις διάφορες καταπονήσεις κλπ. Τα πετρώματα, στον φυσικό τους χώρο, χαρακτηρίζονται από κάποιας μορφής ατέλειες στη δομή τους. Οι ατέλειες αυτές, που μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο στην εν γένει συμπεριφορά του υλικού, είναι δυνατόν να οφείλονται σε εξωτερικά ή εσωτερικά αίτια (όπως οι μηχανικές καταπονήσεις, οι χημικές και φυσικές διεργασίες κ.ά.). Αποτέλεσμα αυτών των επιδράσεων είναι η δημιουργία μικροσκοπικών ή μακροσκοπικών ασυνεχειών, ρωγμών, τοπικών ή εκτεταμένων μεταβολών του ιστού τους, με συνέπεια τη μεταβολή ή τη διαφοροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει η ύπαρξη νερού στους πόρους ή στις ασυνέχειες του υλικού, αφού έτσι μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες του (Αγιουτάντης, 2002).

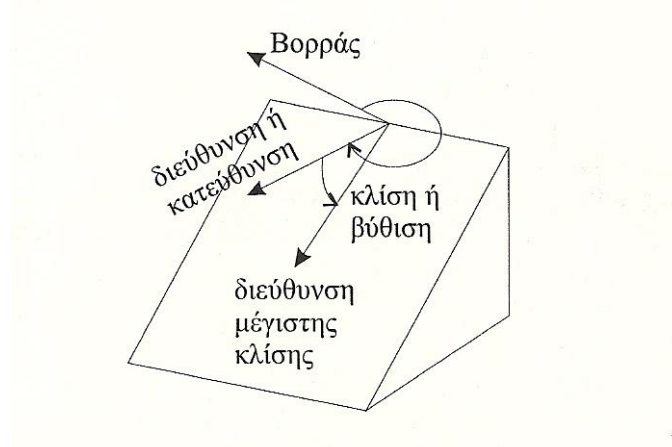
2.2 Δομή του πετρώματος

Κάθε μάζα πετρώματος που βρίσκεται μέσα στο φλοιό της γης υφίσταται πιέσεις εξαιτίας της βαρύτητας και του βάρους των υπερκείμενων πετρωμάτων, καθώς και άλλες τάσεις που οφείλονται στις μετακινήσεις μέσα στη λιθόσφαιρα. Οι τάσεις που επικρατούν στη λιθόσφαιρα είναι δυνατόν να προκαλέσουν ελαστική παραμόρφωση έως ότου τα πετρώματα φθάσουν στο όριο θραυσμού τους ή, εάν είναι εύπλαστα υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Τα κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά θραύσεως και της ελαστικής ή πλαστικής συμπεριφοράς είναι οι διακλάσεις, οι ασυνέχειες, τα ρήγματα και οι πτυχές, που χαρακτηρίζονται ως τεκτονικές δομές (Αλεξούλη-Λειβαδίτη, 2008). Όπως αναφέρθηκε, τα πετρώματα διαφέρουν από άλλα δομικά υλικά λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών ή άλλων χαρακτηριστικών που καθιστούν τη μάζα τους ασυνεχή.

Ως ασυνέχεια ορίζεται οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος η οποία χαρακτηρίζεται από μικρή έως αμελητέα αντοχή σε εφελκυσμό. Οι ασυνέχειες, όπως ήδη αναφέρθηκε, επηρεάζουν την τεχνική και μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων και γι αυτό είναι χρήσιμο να καταμετρώνται και να διαπιστώνεται το είδος των ασυνεχειών που αντιστοιχεί σε κάθε τρέχον μέτρο,

δηλαδή να βρίσκεται η πυκνότητα ασυνεχειών, πρώτα κάθε είδους χωριστά και έπειτα όλων μαζί. Όταν η πυκνότητα ασυνεχειών είναι μεγάλη το πέτρωμα χωρίζεται σε πολλά μικρά κομμάτια και μετατρέπεται σε μια χαλαρωμένη μάζα (Αλεξούλη-Λειβαδίτη, 2008).

Στον όρο ασυνέχεια δεν περιλαμβάνονται στοιχεία σχετικά με την ηλικία, τη γεωμετρία ή τον τρόπο δημιουργίας της. Αν και πολλές φορές οι ασυνέχειες έχουν ακανόνιστη γεωμετρία ή αντιστοιχούν σε καμπύλα επίπεδα, θεωρείται ότι υφίσταται μία κλίμακα, στην οποία μια ασυνέχεια ή ένα μεγάλο μέρος αυτής, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά επίπεδη για να μπορεί να παρασταθεί από μία ενιαία γωνία κλίσης στο επίπεδο ή ενιαία γωνία διεύθυνσης και κλίσης στον τρισδιάστατο χώρο. Μια ευθεία γραμμή στο χώρο μπορεί να παρασταθεί από δύο γωνίες: τη βύθιση και τη διεύθυνση. Για τον ορισμό των γωνιών αυτών θεωρείται το κάθετο επίπεδο που περιλαμβάνει την τυχαία ευθεία (Σχήμα 2.2) (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 2.2: Ορισμός επιπέδου ασυνέχειας στο χώρο (Αγιουτάντης, 2002).

- Η κλίση ή βύθιση (plunge), b , της ευθείας παρίσταται από τη γωνία που σχηματίζει η ευθεία με μία οριζόντια ευθεία που περιέχονται στο κάθετο επίπεδο. Θεωρείται θετική, όταν η ευθεία βρίσκεται κάτω από το οριζόντιο επίπεδο.
- Η διεύθυνση ή κατεύθυνση (trend) δίνεται συνήθως σαν γεωγραφικό αζιμούθιο του επιπέδου μετρούμενο θετικά από τον βορρά (0°). Καθώς ένα τυχαίο κάθετο επίπεδο στον χώρο έχει δύο γωνίες αζιμούθιου, οι οποίες

έχουν διαφορά 180° , εν προκειμένω λαμβάνεται η γωνία προς την οποία κλίνει η ευθεία.

2.2.1 Θεώρηση του ασυνεχούς πετρώματος

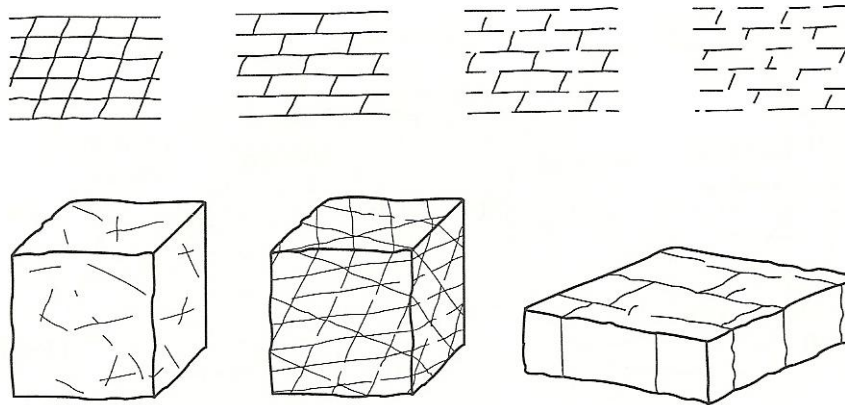
Η μάζα των πετρωμάτων σπάνια είναι ομοιογενής, ισότροπη και συνεχής. Συνήθως διασχίζεται από ποικίλες επιφάνειες αδυναμίας, είναι ανομοιόμορφα καταπονημένη ή αποσαθρωμένη και η απόκριση της σε καταναγκασμούς εξαρτάται από τη διεύθυνση καταπόνησης. Επομένως η απόκριση του πετρώματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων, δηλαδή των άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος και των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Η πολύπλοκη και γενικά τυχαία κατανομή των παραπάνω ιδιοτήτων καθιστά πρακτικά αδύνατη την προσδιοριστική εκτίμηση της απόκρισης του πετρώματος στις καταπονήσεις με βάση την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων. Αντί αυτού, η εκτίμηση της συμπεριφοράς του πετρώματος δύναται να γίνει με τη θεώρησή του ως σύνθετου ομοιογενούς υλικού, με χαρακτηριστικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του στέρεου σώματος. Οι ιδιότητες του σύνθετου αυτού υλικού καθορίζονται από την ταξινόμηση του πετρώματος, που προκειμένου να διακρίνεται από το άρρηκτο ομοιογενές πέτρωμα, ονομάζεται βραχομάζα. Δηλαδή, ο όρος βραχομάζα ή μάζα του πετρώματος (rock mass) αναφέρεται σε τμήμα του φυσικού υλικού, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις δομικές ατέλειες που το χαρακτηρίζουν (όπως οι φυσικές και τεχνητές ασυνέχειες του, η ενδεχόμενη υδροφορία κλπ.).

Η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, που θεωρείται ένα σύνθετο υλικό, διέπεται από παραμέτρους παραμόρφωσης και παραμέτρους αστοχίας-διαρροής. Η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών μέσα στα πετρώματα αυτά επιτυγχάνεται με προσομοιώματα όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τα συνεχή μέσα (Σοφιανός και Νομικός, 2008). Οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας είναι δυνατόν να προσδιορισθούν άμεσα μόνον με επί τόπου δοκιμές, οι οποίες απαιτούν ειδικό εξοπλισμό και είναι γενικά πολύπλοκότερες από τις εργαστηριακές δοκιμές. Εναλλακτικά, ο μελετητής ή ερευνητής καταφεύγει στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ακέραιου πετρώματος μέσω εργαστηριακών δοκιμών και στη συνέχεια

ανάγει τα αποτελέσματα αυτά στη μάζα του πετρώματος με την συνεκτίμηση διάφορων παραγόντων, όπως οι ιδιότητες του ακέραιου υλικού, οι ιδιότητες των ασυνεχειών, η υδραυλική πίεση των πόρων του υλικού κλπ.

Ο όρος ασυνέχειες (discontinuities) αναφέρεται στους διάφορους τύπους αδυναμίας, οι οποίες προέρχονται από οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στη συνέχεια του πετρώματος ή και από τη διαταραχή της ομοιογένειας και ισοτροπίας του πετρώματος. Οι μικροσκοπικές ή μακροσκοπικές ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν ένα πέτρωμα προέρχονται από γενετικές ή επιγενετικές επιδράσεις στο πέτρωμα, οι οποίες είναι δυνατόν να οφείλονται: α) στις συνθήκες σχηματισμού των διάφορων πετρωμάτων (σύσταση, ποσοστό πτητικών του μάγματος, ρυθμό ψύξης κλπ.), β) στις τεκτονικές, βαρυτικές και άλλου είδους δυνάμεις που επέδρασαν αργότερα, γ) στις διεργασίες διάβρωσης και αποσάθρωσης, κλπ. Χαρακτηριστικοί τύποι ασυνεχειών είναι οι διακλάσεις, τα ρήγματα, τα ασθενή επίπεδα διάστρωσης, οι μικρορωγματώσεις, ο σχισμός, οι διατμητικές ζώνες κλπ.

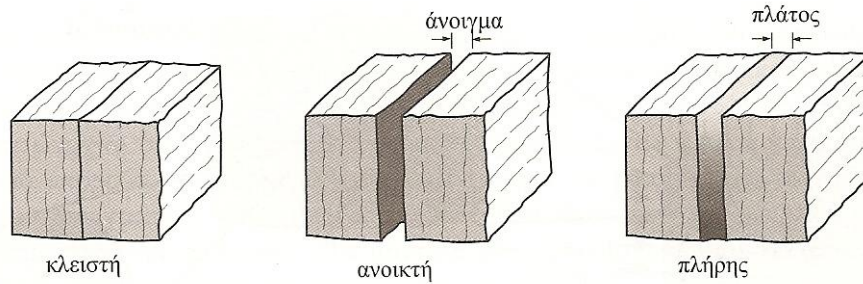
Οι μηχανικές ιδιότητες ενός πετρώματος εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιότητες των ασυνεχειών που υπάρχουν σ' αυτό. Οι αντοχές που χαρακτηρίζουν τις ασυνέχειες διακρίνονται συνήθως σε πρωτογενείς (δηλαδή αντοχές που εμφανίζονται κατά τη δημιουργία της ασυνέχειας), και δευτερογενείς ή παραμένουσες (που εμφανίζονται μετά από ενδεχόμενη σχετική ολίσθηση των παρειών των ασυνεχειών, περαιτέρω διεύρυνση των ασυνεχειών κλπ.). Η επίδραση των ασυνεχειών στις μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά των πετρωμάτων εκφράζεται συνήθως με διάφορους δείκτες ποιότητας που προκύπτουν από αντίστοιχα συστήματα ταξινόμησης των πετρωμάτων και των ασυνεχειών. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι ασυνέχειες ενός πετρώματος χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση. Θεωρείται ότι οι ασυνέχειες που χαρακτηρίζουν ένα πέτρωμα περιγράφονται από τις ακόλουθες γεωμετρικές και φυσικές παραμέτρους (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3: Οικογένειες ασυνεχειών στα πετρώματα (Brady and Brown, 1993) .

- τον προσανατολισμό των ασυνεχειών στον χώρο (διεύθυνση και κλίση)
- την ύπαρξη ομάδων (συστημάτων) ασυνεχειών με τον ίδιο προσανατολισμό των επιφανειών αδυναμίας
- τη διάταξη, έκταση και τομή των συστημάτων ασυνεχειών στον χώρο
- την πυκνότητα των ασυνεχειών (ασυνέχειες ανά μονάδα μήκους ή όγκου)
- τον τύπο των παρειών των ασυνεχειών (αδρές, λείες, κλπ.).

Ένας άλλος χαρακτηρισμός των ασυνεχειών είναι κλειστές, ανοικτές ή πλήρεις υλικού, ανάλογα με τη γεωμετρία και το υλικό πλήρωσης τους. Οι ανοικτές (open) ασυνέχειες χαρακτηρίζονται από το μέγεθος του ανοίγματος μεταξύ των παρειών τους, οι κλειστές (aperture) από την τραχύτητα των επιφανειών σε επαφή, ενώ οι πλήρεις (filled) από το υλικό πλήρωσης τους (Σχήμα 2.4).



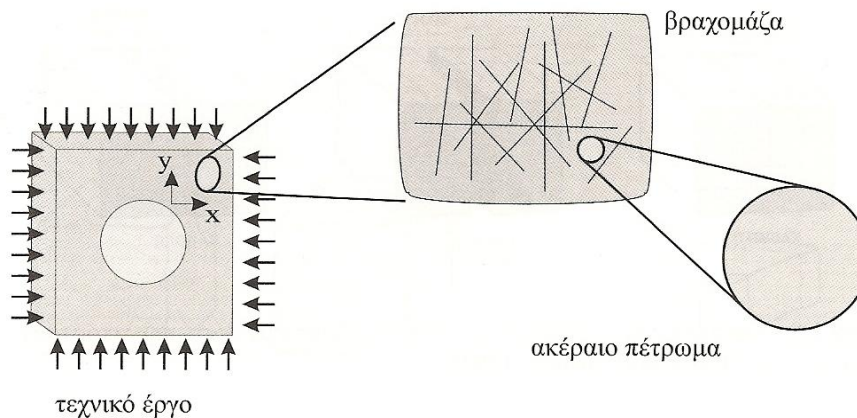
Σχήμα 2.4: Χαρακτηρισμός ασυνεχειών στα πετρώματα με βάση την απόσταση των παρειών τους (Brady and Brown, 1993).

Συνήθως, τα υλικά πλήρωσης έχουν χαμηλότερη διατμητική αντοχή από το πέτρωμα, εκτός από τα υλικά, όπως ο ασβεστίτης, ο χαλαζίας, ο πυρίτης, κλπ., που μπορεί να έχουν υψηλότερη αντοχή από το συνεχές πέτρωμα. Οι ιδιότητες των ασυνεχειών που πληρούνται με δευτερογενές υλικό εξαρτώνται και από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- την ορυκτολογία και τη κοκκομετρία του υλικού πλήρωσης
- το ποσοστό υγρασίας και το πάχος του υλικού πλήρωσης
- την αρχική μετακίνηση των παρειών της ασυνέχειας
- την τραχύτητα και ενδεχόμενη αλλοίωση των παρειών της ασυνέχειας .

2.2.2 Θεώρηση του ακέραιου πετρώματος

Ο όρος ακέραιο (συμπαγές, άρρηκτο) πέτρωμα (intact rock) αναφέρεται σε ένα εξιδανικευμένο τμήμα του φυσικού υλικού που δεν χαρακτηρίζεται από φυσικές ατέλειες στη δομή του και είναι δυνατόν να θεωρηθεί ως συνεχές, ομογενές και ισότροπο υλικό σε ότι αφορά στη μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Βραχομάζα και ακέραιο πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2002).

Οι ιδιότητες του ακέραιου πετρώματος είναι δυνατόν να προσδιορισθούν με εργαστηριακές δοκιμές με σχετικά απλή διαδικασία. Η θεώρηση του πετρώματος ως συνεχούς μέσου είναι μια απλοποιητική παραδοχή, η οποία όμως χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη θεωρητική ανάπτυξη των μαθηματικών και φυσικών μοντέλων παραμόρφωσης ή και αστοχίας των πετρωμάτων, καθώς και για τη μελέτη της συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε εντατικά πεδία.

Η μελέτη του πετρώματος ως συνεχούς μέσου βασίζεται στη θεωρία της μηχανικής τους συνεχούς μέσου με αναφορές στη θεωρία ελαστικότητας και στις καταστατικές εξισώσεις των διαφόρων υλικών. Εμπειρικά φαίνεται ότι η εφαρμογή της θεωρίας τους συνεχούς μέσου μπορεί να δώσει σωστές λύσεις, ακόμη και όταν εφαρμόζεται σε ασυνεχή μέσα (Means, 1985).

Με την παραδοχή αυτή, πέτρωμα είναι δυνατόν να θεωρηθεί ελαστικό, ομογενές και ισότροπο σε τρεις, δύο ή μία διάσταση, ανάλογα με το πρόβλημα που εξετάζεται. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του πετρώματος περιλαμβάνουν μοντέλα του συνεχούς μέσου, όπως μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (finite element models), μοντέλα πεπερασμένων διαφορών (finite difference models), μοντέλα συνοριακών στοιχείων (boundary element models), καθώς και μοντέλα του ασυνεχούς μέσου, όπως μοντέλα διακριτών στοιχείων (block element models, rigid block models).

Επίσης, αναφέρονται και υβριδικά μοντέλα το οποία συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα δύο ή περισσότερων μεθόδων που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες (Αγιουτάντης, 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΤΙΝΑΞΕΩΝ

3.1 Βασικές έννοιες

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει ορισμένες βασικές έννοιες που αφορούν στην διάτρηση και ανατίναξη του γεωλογικού σχηματισμού του εκάστοτε σχεδίου ανατίναξης σε επιφανειακές και υπόγειες εκμεταλλεύσεις .

Για να επιτευχθεί η ανατίναξη του μετώπου, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι η χρήση εκρηκτικών. Οι εκρηκτικές ύλες και τα εκρηκτικά μέσα, τα οποία γενικά αποκαλούνται εκρηκτικά υλικά ή εκρηκτικά, έχουν τη δυνατότητα να παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα και επομένως να χρησιμοποιηθούν για το θρυμματισμό των πετρωμάτων.

- *Εκρηκτική ύλη (explosive)* χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε χημική ένωση από την οποία εκλύονται μεγάλες ποσότητες αερίων και ενέργειας σαν συνέπεια της ακαριαίας αποσύνθεσής της. Το φαινόμενο της ακαριαίας αποσύνθεσης τέτοιων υλικών ονομάζεται έκρηξη.
- *Εκρηκτικό μέσο (blasting agent)* χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε υλικό ή μίγμα, το οποίο έχει εκρηκτικές ιδιότητες, αλλά του οποίου τα συστατικά δεν χαρακτηρίζονται σαν εκρηκτικές ύλες.

Τα υλικά αυτά μπορούν να εναυθούν (ενεργοποιηθούν) με τη βοήθεια θερμότητας, κρούσης, τριβής, κρουστικού κύματος ή με κάποιο συνδυασμό των προηγούμενων. Τα εκρηκτικά μίγματα ή ενώσεις συνήθως αποτελούνται από καύσιμα και οξειδωτικούς παράγοντες.

Ενδεικτικά, σαν εκρηκτικές ύλες χρησιμοποιούνται οι πυρίτιδες ($\text{KNO}_3 + \text{S} + \text{C}$), το νιτρικό αμμώνιο (NH_4NO_3), εκρηκτικά με βάση τη νιτρογλυκερίνη ($\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_9\text{N}_3$), πετρελαιοαμμωνίτες (ANFO, με συνήθη αναλογία κατά βάρος 94:6), κλπ.

Η σωστή επιλογή της κατάλληλης εκρηκτικής ύλης για τις απαιτήσεις μιας υπόγειας ή υπαίθριας εξόρυξης βασίζεται στην αξιολόγηση των εκρηκτικών υλών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Η σύγκριση της αποδοτικότητας των διαφόρων εκρηκτικών υλικών βασίζεται τόσο στη σύγκριση των ιδιοτήτων του

μίγματος από χημική και φυσική άποψη όσο και στη συμπεριφορά του υλικού κατά τη γόμωση των διατρημάτων και την ευαισθησία του στις επικρατούσες συνθήκες.

Γενικά, τα εκρηκτικά διακρίνονται σε εκρηκτικά χαμηλής διαρρηκτικότητας ή βραδυδραστικά (low explosives) και εκρηκτικά υψηλής διαρρηκτικότητας (high explosives).

Η λύση της συνέχειας του πετρώματος επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Από τη διάδοση του κρουστικού παλμού που παράγεται κατά την έκρηξη,
- Από την εκτόνωση του ωστικού κύματος των αερίων που παράγονται κατά την έκρηξη.

Το πρώτο φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα τη θραύση του πετρώματος λόγω εφαρμογής ενός υψηλού εντατικού πεδίου, διότι κατά την απότομη εκτόνωση των αερίων της έκρηξης μεταδίδεται στο πέτρωμα ένας ισχυρός τασικός παλμός. Η έννοια παλμός αναφέρεται σε μία κυματομορφή η οποία διαρκεί για μικρό χρονικό διάστημα ενώ έχει μεγάλο πλάτος (ένταση). Ενώ, το δεύτερο φαινόμενο συνεισφέρει στην απομάκρυνση των θρυμματισμένων τεμαχίων από τη φυσική τους θέση (Αγιουτάντης, 2009).

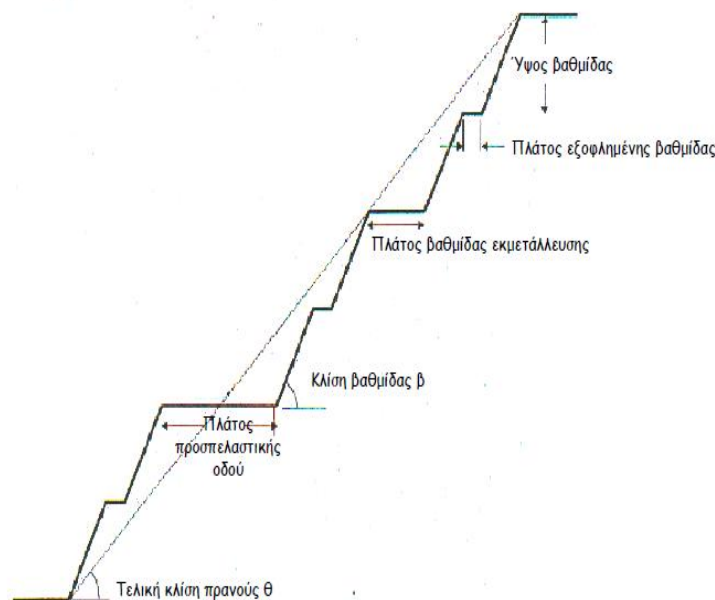
Στη συνέχεια παρατίθενται βασικοί ορισμοί και στοιχεία σχεδιασμού:

- *Υπαίθρια εκμετάλλευση*: Οποιαδήποτε εκμετάλλευση στερεών πρώτων υλών, η οποία πραγματοποιείται με οικονομικά συμφέροντες όρους.
- *Υπόγεια εκμετάλλευση*: Οποιαδήποτε εκμετάλλευση στερεών πρώτων υλών, που πραγματοποιείται με οικονομικά συμφέροντες όρους, κάτω από την επιφάνεια της γης.
- *Άγονα και υπερκείμενα*: Το χωρίς οικονομική σημασία πέτρωμα που περιβάλλει το κοίτασμα. Άγονα χαρακτηρίζονται και τα χαμηλής ποιότητας τμήματα του κοιτάσματος των οποίων η επεξεργασία μετά την εξόρυξη είναι ασύμφορη. Υπερκείμενα χαρακτηρίζονται τα άγονα που υπέρκεινται του κοιτάσματος και πρέπει να απομακρυνθούν για να πραγματοποιηθεί η εκμετάλλευση.

- *Αποκάλυψη*: Η εξόρυξη και απομάκρυνση των αγόνων από το μέτωπο. Η φάση της εργασία αυτής, η οποία πραγματοποιείται πριν την έναρξη της παραγωγής του ορυκτού ή του μεταλλεύματος ονομάζεται αρχική αποκάλυψη.
- *Σχέση αποκάλυψης*: Ορίζεται ως ο αριθμός των μονάδων όγκου ή βάρους αγόνων που πρέπει να απομακρυνθούν για να αποκαλυφθεί μία μονάδα χρήσιμου προϊόντος και δίνεται από τη σχέση:

$$\Sigma. A. = \frac{\text{Άγονα (m}^3\text{)}}{\text{Χρήσιμο συστατικό (ton ή m}^3\text{)}}$$

- *Κλίση πρανούς*: Η γωνία ή η κλιτύς ενός πρανούς με το οριζόντιο επίπεδο.
- *Γωνία φυσικού πρανούς*: Η μέγιστη κλίση υπό την οποία σωρός χαλαρού ή θραυσμένου υλικού βρίσκεται σε ισορροπία.
- *Κλίση πρανούς εκμετάλλευσης*: Η κλίση που έχουν τα πρανή της εκμετάλλευσης προς το οριζόντιο επίπεδο οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης. Μέγιστη, τελική ή οριακή κλίση είναι η κλίση στην οποία μπορεί να φθάσει με ασφάλεια η εκμετάλλευση κατά την τελική φάση.
- *Βαθμίδα*: Είναι η συνήθης μορφή ενός μετώπου παραγωγής. Αποτελείται από δύο ελεύθερες επιφάνειες: μία οριζόντια και μία κατακόρυφη ή κεκλιμένη με μεγάλη κλίση (Μενεγάκη, 2010).



Σχήμα 3.1: Πρανές εκμετάλλευσης (Μενεγάκη, 2010).

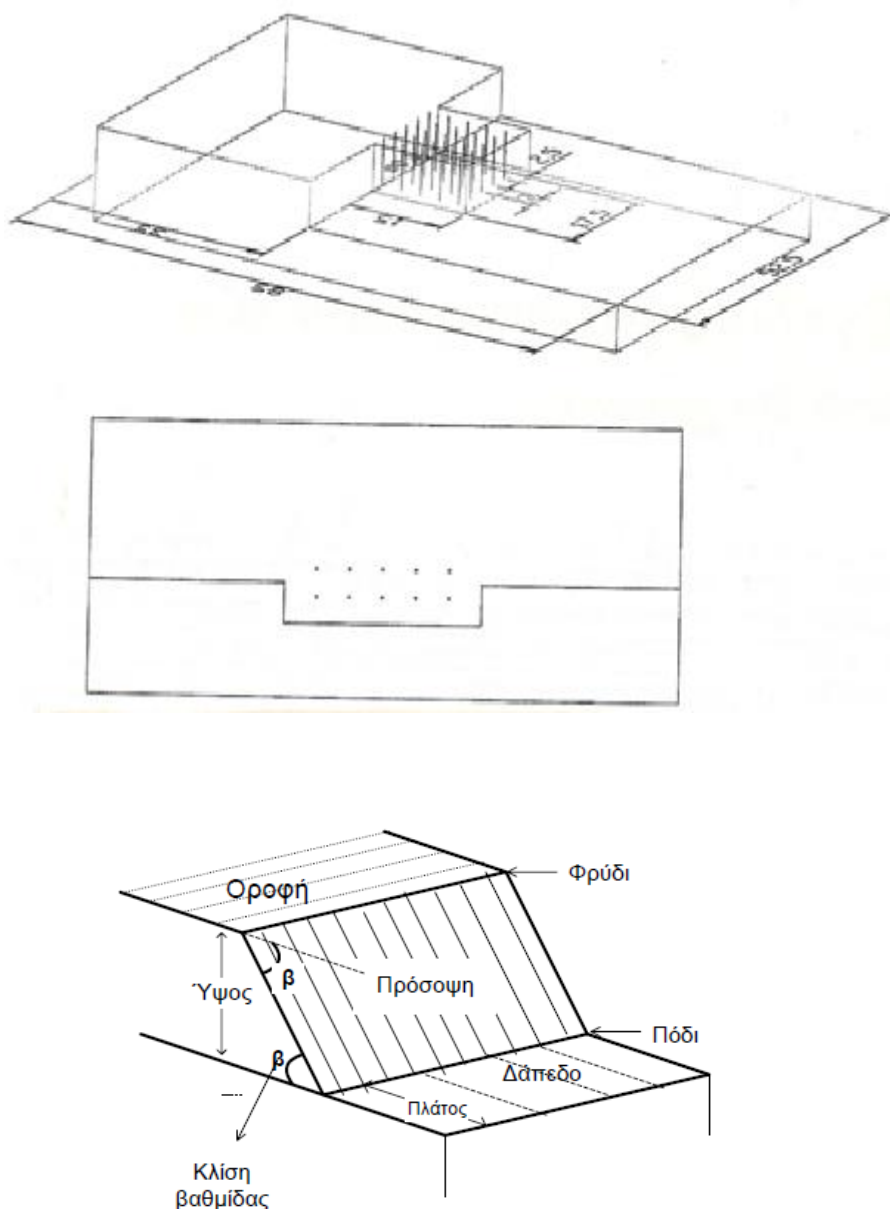
3.2 Εισαγωγή

Τα διάφορα τεχνικά και μεταλλευτικά έργα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο της εκμετάλλευσης, σε υπαίθρια και υπόγεια. Σημειώνεται ότι συνήθως στις υπόγειες ανατινάξεις χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι χρόνοι επιβραδύνσεων (της τάξης των 500ms) και για λόγους ασφαλείας και για να δώσουν περισσότερο χρόνο στο πέτρωμα να μετακινηθεί.

Οι υπαίθριες εξορύξεις σε μεταλλευτικά και άλλα τεχνικά έργα περιλαμβάνουν τη φάση του θρυμματισμού και αποκόλλησης του πετρώματος από τη φυσική του θέση με τη βοήθεια εκρηκτικών. Τα εκρηκτικά τοποθετούνται σε κάθετα, κεκλιμένα ή οριζόντια διατρήματα, τα οποία μετά την όρυξη τους (drilling) γομώνονται και ανατινάσσονται (blasting). Ο όρος διάτρημα (drillhole, borehole, blasthole) αναφέρεται κυρίως σε μικρής διαμέτρου και μικρού μήκους κυλινδρικά ανοίγματα.

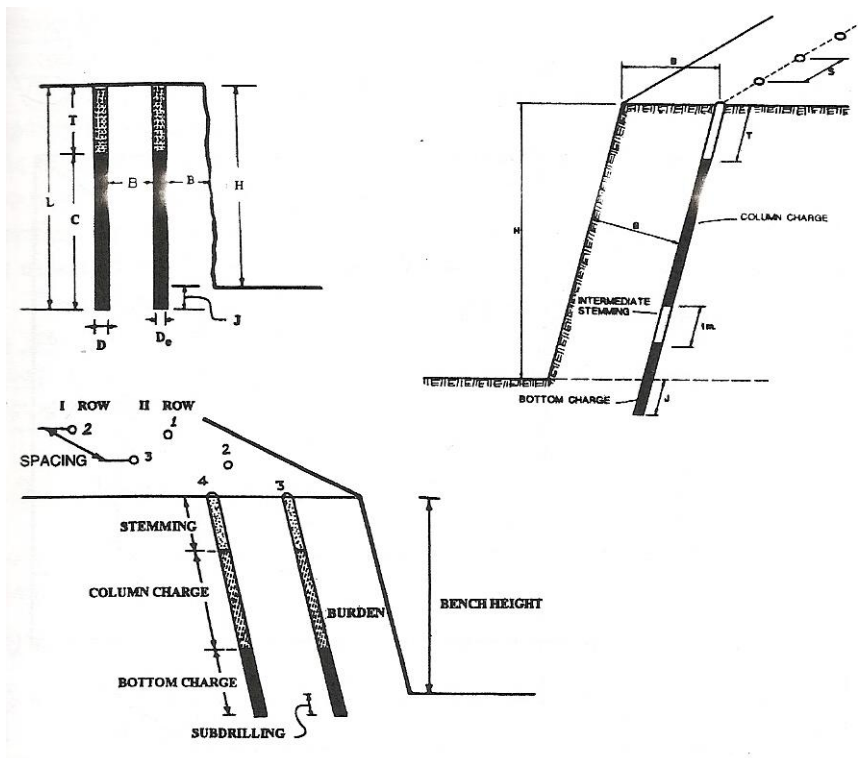
Ο σχεδιασμός των επιφανειακών εξορύξεων πρέπει να χαρακτηρίζεται από: α) την εύκολη εφαρμογή του στην πράξη, β) τη δυνατότητα προσαρμογής του σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και γ) την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων για τις υπάρχουσες συνθήκες.

Ο συνήθης σχεδιασμός των υπαίθριων εκμεταλλεύσεων που προβλέπεται να εκταθούν σε βάθος γίνεται με την κοπή βαθμίδων (πατάρια). Η γεωμετρία των βαθμίδων είναι συνάρτηση της απαιτούμενης παραγωγής, της επιθυμητής παραγωγής και του εξοπλισμού. Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει μια τυπική τρισδιάστατη απεικόνιση βαθμίδας, μαζί με την αντίστοιχη κάτοψη.



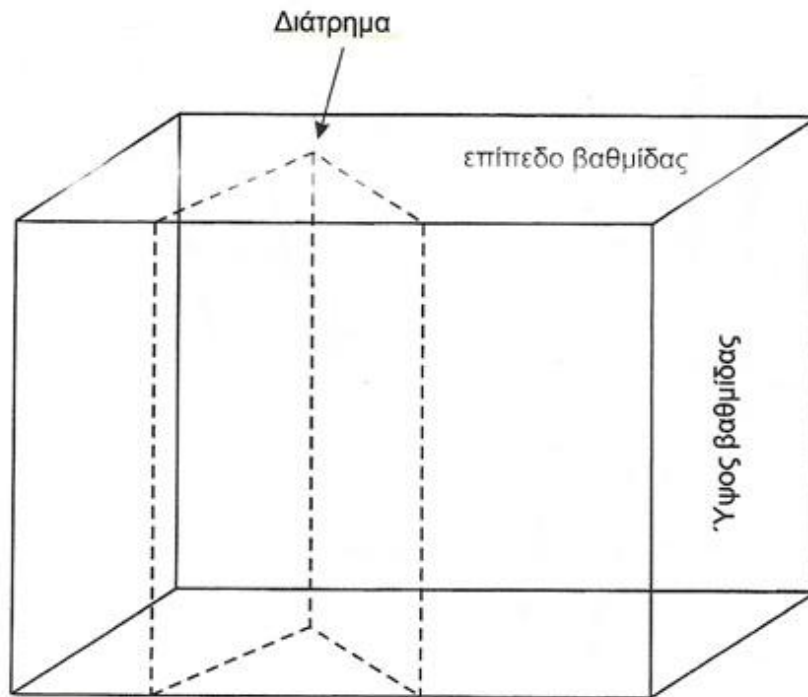
Σχήμα 3.2: Τυπική απεικόνιση βαθμίδας (Σαρρής 2004, Μενεγάκη 2010).

Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει τυπικές γεωμετρίες επιφανειακών βαθμίδων, και εκρηκτικών στηλών σε τομή καθώς και τον αντίστοιχο συμβολισμό. Η γεωμετρία των βαθμίδων προσδιορίζεται από το ύψος τους (bench height), το πλάτος τους και την κλίση του μετώπου.



Σχήμα 3.3: Τυπική γεωμετρία βαθμίδας (Bhandari, 1997 και Jimeno et al., 1995).

Η εκτόνωση του εκρηκτικού έχει σκοπό να θρυμματίσει το πέτρωμα μεταξύ των διατρημάτων και του μετώπου ώστε η βαθμίδα να “υποχωρήσει” ορισμένη απόσταση. Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει την περιοχή δράσης μίας εκρηκτικής στήλης που έχει τη μορφή τριγωνικού πρίσματος. Για τη σωστή διαμόρφωση της νέας βαθμίδας τα εκρηκτικά πρέπει να παρέχουν αρκετή ενέργεια στο κάτω μέρος του διατρήματος για θραύση του πετρώματος σε διάτμηση στο επίπεδο του πατώματος της βαθμίδας. Πολλές φορές για την υποβοήθηση της διαμόρφωσης του χαμηλότερου τμήματος της βαθμίδας χρησιμοποιούνται και οριζόντια διατρήματα (ντούκια), τα οποία ορύσσονται σε κατάλληλες θέσεις. Η γωνία από το οριζόντιο επίπεδο με την οποία ορύσσονται είναι κρίσιμη, καθώς σε μέσες γωνίες το ντούκι μπορεί να λειτουργήσει ως πυροβόλο εκτοξεύοντας πέτρες και επιγύμωση (Αγιουτάντης, 2009).



Σχήμα 3.4: Περιοχή δράσης εκρηκτικής στήλης (Αγιουτάντης, 2009).

Ο τρόπος γόμωσης ενός διατρήματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τελικό θρυμματισμό του πετρώματος. Στον πυθμένα του διατρήματος τοποθετούνται συνήθως ισχυρότερα εκρηκτικά (bottom charge), που συνεπάγεται τοπική αύξηση του συντελεστή ειδικής κατανάλωσης, με συνέπεια τον καλύτερο θρυμματισμό του πετρώματος στην αντίστοιχη περιοχή. Ένας εμπειρικός κανόνας που συχνά εφαρμόζεται, ανάλογα με τη γεωλογία της περιοχής, είναι ότι το μισό της συνολικής ποσότητας του εκρηκτικού πρέπει να τοποθετείται στο χαμηλότερο ένα τρίτο της εκρηκτικής στήλης.

Ο συντελεστής κατανάλωσης (powder factor) ή ειδική κατανάλωση (specific charge) αποδίδει το βάρος του εκρηκτικού που απαιτείται για τη θραύση μιας μονάδας βάρους πετρώματος και υπολογίζεται σε μονάδες lbs/ton, lbs/yd³, kg/ton, kg/m³ κλπ.

Η επιγόμωση (stemming) συνίσταται στη συμπλήρωση της στήλης με προϊόντα διάτρησης (θρύμματα) ή μίγματα άμμου και αργίλου, ώστε η εκρηκτική ενέργεια να μην χάνεται στην ατμόσφαιρα αλλά να κατευθύνεται στο πέτρωμα. Η βέλτιστη επιγόμωση κυμαίνεται από 0.67 έως 2 φορές το φορτίο.

Η υποδιάτρηση είναι το επιπλέον μήκος του διατρήματος που ορύσσεται κάτω από το επίπεδο του πόδα μιας βαθμίδας.. Έχει σκοπό: α) να εξασφαλίσει τη γόμωση μεγαλύτερης ποσότητας εκρηκτικού στον πυθμένα του διατρήματος και β) να απορροφήσει τυχόν επιχωμάτωση τους διατρήματος που μπορεί να γίνει είτε με φυσική πτώση τμημάτων των τοιχωμάτων ή κατά τη διάρκεια της γόμωσης.

Η βέλτιστη υποδιάτρηση κυμαίνεται από 0.2 έως 0.3 φορές την απόσταση μεταξύ των διατρημάτων, ή από 0.1 έως 0.6 φορές το φορτίο (Αγιουτάντης, 2009).

3.2 Παράμετροι σχεδιασμού ανατινάξεων

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσονται οι παράμετροι και οι παράγοντες που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των ανατινάξεων στις βαθμίδες των επιφανειακών και στα μέτωπα των υπόγειων εκμεταλλεύσεων. Ο επιτυχής σχεδιασμός προϋποθέτει γνώσεις των ιδιοτήτων των εκρηκτικών, των μηχανισμών θραύσης και θρυμματισμού του πετρώματος, των περιορισμών των συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και των επιπτώσεων του μη βέλτιστου σχεδιασμού των ανατινάξεων. Ο σχεδιασμός των ανατινάξεων δεν είναι μια απόλυτη διαδικασία. Λόγω της μεταβλητής φύσης των πετρωμάτων, των γεωλογικών δομών και των εκρηκτικών δεν είναι δυνατόν να γίνει ο σχεδιασμός μίας ανατίναξης με βάση ορισμένους μαθηματικούς τύπους χωρίς δοκιμές επί τόπου.

Σε πολλές περιπτώσεις ο αρχικός σχεδιασμός ενός έργου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ζωής του με μία συνεχή διαδικασία αξιολόγησης των ιδιοτήτων του πετρώματος, των αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται, των απαιτήσεων της παραγωγής και της τεχνολογίας των εκρηκτικών. Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι δύο παράγοντες οι οποίοι είναι συχνά αντικρουόμενοι (Αγιουτάντης, 2009):

- τα εκρηκτικά λειτουργούν καλύτερα όταν υπάρχει μία ελεύθερη επιφάνεια παράλληλα με την εκρηκτική στήλη κατά τη φάση της ανατίναξης,
- πρέπει να υπάρχει αρκετός χώρος για τη διόγκωση και μετακίνηση του θραυσμένου πετρώματος.

Γενικά, οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν από τον μηχανικό παραγωγής για το σχεδιασμό της ανατίναξης μίας επιφανειακής βαθμίδας είναι οι ακόλουθες (Hartman, 1987):

- το ύψος και η κλίση τους πρανούς (σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών βασίζεται σε στοιχεία ευστάθειας πρανών, μηχανολογικού εξοπλισμού κλπ.),
- η διάμετρος διατρημάτων,
- η κλίση των διατρημάτων,
- το φορτίο κάθε σειράς διατρημάτων,
- η πυκνότητα γόμωσης εκρηκτικού ή ποσότητα εκρηκτικού ανά διάτρημα.

3.2.1 Διάμετρος διατρήματος

Η διάμετρος των διατρημάτων είναι ίσως η βασικότερη επιλογή σε κάθε σχεδιασμό ανατίναξης. Η διάμετρος των διατρημάτων, ο τύπος του εκρηκτικού και ο τύπος του εξορυσσομένου πετρώματος καθορίζουν το φορτίο του κάθε διατρήματος. Οι διάμετροι διατρημάτων που χρησιμοποιούνται σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις κυμαίνονται από 2 έως 17 in (δηλαδή 5-43 cm) (Dick et al., 1983). Στην πράξη όμως οι επιλογές περιορίζονται περισσότερο ανάλογα με τη δυναμικότητα του διατρητικού εξοπλισμού. Εμπειρικά προκύπτει ότι για τη διάμετρο των διατρημάτων θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη περιοριστική σχέση (Dick et al., 1983):

$$\frac{H}{40} \leq d \leq \frac{H}{20}$$

όπου:

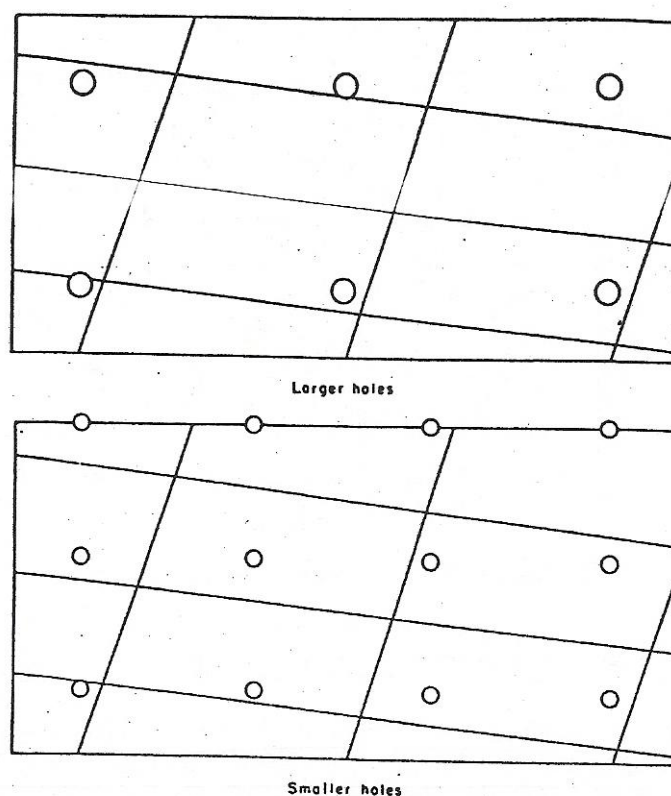
d = η διάμετρος των διατρημάτων (in),

H = το ύψος της βαθμίδας (ft) .

Λίγα διατρήματα με μεγάλη διάμετρο δημιουργούν μεγάλο ποσοστό λεπτομερών και μεγάλων τεμαχίων, ενώ περισσότερα διατρήματα μικρότερης διαμέτρου

δημιουργούν τις προϋποθέσεις για καλύτερη κατανομή των κλασμάτων του θραυσμένου υλικού. Γενικά, το μέσο μέγεθος των θραυσμένων τεμαχίων του πετρώματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται η διάμετρος του διατρήματος, το οποίο συνεπάγεται την αύξηση του κόστους πρωτογενούς ή δευτερογενούς θραύσης ή/ και μεταφοράς ενώ αντίθετα μειώνεται το κόστος και ο απαιτούμενος χρόνος για την όρυξη.

Σημαντικό, επίσης, παράγοντα για την επιλογή της διαμέτρου των διατρημάτων αποτελεί ο τύπος και η διάταξη των ασυνεχειών (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Επίδραση των ασυνεχειών στην επιλογή της διαμέτρου των διατρημάτων (Dick et al., 1983).

Η υφιστάμενες ζώνες αδυναμίας ή επίπεδα ασυνέχειας επιτείνουν τη δημιουργία χονδρομερών τεμαχίων, για το λόγο αυτό η χρήση μεγάλων διαμέτρων και επομένως μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των διατρημάτων ενισχύουν τα φαινόμενα αυτά με συνέπεια τον μη ικανοποιητικό θρυμματισμό του πετρώματος.

Συνοψίζοντας, η διάμετρος των διατρημάτων καθορίζεται ανάλογα με: α) τη γεωλογία, β) τον απαιτούμενο βαθμό θρυμματισμού, γ) το ύψος της βαθμίδας, δ) το συνολικό κόστος εξόρυξης και ε) περιβαλλοντικούς ή άλλους περιοριστικούς παράγοντες.

3.2.2 Ύψος βαθμίδας

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που ελέγχει το σχεδιασμό μιας ανατίναξης είναι τη γεωμετρία της βαθμίδας. Συνήθως, το ύψος της βαθμίδας, H , είναι σχετικά σταθερό για τα λατομεία ορθών βαθμίδων και η τιμή του αναμένεται να είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές εργασίας του εξοπλισμού φόρτωσης. Τα ύψη των βαθμίδων διαφέρουν. Σε μεγάλες υπαίθριες εκμεταλλεύσεις με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων, η συνήθης τιμή του ύψους είναι 10-15m αν και έχουν υπάρξει περιπτώσεις όπου το ύψος έφτανε ακόμα και τα 30m (Bhandari, 1997). Παραδείγματος χάριν, το ύψος βαθμίδας μπορεί να κυμαίνεται από 15m σε ορυχεία χαλκού έως, το λιγότερο, 1m σε ορυχεία ουρανίου (Kennedy, 1990). Σε πολλά μέρη, τα ύψη περιορίζονται για λόγους ασφαλείας. Σε μή μεταλλευτικά κατασκευαστικά έργα (π.χ. κατασκευή δρόμων), τα ύψη των βαθμίδων μπορεί να κυμαίνονται από λίγα δεκατόμετρα έως αρκετά μέτρα.

Το μέγιστο ύψος υπαγορεύεται από την πλέον πρόσφορη νομική αρχή. Σε γενικές γραμμές, ύψος περίπου 10-18m έχει θεωρηθεί το πιο οικονομικό και λιγότερο επικίνδυνο για τους εργαζόμενους. Συγκεκριμένα, βάση μελετών που διεξήχθησαν το 1970 ένα οικονομικό ύψος βαθμίδας έχει προταθεί να είναι 12m. Στη συνέχεια, μετά από αναλύσεις και προσομοιώσεις προκειμένου να καθοριστεί το πιο οικονομικό ύψος βαθμίδας σ' ένα μοντέλο λατομείου σχεδιασμένο για ετήσια παραγωγή 10^6 τόννοι τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ύψος βαθμίδας στην περίπτωση επίπεδου λατομείου περιορίζεται σε 10m, ενώ στην περίπτωση λατομείου σε πλαγιά λόφου η τιμή του μπορεί να φτάσει έως και 25m (Kose et al., 2005).

Το ύψος της βαθμίδας προσδιορίζεται συνήθως από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- τις γεωμετρικές διαστάσεις του σχηματισμού που εξορύσσεται,

- την ευστάθεια των πρανών της βαθμίδας κάτω από τις δυσμενέστερες συνθήκες,
- το μέγεθος του εξοπλισμού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί,
- την εν γένει ασφάλεια του εργοταξίου (προσωπικού και εξοπλισμού).

Όταν το συνολικό πάχος του σχηματισμού (υπερκείμενα ή κοίτασμα) δεν είναι δυνατόν να εξορυχθεί σε μία βαθμίδα, τότε καθορίζεται ο αριθμός των διαδοχικών βαθμίδων και τα αντίστοιχα ύψη, σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία (Αγιουτάντης, 2009). Το ύψος της βαθμίδας φαίνεται, επίσης, στο Σχήμα 3.3, παραπάνω.

3.2.3 Φορτίο (B)

Ως ενεργό φορτίο ορίζεται η απόσταση του ενός διατρήματος από την πλησιέστερη ελεύθερη στατική ή δυναμική επιφάνεια. Ως γεωμετρικό φορτίο ορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο σειρών εκρηκτικών σε μια διεύθυνση κάθετη στο αρχικό μέτωπο, ή γενικότερα η απόσταση ενός διατρήματος από το μέτωπο.

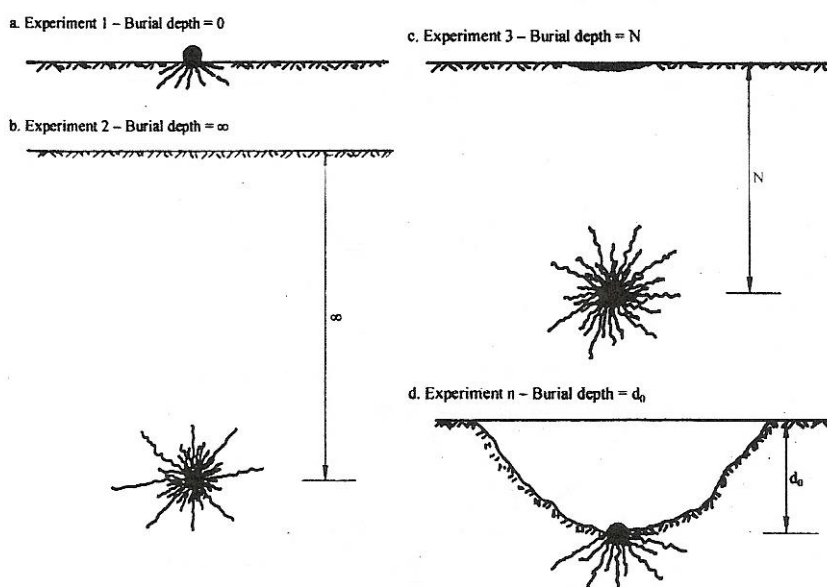
Η διάταξη και η γεωμετρία των διατρημάτων προσδιορίζεται από το φορτίο (εύρος μετώπου, burden), δηλαδή την απόσταση τους από το μέτωπο της βαθμίδας, την μεταξύ τους απόσταση (spacing), τη διάμετρο τους (drilling diameter), το μήκος (length) και την κλίση τους. Σειρά διατρημάτων ορίζεται το σύνολο δύο ή περισσότερων διατρημάτων έτσι ώστε η γραμμή που ενώνει τα κέντρα τους να είναι κάθετη προς τη διεύθυνση κίνησης του πετρώματος μετά την ανατίναξη, δηλαδή παράλληλη προς το μέτωπο της βαθμίδας (Σχήμα 3.6).

Για τον ακριβή υπολογισμό του φορτίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του πετρώματος και του εκρηκτικού, η ποσότητα του εκρηκτικού καθώς και η γεωμετρία του διατρήματος. Στην περίπτωση όπου το βάθος του διατρήματος είναι μικρότερο από το φορτίο (Σχήμα 3.8) τότε το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία κρατήρα. Αν το βάθος του διατρήματος είναι ίσο με το φορτίο, τότε αν το εκρηκτικό είναι αρκετά δυνατό, το πέτρωμα ενδέχεται να σπάσει κατά μήκος της ευθείας με κλίση 45° ως προς την οριζόντιο, αλλιώς μπορεί να δημιουργηθεί κρατήρας γύρω από το διάτρημα.

Τα χαρακτηριστικά της δημιουργίας κρατήρα από εκρήξεις σε κάποιο βάθος περιγράφονται από τον Livingston (1956) όπως αναφέρεται από τον Roberts (1981) με τη βοήθεια της θεωρίας μεταφοράς ενέργειας. Ο ρυθμός απόδοσης ενέργειας του εκρηκτικού είναι ανάλογος με την ταχύτητα έκρηξης, ενώ η ενέργεια είναι ανάλογη με την ποσότητα του εκρηκτικού. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η ενέργεια που μεταφέρεται από το εκρηκτικό στο στερεό πέτρωμα μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο όταν:

- αυξάνεται το βάρος του εκρηκτικού σε σταθερό βάθος,
- μειώνεται το βάθος για σταθερό βάρος εκρηκτικού

Το βάθος για το οποίο μόλις παρατηρείται αστοχία στην επιφάνεια ονομάζεται κρίσιμο βάθος (critical depth), ενώ η αντίστοιχη ποσότητα εκρηκτικού χαρακτηρίζεται ως κρίσιμο βάρος (critical weight) (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.6: Δημιουργία κρατήρα λόγω υπόγειων ανατινάξεων (Hustrulid, 1999).

Η ακόλουθη σχέση συνδέει τα κρίσιμο βάρος με το κρίσιμο βάθος:

$$d_c = E \sqrt[3]{W_c}$$

όπου:

d_c = το κρίσιμο βάθος (m),

E = ο συντελεστής ενέργειας παραμόρφωσης,

W_c = το κρίσιμο βάρος του εκρηκτικού (kg).

Όταν το βάρος του εκρηκτικού αυξηθεί ώστε να δημιουργηθεί κρατήρας, τότε τα φαινόμενα που παρατηρούνται αντιστοιχούν σε θραύση. Όταν το βάρος του εκρηκτικού αυξηθεί παραπάνω από τη βέλτιστη επιτρεπτή τιμή, τότε παρατηρούνται φαινόμενα εκτόξευσης τεμαχίων πετρώματος στην ατμόσφαιρα (flyrock) με απώλεια της αντίστοιχης ενέργειας.

Το φορτίο μπορεί να υπολογισθεί από διάφορες εμπειρικές σχέσεις (Αγιουτάντης, 2009):

1. *Εξίσωση Anderson*: $B = c\sqrt{dL}$

Προσδιορίζει το φορτίο, που αντιστοιχεί στην ανατίναξη ενός διατρήματος.

2. *Εξίσωση Fraenkel*: $B = \frac{RL^{0.3} H_c^{0.3} d^{0.8}}{50}$

3. *Εξίσωση Pearse*: $B = k \frac{d}{12} \left[\frac{P_s}{T_0} \right]$

Υπολογίζει το φορτίο σαν συνάρτηση του συντελεστή ανατίναξης (rock blastability factor).

4. *Εξίσωση Langefors*: $B_{max} = \frac{d}{33} \frac{\sqrt{P_s}}{cf\left(\frac{S}{B}\right)}$

5. *Εξίσωση Ash*: $B = K_B \frac{d_e}{12}$

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ενεργού φορτίου.

6. *Εξίσωση Konya*: $B = 3.15d^3 \sqrt{\frac{\gamma_r}{\gamma_e}}$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί βελτίωση της εξίσωσης του Ash και εξαρτάται από τη διάμετρο του διατρήματος και τα ειδικά βάρη του εκρηκτικού και του πετρώματος.

Όπου:

c = εμπειρική σταθερά ($c=1$, για L σε ft και d σε in) που εξαρτάται από το πέτρωμα

d = η διάμετρος του διατρήματος (in)

L = το μήκος του διατρήματος (ft)

B = το φορτίο (m)

R = η ‘‘αντίσταση’’ στην έκρηξη, που κυμαίνεται από 1-6 ανάλογα με το πέτρωμα

H_c = το ύψος της εκρηκτικής στήλης (m)

K = ο συντελεστής ανατίναξης, που κυμαίνεται από 0.7-0.12 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος

P_s = η πίεση έκρηξης στη σταθερή κατάσταση (psi)

T_0 = η αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό (psi)

B_{max} = το μέγιστο φορτίο (m)

P = ο βαθμός συμπίκνωσης του εκρηκτικού ($P=1-1.6 \text{ kg/dm}^3$)

s = η ισχύς του εκρηκτικού κατά βάρος

f = συντελεστής που εξαρτάται από την κλίση του διατρήματος

S/B = λόγος απόστασης διατρημάτων προς φορτίο (συνήθως $S/B=1.25$)

d_e = η διάμετρος εκρηκτικής στήλης (in)

K_B = συντελεστής φορτίου, που κυμαίνεται από 25-35 ανάλογα με το εκρηκτικό που χρησιμοποιείται και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος

γ_e = το ειδικό βάρος του εκρηκτικού

γ_r = το ειδικό βάρος του πετρώματος

Δίνονται επίσης πολλές ακόμα εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του φορτίου κατά το σχεδιασμό της ανατίναξης, από τους διάφορους ερευνητές.

Από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογισμού του φορτίου προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν, οι εξισώσεις των Pearse και Ash δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από αυτές των Σουηδών ερευνητών για μεγάλα διατρήματα που γίνεται γόμωση με ANFO.
- Οι εξισώσεις υπολογισμού φορτίου αποδίδουν όταν τα διατρήματα είναι παράλληλα προς την ελεύθερη επιφάνεια (δηλαδή το φορτίο είναι κάθετο κατά μήκος του διατρήματος). Σε αντίθετη περίπτωση, όπως τα διατρήματα με μοναδική ελεύθερη επιφάνεια την επιφάνεια διάτρησης, ή τα διατρήματα όπου το φορτίο μεταβάλλεται σημαντικά, ο υπολογισμός τους φορτίου με τις παραπάνω εξισώσεις πρέπει να ελέγχεται.

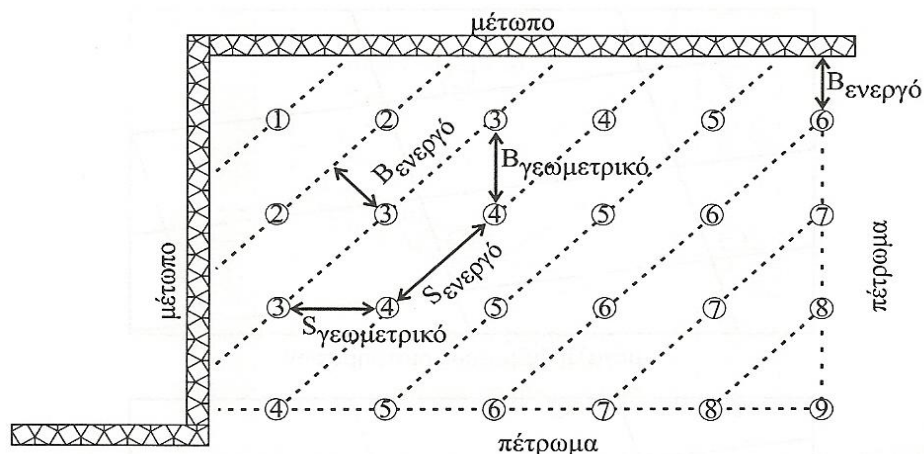
- Μια σχέση που αναφέρεται από τον Roberts (1981) ότι έχει πολύ καλά αποτελέσματα στην πράξη είναι η ακόλουθη:

$$B = 0.024d + 0.85$$

Όπου B = το φορτίο (m) και d =η διάμετρος διατρήματος (mm).

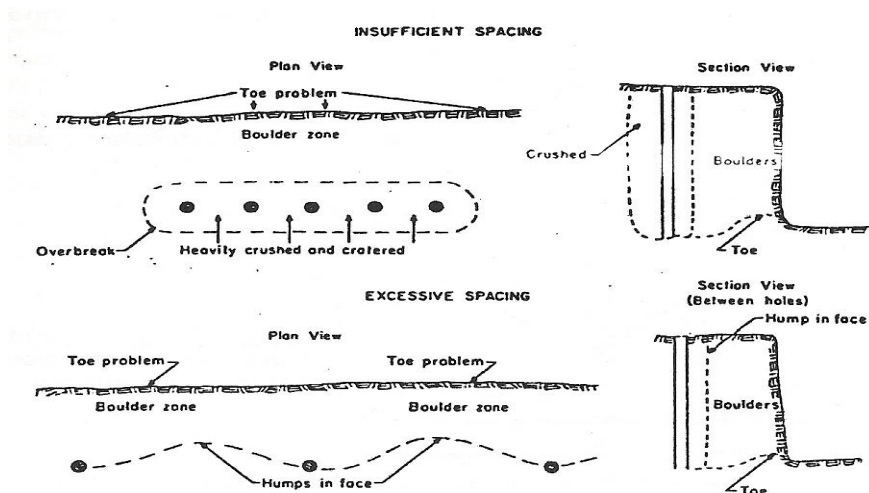
3.2.4 Απόσταση διατρημάτων (S)

Η απόσταση μεταξύ των γειτονικών διατρημάτων υπολογίζεται πάντα κάθετα προς το φορτίο και καθορίζεται ως συνάρτηση του φορτίου και της επιβράδυνσης μεταξύ των διατρημάτων. Γεωμετρική απόσταση διατρημάτων (S_g) είναι η απόσταση μεταξύ δύο διατρημάτων σε μία σειρά κάθετη στο φορτίο τους ενώ, η ενεργή απόσταση διατρημάτων (S_e) μετριέται κάθετα στο ενεργό φορτίο (Σχήμα 3.6).



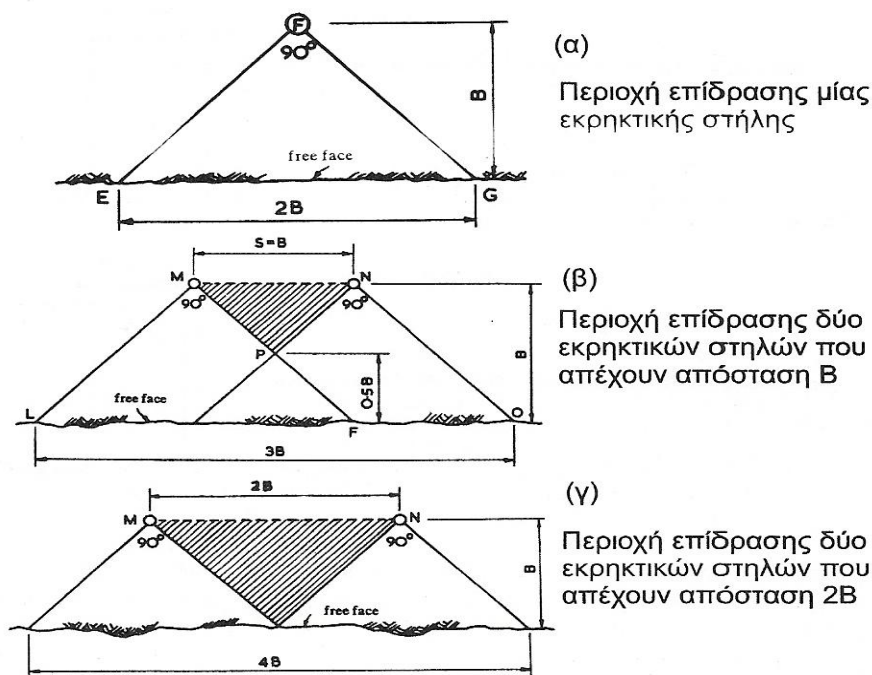
Σχήμα 3.7: Ενεργά και γεωμετρικά μεγέθη (Αγιουτάντης, 2008).

Όταν η απόσταση είναι πολύ μικρή τότε δημιουργούνται κρατήρες και το θραυσμένο πέτρωμα έχει μεγάλο κλάσμα λεπτομερών, ενώ όταν η απόσταση είναι πολύ μεγάλη τότε η τελική διαμόρφωση του μετώπου της βαθμίδας δεν είναι ομαλή (Σχήμα 3.7). Σε συνήθεις συνθήκες εξόρυξης η τιμή της απόστασης των διατρημάτων κυμαίνεται από μία έως δύο φορές την τιμή του φορτίου ($B \leq S \leq 2B$). Οι συνθήκες στην πράξη εκφράζονται με το λόγο S/B .



Σχήμα 3.8: Διαμόρφωση του μετώπου σε περιπτώσεις μεγαλύτερης και μικρότερης απόστασης μεταξύ των διατρημάτων από την απαιτούμενη (Dick et.al., 1983).

Εμπειρικά, σε περιπτώσεις σύγχρονης πυροδότησης μίας σειράς διατρημάτων εφαρμόζεται η σχεδίαση με $S=2B$, ενώ σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται επιβραδύνσεις μικρού χρόνου η σχέση κυμαίνεται από $1.2B \leq S \leq 1.8B$ (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.9: Περιοχές επίδρασης εκρηκτικών στηλών (Gregory, 1984).

Η απόσταση των διατρημάτων μπορεί επίσης να υπολογισθεί με βάση κάποιες εμπειρικές σχέσεις, μερικές από τις οποίες φαίνονται παρακάτω (Αγιουτάντης, 2009):

1. Εξίσωση του Ash: $S_e = K_s B$
2. Εξίσωση Vutukari και Bhandari: $S = 0.9B + 0.9$

όπου

S_e = η (ενεργή) απόσταση των διατρημάτων (m)

K_s = ο συντελεστής απόστασης

B = το φορτίο (m)

S = η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων (m)

3.3 Υπόγειες ανατινάξεις

Υπόγειες εκμεταλλεύσεις σε βραχομάζα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιτυχή εκτέλεση των διαδικασιών ανατίναξης. Το μέταλλευμα αποσπάται από το φυσικό περιβάλλον του και κατακερματίζεται από την πρωτογενή ανατίναξη. Η ποσότητα των εκρηκτικών που απαιτούνται ανά μονάδα όγκου του εξορυσσόμενου πετρώματος, λόγω του περιορισμού της έκρηξης, είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση των υπαίθριων εκμεταλλεύσεων. Ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών κυμαίνεται από 0.9-6kg/m³.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι εξόρυξης μεταλλεύματος των οποίων η επιλογή εξαρτάται από το πάχος των κοιτασμάτων, τη γωνία κλίσης, τα χαρακτηριστικά των μεταλλευμάτων και πετρωμάτων κλπ. Πολλά μεταλλοφόρα κοιτάσματα ορυκτών βρίσκονται σε φλέβες ή σε ανωμαλίες βραχομάζας, συχνά σε απότομη κλίση.

Οι υπόγειες ανατινάξεις είναι δυνατόν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- τις ανατινάξεις για την προχώρηση στοών, σηράγγων, κλπ., όπου η μοναδική ελεύθερη επιφάνεια είναι η επιφάνεια διάτρησης, και
- τις ανατινάξεις σε υπόγειες βαθμίδες ή θαλάμους όπου υπάρχουν μία ή περισσότερες ελεύθερες επιφάνειες επιπλέον της επιφάνειας διάτρησης των διατρημάτων.

Οι ανατινάξεις που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία σχεδιάζονται όπως οι επιφανειακές ανατινάξεις. Στη συνέχεια θα αναφερθούν θέματα που σχετίζονται με τις ανατινάξεις που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία. Σημειώνεται ότι συνήθως στις υπόγειες ανατινάξεις χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι χρόνοι επιβραδύνσεων (της τάξης των 500msec) και για λόγους ασφαλείας και για να δώσουν περισσότερο χρόνο στο πέτρωμα να μετακινηθεί (Jimeno, 1997).

3.3.1 Η αρχική κοπή

Το πιο σημαντικό τμήμα μίας υπόγειας ανατίναξης είναι η αρχική διάνοιξη (αρχική κοπή) ή προεκσκαφή (opening cut). Η βασική λειτουργία της αρχικής κοπής είναι να δημιουργήσεις ελεύθερες επιφάνειες για την βελτίωση του μηχανισμού θραύσης του πετρώματος από την ανατίναξη των υπόλοιπων διατρημάτων. Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι αρχικής διάνοιξης, όλοι είναι δυνατόν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες (Dick et.al., 1983):

- οι κοπές υπό γωνία (angled cuts)

Διακρίνονται σε πυραμιδοειδή κοπή (pyramid cut, center cut) και σε σφηνοειδή κοπή (V cut, wedge cut), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.

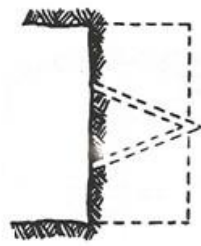
- οι παράλληλες κοπές (parallel cuts).

Οι βασικές διατάξεις των παράλληλων κοπών είναι (Σχήμα 3.10):

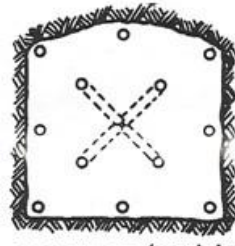
A) η κοπή τύπου burn (burn cut),

B) η κοπή τύπου burn με μεγάλο ελεύθερο διάτρημα (ή διάτρημα ανακούφισης) (large burn cut),

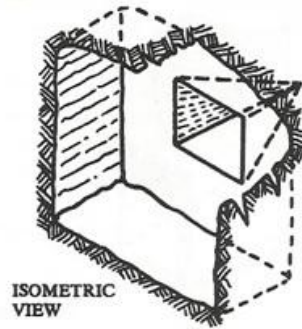
Γ) η κοπή τύπου coromant (coromant cut).



SIDE ELEVATION



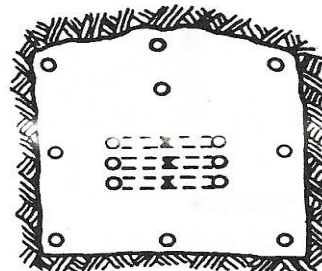
ELEVATION (easer holes not shown)



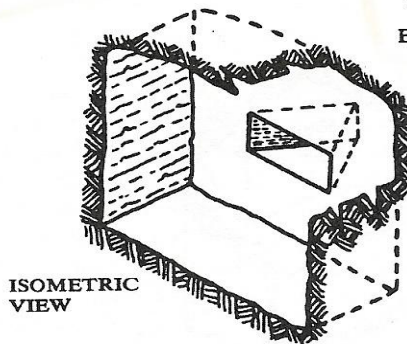
ISOMETRIC VIEW



PLAN

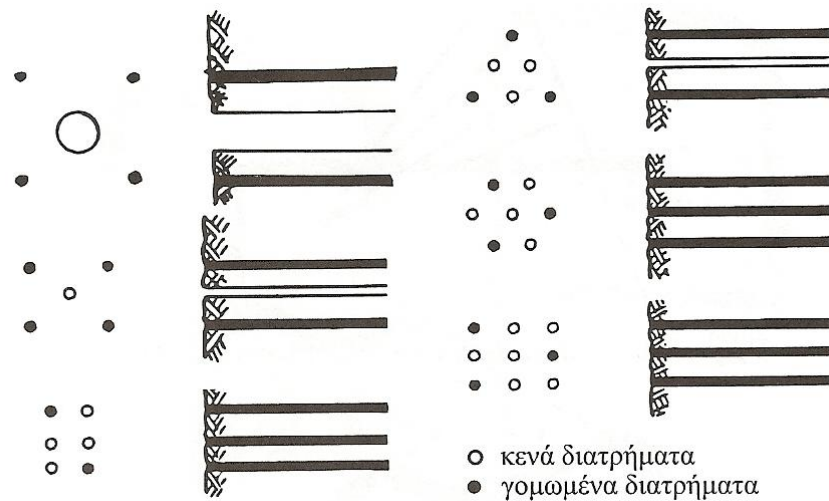


ELEVATION (easer holes not shown)



ISOMETRIC VIEW

Σχήμα 3.9: Πυραμιδοειδής κοπή (πάνω) και Σφηνοειδής κοπή (κάτω) (Gregory, 1984).



Σχήμα 3.10: Διατάξεις παράλληλων αρχικών κοπών (Bhandari, 1997).

Στις παράλληλες κοπές δημιουργούνται πρόσθετες ελεύθερες επιφάνειες από τα διατρήματα που ορύσσονται και στα οποία δεν τοποθετείται εκρηκτική γόμωση. Τα διατρήματα αυτά ονομάζονται ελεύθερα και είναι δυνατόν να έχουν είτε ίδια διάμετρο όπως τα γομωμένα είτε μεγαλύτερη διάμετρο.

Το πλεονέκτημα των κοπών με μεγαλύτερη διάμετρο ελεύθερων διατρημάτων είναι ότι προσφέρουν περισσότερες ελεύθερες επιφάνειες και μεγαλύτερο κενό ανάμεσα στο οποίο μπορεί να διογκωθεί το φορτίο των παρακείμενων διατρημάτων έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η προχώρηση εκσκαφής.

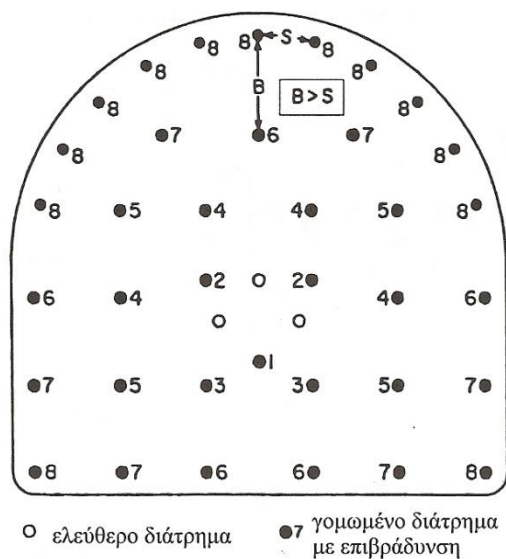
Το μειονέκτημα των κοπών που έχουν διαφορετική διάμετρο ελεύθερων διατρημάτων είναι η ανάγκη αλλαγής του κοπτικού που αφενός απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό αφετέρου καθυστερεί τη διαδικασία της διάτρησης.

3.3.2 Η κύρια ανατίναξη

Καθώς η αρχική κοπή δημιουργεί τις απαιτούμενες ελεύθερες επιφάνειες, τα υπόλοιπα διατρήματα πρέπει να είναι διατεταγμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εκτονωθούν μέσα στο κενό που δημιουργήθηκε. Για τον λόγο αυτό η διαδικασία ανατίναξης πρέπει να εξασφαλίσει τη στιγμή της έναυσης του κάθε διατρήματος μία ελεύθερη επιφάνεια παράλληλα προς αυτό.

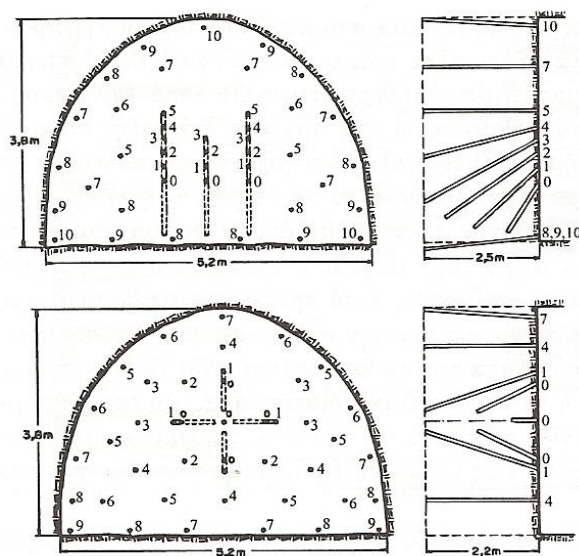
Τα διατρήματα που ακολουθούν αυτά της αρχικής διάνοιξης είναι τα ενδιάμεσα ή βοηθητικά διατρήματα (helpers) ή διατρήματα ανακούφισης (relievers). Τα υπόλοιπα διατρήματα ακολουθούν τα όσα έχουν αναπτυχθεί ήδη για τα επιφανειακά διατρήματα με την παρατήρηση ότι τα φορτία και οι αποστάσεις είναι μικρότερα από αυτές σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις (ενδεικτικά αναφέρεται ότι η διάμετρος υπόγειων διατρημάτων κυμαίνεται από 32-45mm, η οποία μπορεί να είναι και παραπάνω από 45mm ανάλογα τη μέθοδο ανατίναξης). Σε μικρά υπόγεια μέτωπα τα μεγέθη πρέπει να μειωθούν ακόμη περισσότερο καθώς ο διαθέσιμος χώρος για την εκτόνωση των διατρημάτων είναι μικρός.

Τα τελευταία διατρήματα από εκτονώνονται είναι τα διατρήματα διαμόρφωσης του ανοίγματος ή τα περιφερειακά διατρήματα (Σχήμα 3.11). Αν δεν χρησιμοποιούνται τεχνικές ελεγχόμενων ανατινάξεων για τα διατρήματα αυτά τότε η απόσταση μεταξύ τους είναι 20 με 25 φορές τη διάμετρο των διατρημάτων (Dick et al., 1983).



Σχήμα 3.11: Τυπική διάταξη διατρημάτων σε εξομαλυσμένες ανατινάξεις (Bhandari, 1997).

Τα σχήμα 3.12 παρουσιάζει τυπικές διατάξεις των διατρημάτων για κοπή υπό γωνία, ενώ το σχήμα 3.10 παρουσιάζει τυπικές διατάξεις παράλληλων κοπών.



Σχήμα 3.12: Τυπικές διατάξεις κοπών υπό γωνία (Jimeno, 1995).

3.4 Υπολογισμός φορτίου

Ως μια πρώτη προσέγγιση ο σχεδιασμός που χρησιμοποιείται στην εξόρυξη υπαίθριων εκμεταλλεύσεων μπορεί να εφαρμοστεί και σε γεωμετρίες ανατίναξης υπογείων. Η κυριότερη αλλαγή συνίσταται στην αύξηση του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικού που παρέχει τον απαιτούμενο λεπτότερη κατακερματισμό.

Στις υπόγειες ανατινάξεις, με την μέθοδο Τεσσάρων Τετραγώνων, στην περίπτωση που αντί ενός κεντρικού κενού διατρήματος αρχικής διάνοιξης χρησιμοποιηθούν n διατρήματα της ίδιας διαμέτρου με τα γομωμένα, η ισοδύναμη διάμετρος του κενού δίνεται από τη σχέση:

$$D_0' = \sqrt{n} d$$

Όπου

D_0' = η ισοδύναμη διάμετρος (mm),

n = ο αριθμός των κενών διατρημάτων αρχικής κοπής,

d = η διάμετρος γομωμένου διατρήματος (mm).

Γενικά, στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις η διάμετρος γομωμένου διατρήματος κυμαίνεται από 32-45mm. Στα ελεύθερα διατρήματα η διάμετρος μπορεί να είναι μεγαλύτερη. Για το φορτίο, όπως και στις υπαίθριες, μπορεί να ισχύει η σχέση $B=S$ με τη διαφορά ότι στη διάνοιξη σηράγγων η σχέση συνήθως γίνεται $B<S$ στα περιμετρικά διατρήματα ή στα διατρήματα οροφής και δαπέδου.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το φορτίο της αρχικής κοπής (μέθοδος τεσσάρων τετραγώνων) από τη σχέση:

$$B = 8.8 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{A q S_{ANFO}}{d C}}$$

Όπου

B = η απόσταση του κενού διατρήματος από το γομωμένο (m),

A = η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων του τετραγώνου της αρχικής κοπής (m),

q = η γραμμική πυκνότητα γόμωσης (kg/m),

S_{ANFO} = η ισχύς της εκρηκτικής στήλης κατά βάρος (συνήθως του ANFO)

d = διάμετρος του γομωμένου διατρήματος (mm).

C = συντελεστής ποιότητας πετρώματος.

Στις άλλες μεθόδους υπόγειων εκμεταλλεύσεων, ο υπολογισμός του φορτίου γίνεται από εμπειρικές σχέσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Η ενότητα αυτή περιγράφει διάφορα συστήματα ταξινόμησης των πετρωμάτων αναφέροντας τη χρησιμότητα, τις παραμέτρους καθώς και τα πεδία εφαρμογής του κάθε συστήματος. Τα συστήματα ταξινόμησης των πετρωμάτων και της βραχομάζας (rock and mass classification systems) βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στη Μηχανική Πετρωμάτων, καθώς χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τον εμπειρικό σχεδιασμό τεχνικών έργων. Τα συστήματα ταξινόμησης συνδυάζουν την εμπειρία και την παρατήρηση και πρέπει να είναι σε θέση να δώσουν μία ποιοτική ή και ποσοτική περιγραφή των φυσικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών, καθώς και των μηχανικών ιδιοτήτων ενός πετρώματος.

Η πετρολογική υφή των πετρωμάτων, η διάσθρωση τους, η ύπαρξη ασυνεχειών, η δυνατότητα παραλαβής φορτίων και το τρόπος παραμόρφωσής τους είναι μερικές από τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Η συμπεριφορά των πετρωμάτων σε δυναμικές καταπονήσεις διαφέρει σημαντικά από τη συμπεριφορά τους σε στατική φόρτιση. Καθώς ο τρόπος καταπόνησης ενός σχηματισμού εξαρτάται από τις επιτόπου συνθήκες, το είδος του τεχνικού έργου ή της φυσικής διεργασίας (π.χ. βροχόπτωση) που διαταράσσει της αρχική ισορροπία, τον ρυθμό φόρτισης, κλπ., είναι φανερό ότι μια ορθολογική αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτεί τη συσχέτιση κάθε συστήματος ταξινόμησης με το αντικείμενο εφαρμογής της, όπως την κατασκευή υπόγειων σηράγγων, την ευστάθεια πρανών, κλπ.

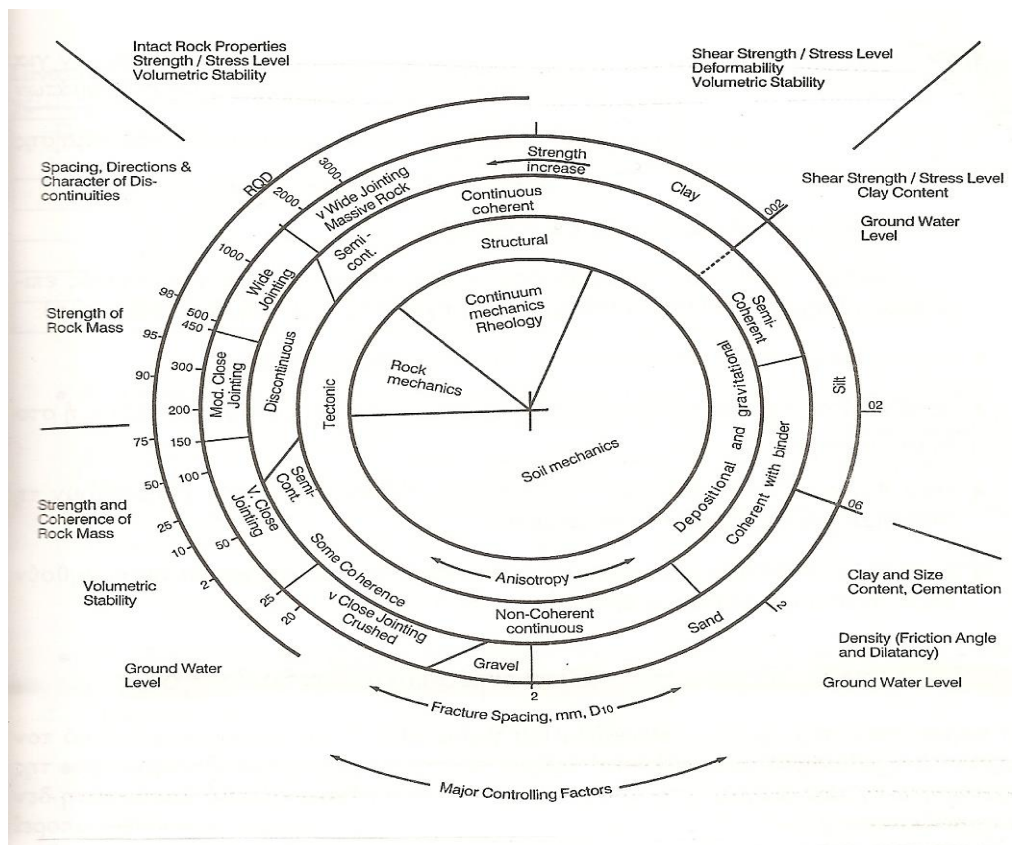
Γενικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες συστημάτων ταξινόμησης:

- τα συστήματα ταξινόμησης του ακέραιου πετρώματος
- τα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει συνοπτικά τα κύρια συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται σήμερα σε όλο τον κόσμο, ενώ στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ενοποιημένη ταξινόμηση εδαφών και πετρωμάτων κατά Deere (1969) (Αγιουτάντης, 2002).

Πίνακας 4.1: Μερικά από τα κύρια συστήματα ταξινόμησης (Αγιουτάντης, 2002).

Όνομα Συστήματος ή Κύρια Παράμετρος	Προέλευση	Εφαρμογή
Φορτία στο Πέτρωμα	Terzaghi, 1946 (ΗΠΑ)	Σήραγγες
Χρόνος Ζωής Ανοίγματος	Lauffer, 1958 (Αυστρία)	Σήραγγες
Δείκτης Ποιότητας (RQD)	Deere, 1964 (ΗΠΑ)	Γεωτρήσεις, Σήραγγες
Αντοχή Ακέραιου Πετρώματος (ΗΠΑ)	Deere και Miller, 1966 (ΗΠΑ)	Κοινή βάση συνεννόησης
Ταξινόμηση πετρωμάτων για τη Μηχανική Πετρωμάτων	Patching and Coates, 1969	Κοινή βάση συνεννόησης
Ενοποιημένη ταξινόμηση εδαφών και πετρωμάτων	Deere και άλλοι, 1969 (ΗΠΑ)	Κοινή βάση συνεννόησης
Σύστημα RSR	Wickham κ.α., 1972 (ΗΠΑ)	Σήραγγες
Γεωμηχανική Ταξινόμηση (CSIR) ή Σύστημα RMR	Bieniawski, 1973 (Ν. Αφρική και ΗΠΑ)	Σήραγγες, μεταλλεία, θεμελιώσεις
Σύστημα NGI ή Σύστημα Q	Barton κ.α., 1974 (Νορβηγία)	Σήραγγες, ανοίγματα
Αντοχή, Μέγεθος Τμημάτων Πετρώματος	Franklin, 1975 (Καναδάς)	Σήραγγες
Ενοποιημένη ταξινόμηση πετρωμάτων	Williamson, 1980	Κοινή βάση συνεννόησης
Γεωτεχνική Ταξινόμηση	ISRM, 1981 (Διεθνής)	Γενικά θέματα
Δείκτης GSI	Hoek, 1994 (Διεθνής)	Σχεδιασμός υποστήριξης
Δείκτης Βραχομάζας (RMI)	Palmström, 1995	Γενική ταξινόμηση, σχεδιασμός υποστήριξης



Σχήμα 4.1: Η ενοποιημένη ταξινόμηση εδαφών και πετρωμάτων κατά Deere (1969).

4.2 Στόχοι της ταξινόμησης των πετρωμάτων

Τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης των πετρωμάτων προσπαθούν να επιτύχουν έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω στόχους:

- να διαιρέσουν μία ορισμένη μάζα πετρώματος σε ομάδες με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά
- να βοηθήσουν στην καταπόνηση των χαρακτηριστικών ομάδων πετρωμάτων
- να εκφράσουν τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με ποσοτικούς δείκτες που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό τεχνικών έργων

- να θεσπίσουν μία κοινή βάση συνεννόησης και ανταλλαγής πληροφοριών για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων διευκολύνεται, όταν ένα σύστημα ταξινόμησης έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- είναι απλό, εύκολα κατανοητό και εύχρηστο
- χρησιμοποιεί όρους που είναι αποδεκτοί στις εφαρμοσμένες γεωλογικές επιστήμες
- συμπεριλαμβάνει τις σπουδαιότερες ιδιότητες της βραχομάζας
- βασίζεται σε παραμέτρους που μπορούν εύκολα να μετρηθούν in situ ή στο εργαστήριο
- είναι δυνατόν να αξιολογήσει τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος
- είναι δυνατόν να δώσει κατάλληλα ποσοτικά στοιχεία, για να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό τεχνικών έργων.

Γενικά, τα συστήματα ταξινόμησης σε συνδυασμό με τις αναλυτικές μεθόδους και παρατηρήσεις πεδίου παρέχουν μια ολοκληρωμένη παρουσίαση της κατάστασης του σχηματισμού, που θα επιτρέψουν την ασφαλέστερη εκτίμηση των σχεδιαστικών παραμέτρων κατά τον σχεδιασμό ενός υπόγειου έργου (Ρόζος, 2005).

4.2.1 Παράμετροι των συστημάτων ταξινόμησης

Οι παράμετροι ταξινόμησης που θα επιλεγούν από τον μηχανικό σχεδιασμού ενός τεχνικού έργου για την εκτίμηση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς μίας μάζας πετρώματος κάτω από ορισμένη εντατική κατάσταση δεν είναι προκαθορισμένες. Η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος στο πεδίο, μπορεί να αποδοθεί μέσα από μια σειρά παραμέτρων που πρέπει να αξιολογηθούν σαν σύνολο.

Οι παράμετροι αυτές πρέπει να συνδυάζουν μία ποιοτική και ποσοτική περιγραφή χαρακτηριστικών ιδιοτήτων της βραχομάζας που σχετίζονται άμεσα με τις αντίστοιχες εφαρμογές.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που εμπλέκονται στις ταξινομήσεις είναι:

1. Προσδιορισμός του RQD

Ο προσδιορισμός του RQD για τις ανάγκες των γεωμηχανικών ταξινομήσεων εφ' όσον στην περιοχή έρευνας δεν έχουν ανορυχθεί ερευνητική (-κές) γεώτρηση (-σεις) για να υπολογισθεί με τον κλασικό τρόπο, γίνεται με τη βοήθεια του τύπου του Barton: $RQD = 115 - 3,3 \cdot J_v$, όπου J_v είναι το συνολικό άθροισμα του αριθμού ασυνεχειών ανά ένα m^3 .

Η ποιότητα της βραχομάζας με βάση τις τιμές του RQD (Deere and Miller, 1966) φαίνεται στον Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Ποιότητα βραχομάζας με βάση το δείκτη RQD (Ρόζος, 2005).

RQD	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ
0-25	Πολύ πτωχή
25-50	Πτωχή
50-75	Μέτρια
75-90	Καλή
90-100	Πολύ καλή

2. Ασυνέχειες

Όλα τα πετρώματα σε υγιή κατάσταση παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή υλικού σε σύγκριση με αυτή της βραχομάζας τους (διπλάσια περίπου), καθώς η τελευταία επηρεάζεται από την παρουσία ασυνεχειών που τη διασχίζουν. Συνεπώς, στην διαδικασία αστοχίας πρανούς, πρωταρχικό ρόλο παίζει όχι η διατμητική αντοχή του αδιάρρηκτου πετρώματος αλλά η διατμητική αντοχή της βραχομάζας. Η τελευταία διαμορφώνεται από τον αριθμό, τα κύρια χαρακτηριστικά και την

αλληλοεμπλοκή των συστημάτων ασυνεχειών που διασχίζουν τη βραχομάζα. Συνεπώς, η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την εμπλοκή της στην θεμελίωση ενός τεχνικού έργου ή κατασκευής υπόγειου έργου εντός αυτής, καθορίζεται κύρια από το καθεστώς διάρρηξης που τη χαρακτηρίζει. Οι ασυνέχειες (discontinuities) συνήθως ομαδοποιούνται σε συστήματα (discontinuity sets ή joint sets), τα μέλη των οποίων έχουν λίγο πολύ κοινό προσανατολισμό, ενώ η συμπεριφορά τους σχετίζεται και με μια σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η συνέχεια (το μήκος), η απόσταση, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης, η αντοχή, η τραχύτητα των τοιχωμάτων, καθώς και οι συνθήκες του νερού. Συνεπώς είναι αναγκαία η γνώση τόσο των γεωμετρικών στοιχείων όσο και των παραμέτρων αυτών. Οι κυριότερες κατηγορίες ασυνεχειών, που μπορεί να απαντούν στα πετρώματα είναι οι ακόλουθες:

- Στρώση (bedding plane)
- Σχιστότητα (schistosity)
- Διαρρήξεις – διακλάσεις (joints)
- Ρήγματα (faults)
- Σχισμός (cleavage)
- Φύλλωση (foliation)

3. Παράμετροι ασυνεχειών

Η συμπεριφορά των ασυνεχειών σχετίζεται με μια σειρά παραμέτρων, η γνώση των οποίων είναι αναγκαία για την πλήρη κατανόηση της γεωμηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας. Οι παράμετροι αυτές δίνονται στη συνέχεια:

- Προσανατολισμός (orientation)
- Απόσταση (spacing)
- Συνέχεια (continuity)
- Άνοιγμα (aperture)
- Τραχύτητα (roughness)
- Υλικό πλήρωσης (filling)
- Αντοχή τοιχωμάτων (wall strength)
- Συνθήκες νερού (seepage)
- Βαθμός αποσάθρωσης (weathering)
- Διατμητική αντοχή ασυνέχειας (shear strength)

Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται ο χαρακτηρισμός των ασυνεχειών ανάλογα με την τραχύτητα των διεπιφανειών, καθώς και η ποιοτική περιγραφή του ανοίγματος των παρειών μίας ασυνέχειας (Ρόζος, 2005).

Πίνακας 4.3: Ποιοτική περιγραφή του ανοίγματος των παρειών μίας ασυνέχειας (Bieniawski, 1984).

Ποιοτική περιγραφή	Απόσταση των Παρειών της Ασυνέχειας
πολύ κλειστό	< 0.1 mm
κλειστό	0.1 – 0.5 mm
λίγο ανοιχτό	0.5 – 2.5 mm
ανοιχτό	2.5 – 10.0 mm
πολύ ανοιχτό	10.0 – 25.0 mm
κύρια ασυνέχεια	> 25.0 mm

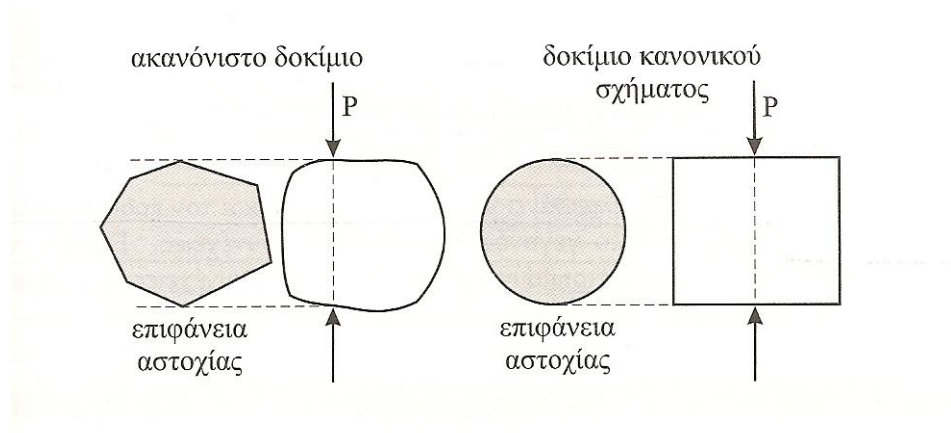
Πίνακας 4.4: Χαρακτηρισμός των ασυνεχειών ανάλογα με την τραχύτητα των διεπιφανειών και την κατάστασή τους (Bieniawski, 1984).

Ποιοτική Περιγραφή Τραχύτητας	Ποιοτική Περιγραφή Κατάστασης
πολύ τραχείες (very rough)	μη αποσαθρωμένες
τραχείες (rough)	ελαφρώς αποσαθρωμένες
ελαφρώς τραχείες (slightly rough)	μέτρια αποσαθρωμένες
λείες (smooth)	πολύ αποσαθρωμένες
εξαιρετικά λείες ή ολισθηρές (polished, slickensided)	πλήρως αποσαθρωμένες

4.2.2 Δείκτης σημειακής φόρτισης

Η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη αντιπροσωπεύει τη μέγιστη δυνατή τιμή αντοχής του ακέραιου μέσου. Συνήθως, η μέγιστη τιμή της αντοχής επί τόπου είναι αρκετά χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή για το ακέραιο πέτρωμα και για το λόγο αυτό προτείνεται η χρησιμοποίηση του δείκτη σημειακής φόρτισης (point load index) για την εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας. Ο δείκτης αυτός αποτελεί μια εμπειρική παράμετρο που μπορεί να προσδιοριστεί πολύ εύκολα, χωρίς προετοιμασία δοκιμίων. Η δοκιμή συνίσταται στη συμπίεση ενός κυλινδρικού τεμαχίου πετρώματος

(π.χ. ενός πυρήνα γεώτρησης) μεταξύ δύο αντιδιαμετρικών σημείων χρησιμοποιώντας μία μικρή φορητή συσκευή φόρτισης (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Δοκιμή δείκτη σημειακής φόρτισης.

Χρησιμοποιείται για τον έμμεσο προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής ενός πετρώματος. Η συσκευή αποτελείται από έναν υδραυλικό γρύλο και η διάταξη φόρτισης καταλήγει σε ακίδες (κωνικά άκρα) ανάμεσα στις οποίες τοποθετείται το βραχύδες δοκίμιο και το φορτίζουν μέχρι τη θραύση του. Τα δοκίμια μπορούν να τοποθετηθούν κατά τη διάμετρό τους ή η φόρτιση να γίνει παράλληλα με το μήκος (Παπαδημητρίου, 2012). Το δοκίμιο αστοχεί κατά μήκος μίας διαμέτρου του και ο δείκτης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

Όπου P είναι το μέγιστο φορτίο και D η διάμετρος του δοκιμίου.

Οι ερευνητές Broch και Franklin το 1972 βρήκαν, μετά από πειραματικές δοκιμές, ότι υπάρχει μία καλή στατιστική συσχέτιση (περίπου 80%) του δείκτη σημειακής φόρτισης με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων πετρώματος διαμέτρου 50mm που αποδίδεται με τη σχέση (Brady and Brown, 1993):

$$C_0 = 24 I_s$$

Στη συνέχεια ο Bieniawski το 1975 πρότεινε μία παρόμοια σχέση η οποία ενσωματώνει και τη διάμετρο (D) των δοκιμίων (Brady and Brown, 1993):

$$C_0 = (14 + 0.175D) I_s$$

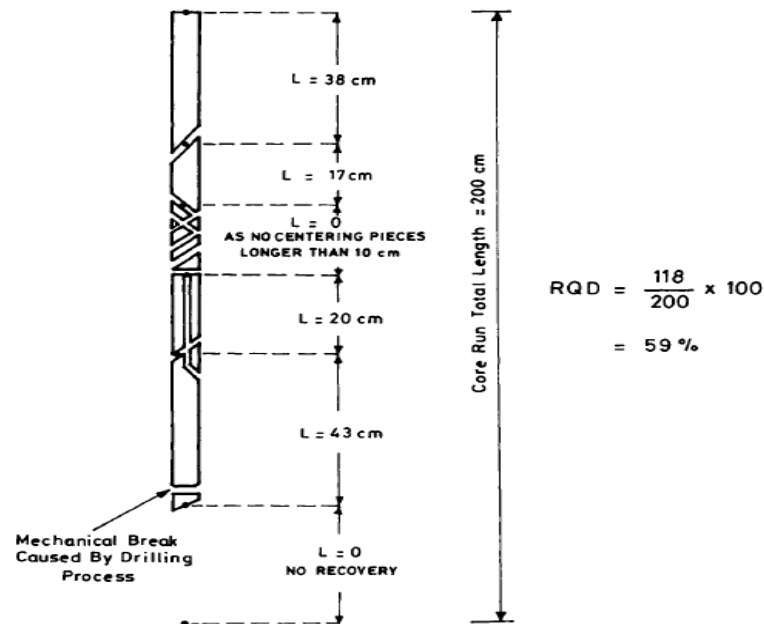
Όπου D η διάμετρος που εκφράζεται σε mm.

4.2.3 Δείκτης Ποιότητας του Πετρώματος (RQD)

Ο δείκτης ποιότητας ή κατακερματισμού του πετρώματος (RQD, Rock Quality Designation) ήταν ο πρώτος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε αρχικά, ενώ τώρα χρησιμοποιείται ευρύτατα σε συστήματα ταξινόμησης και υπολογίζεται ως εξής: σε πυρήνες δειγματοληψίας με διάμετρο μεγαλύτερη από 57mm και για ορισμένο μήκος πυρήνα, που αντιστοιχεί σε μία ενότητα ταξινόμησης, προσμετρούνται τα τμήματα που έχουν μήκος μεγαλύτερο από 100mm. Στη συνέχεια, το συνολικό μήκος ανάγεται σε ποσοστό επί του αρχικού μήκους σύμφωνα με τη σχέση:

$$RQD = \frac{\text{συνολικό μήκος τμημάτων πυρήνα} > 100mm}{\text{συνολικό μήκος πυρήνα}} \times 100$$

Δηλαδή ο δείκτης είναι τροποποιημένος, επί τοις εκατό, ώστε να περιέχει μόνο τα υγιή τμήματα πυρήνα. Η σωστή διαδικασία για τη μέτρηση RQD φαίνεται στο Σχήμα 4.3 και είναι ίσως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό του βαθμού των συνδέσεων σε πυρήνες γεωτρήσεων.



Σχήμα 4.3: Μέτρηση και υπολογισμός του δείκτη ποιότητας RQD σε πυρήνα γεώτρησης (Deere, 1989).

Σημειώνεται ότι ο δείκτης δεν λαμβάνει υπόψη του τη φύση και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, παρά μόνο το γεγονός ότι υπάρχουν ασυνέχειες. Επίσης, πολύ συχνά είναι δυνατόν να προσμετρηθούν και δευτερογενείς ασυνέχειες που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της πυρηνοληψίας σε ασθενείς σχηματισμούς.

Για τον προσδιορισμό του δείκτη, η Διεθνής Ένωση Μηχανικής Πετρωμάτων (International Society for Rock Mechanics) προτείνει την χρήση δειγμάτων διαμέτρου NX, 54.7mm, που πάρθηκαν από διπλού τύπου δειγματολήπτη.

Πίνακας 4.5: Συσχέτιση δείκτη RQD και μέτρων υποστήριξης σε σήραγγα 6m (Bieniawski, 1989).

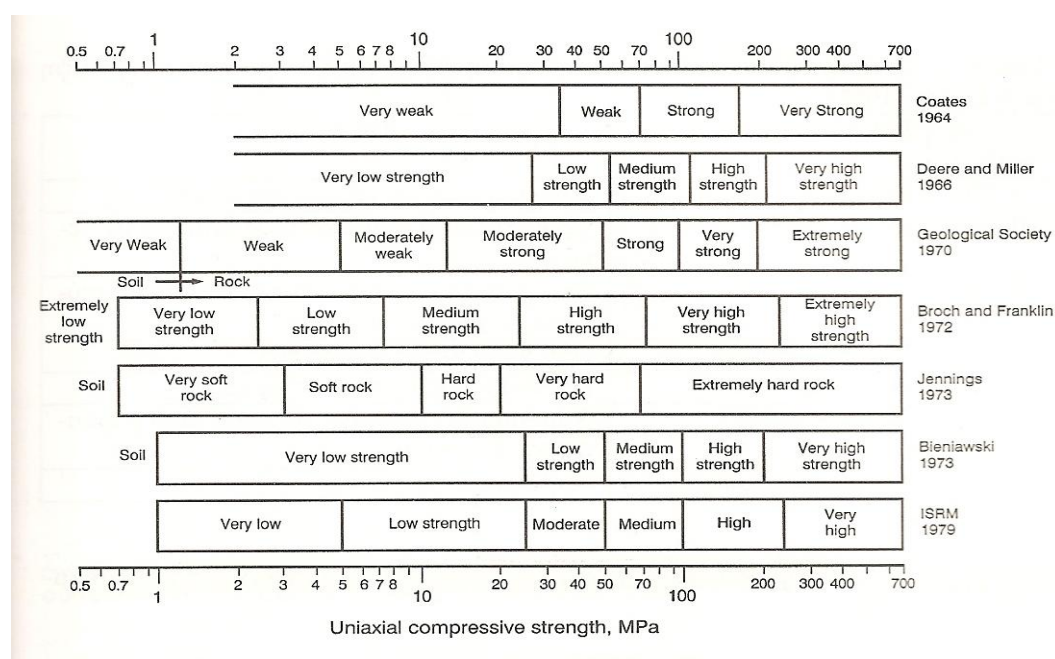
Ερευνητές	Χωρίς υποστήριξη	Απόσταση αγκυρίων	Χαλύβδινα πλαίσια
Deere et al 1970	RQD 75-100	1.5-1.8 m απόσταση για RQD 50-75	RQD 50 –75, Ελαφρά υποστήριξη 1.5 – 1.8m Απόσταση εναλλακτικά των αγκυρίων
			RQD 25 –50, ελαφρά έως μέση υποστήριξη 0.9 – 1.5m απόσταση εναλλακτικά των αγκυρίων
			RQD 0 –25, μέση έως βαριά κυλινδρικά πλαίσια με 0.6 –0.9m απόσταση
Cecil 1970	RQD 82-100	RQD 52–82, εναλλακτικά 40 –60 mm σκυροδέματος	RQD 0 –52, πλαίσια ή οπλισμένο σκυρόδεμα
Merritt 1972	RQD 72-100	1.2 –1.8m απόσταση για RQD 23 –72	RQD 0 -23

4.3 Ταξινόμηση του ακέραιου πετρώματος

Η ταξινόμηση του ακέραιου (ή συμπαγούς) πετρώματος, όπως φαίνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία, βασίζεται κυρίως στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Από τα πρώτα συστήματα που προτάθηκαν είναι αυτό των Deere και Miller το 1966, το οποίο είναι αρκετά εύχρηστο και περιγράφει με αξιοπιστία τις επί τόπου συνθήκες.

Αργότερα παρουσιάζονται άλλα συστήματα (όπως Broch και Franklin 1972, Bieniawski 1973 κλπ.), με παρόμοιες κατατάξεις του ακέραιου πετρώματος, ενώ το 1981 η Διεθνής Ένωση για τη Μηχανική των Πετρωμάτων πρότεινε μία άλλη ταξινόμηση (Πίνακας 4.6), για να συμπληρώσει αυτή των Deere και Miller για περιοχές αντοχής μικρότερες από 25MPa. Το κύριο μειονέκτημα όλων αυτών των συστημάτων είναι ότι δεν προσφέρουν ποσοτικά στοιχεία σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος επί τόπου και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό τεχνικών έργων.

Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι ότι δημιουργούν μία κοινή βάση για επικοινωνία μεταξύ των επιστημόνων σχετικά με την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων. Το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει συγκριτικά διάφορες ταξινομήσεις για ακέραιο πέτρωμα.



Σχήμα 4.4: Σύγκριση συστημάτων ταξινόμησης για ακέραιο πέτρωμα με κριτήριο την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Bieniawski, 1984).

Πίνακας 4.6: Ταξινόμηση πετρωμάτων με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κατά ISRM (1981).

Αντοχή (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή
> 250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από έναν κτύπους με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με το νύχι
0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι

4.4 Ταξινόμηση της βραχομάζας

Γενικά, έχουν προταθεί πολλά διαφορετικά συστήματα για την ταξινόμηση και αξιολόγηση του επί τόπου ή και του ακέραιου πετρώματος. Ορισμένα συστήματα, αν και αναπτύχθηκαν για να καλύψουν ανάγκες κάποιου συγκεκριμένου έργου, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη. Τα κυριότερα από τα διεθνή συστήματα ταξινόμησης περιγράφονται διεξοδικότερα παρακάτω.

Σκοπός της περιγραφής της βραχομάζας είναι η εκτίμηση των ποιοτικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της και της ταξινόμησή της με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, ώστε να είναι εφικτή η ορθή εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν τη βραχομάζα και να υποστηρίξουν την κατασκευή. Χρησιμοποιούνται πολλές και ποικίλες μέθοδοι ταξινόμησης των βραχομαζών εκ των οποίων οι πιο ευρέως διαδεδομένες είναι τρεις: 1) Η ταξινόμηση κατά Bieniawski, 2) Η ταξινόμηση κατά Barton, 3) Η ταξινόμηση κατά GSI (Tallon, 1982, Αγιουτάντης, 2002) .

4.4.1 Η γεωμηχανική ταξινόμηση, κατά Bieniawski, με τη μέθοδο RMR

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating), αναπτύχθηκε από τον Bieniawski 1972-1973 και τροποποιήθηκε τα επόμενα χρόνια καθώς μελετήθηκαν όλο και περισσότερες περιπτώσεις (Bieniawski, 1979). Σύμφωνα με τη μέθοδο RMR, οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για ταξινόμηση βραχομάζας είναι οι παρακάτω (Bieniawski, 1989):

- Αντοχή ακέραιου πετρώματος: Υπολογίζεται με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη πυρήνων δειγματοληψίας ή μέσω του δείκτη σημειακής αντοχής κατά τη σημειακή φόρτιση βραχωδών δειγμάτων χαμηλής αντοχής.
- Δείκτης RQD
- Αποστάσεις ασυνεχειών.
- Ανάπτυξη ασυνεχειών: Το αδιαίρετο μήκος των ασυνεχειών μέσα στη διατομή της σήραγγας (Deere and Deere, 1988).
- Διαχωρισμός ασυνεχειών: Η απόσταση των επιφανειών των ασυνεχειών.
- Τραχύτητα επιφανειών ασυνεχειών
- Υλικό πλήρωσης: Σκληρότητα και πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών.
- Αποσάθρωση πετρώματος στις παρειές των ασυνεχειών.
- Συνθήκες υπόγειου νερού.
- Προσανατολισμός διεύθυνσης και κλίσης ασυνεχειών και ιδιαίτερα τεκτονικών στοιχείων για την ευστάθεια της σήραγγας.

Η βαθμονόμηση των παραπάνω παραμέτρων, για την αξιολόγηση της μεθόδου RMR, δίνεται από τους επόμενους πίνακες:

Πίνακας 4.7: Επίδραση του προσανατολισμού των διακλάσεων στην ευστάθεια σηράγγων.

<i>Ανεξάρτητα από παράταξη</i>	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
0-20°	Δυσμενής
<i>Παράταξη παράλληλη στον άξονα της σήραγγας</i>	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
20-45°	Μέτρια
45-90°	Πολύ δυσμενής
<i>Παράταξη κάθετη στον άξονα της σήραγγας</i>	
Διάνοιξη σύμφωνα με την κατεύθυνση βύθισης	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
20-45°	Ευνοϊκή
45-90°	Πολύ ευνοϊκή
Διάνοιξη αντίθετα με την κατεύθυνση βύθισης	
Γωνία κλίσης	Εκτίμηση
20-45°	Δυσμενής
45-90°	Μέτρια

Πίνακας 4.8: Ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με τη γεωτεχνική ταξινόμηση κατά RMR (Bieniawski, 1976).

Τάξη βραχομάζας	Ποιότητα βραχομάζας	RMR
I	Πολύ καλή	80-100
II	Καλή	61-80
III	Μέτρια	41-60
IV	Πτωχή	21-40
V	Πολύ πτωχή	0-20

Πίνακας 4.9: Παράμετροι αντοχής βραχομάζας.

Κατηγορία ποιότητας βραχομάζας	I	II	III	IV	V
Συνοχή (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Γωνία εσωτερικής τριβής (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Το άθροισμα των τιμών των έξι αυτών παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Οι έξι παράμετροι και οι τιμές τους είναι:

1. Αντοχή του συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})

Αντοχή σ_{ci} (MPa)	Δείκτης R1
>250	15
100-250	12-15
50-100	7-12
25-50	4-7
5-25	2-4
1-5	1-2
<1	0

2. Δείκτης κατακερματισμού της βραχομάζας (RQD)

RQD (%)	Δείκτης R2
>90	20
75-90	17-20
50-75	13-17
25-50	8-13
<25	3

3. Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0.6-2	15-20
0.2-0.6	10-15
0.06-0.2	8-10
<0.06	5

4. Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών

Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες, εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

5. Παρουσία υπόγειου νερού

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Με βάση την τιμή του δείκτη RMR, η βραχομάζα κατατάσσεται στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 4.8 . Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχομάζα είναι καλής ποιότητας ($RMR > 40$). Για βραχομάζες πτωχής ποιότητας ($RMR < 40$) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.10: Εύρος πιθανών τιμών του δείκτη RMR για πτωχής ποιότητας βραχομάζες (Καββαδάς, 2005).

Παράμετρος	Τιμές	Πιθανές τιμές του δείκτη RMR
Αντοχή	<5 MPa	0, 1, 2
RQD	<25%	3
Απόσταση ασυνεχειών	<15cm	5, 8 , 9
Κατάσταση ασυνεχειών	Με υλικό πλήρωσης	0, 10
Παρουσία νερού	Υγρές-Στάγδην	4, 7
Προσανατολισμός ασυνεχειών	Αδιάφορος	-5

Από τον πίνακα 4.10 προκύπτει ότι οι πιθανές τιμές του RMR κυμαίνονται από 7 έως 26, δηλαδή 20 μονάδες. Επιπλέον, στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη RMR έχει τεράστια σημασία η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών με πιθανό εύρος τιμών 0 ή 10 εάν το πάχος του υλικού πλήρωσης είναι περισσότερο από 5mm ή λιγότερο από 5mm. Τούτο σημαίνει ότι η τιμή του RMR αλλάζει κατά 10 μονάδες (ποσοστό 50% της συνολικής τιμής) εάν το πάχος του υλικού πληρώσεως μεταβληθεί από 4.9mm σε 5.1mm. Είναι προφανές ότι η επιρροή αυτή είναι υπερβολική και μάλιστα δεδομένου ότι η εκτίμηση του πάχους του υλικού πληρώσεως των ασυνεχειών έχει σημαντική αβεβαιότητα.

Κατά τη χρήση του δείκτη RMR για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας συνιστάται ο υπολογισμός του RMR να γίνεται με άθροιση μόνον των πέντε πρώτων παραμέτρων, δηλαδή χωρίς συμμετοχή της επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου, δεδομένου ότι η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου με διαφορετικό τρόπο (Καββαδάς, 2005).

4.4.2 Η ταξινόμηση κατά Barton et al. –Q system (NGI)

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien, and Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σιράγγων που διανοίγονται με τη μέθοδο NATM (New Austrian Tunnelling Method: ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει τη διάνοιξη σιράγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής και υποστήριξη του τοιχώματος της σήραγγας με εκτοξευμένο σκυρόδεμα ή και αγκύρια βράχου) . Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

Όπου:

RQD = δείκτης κατακερματισμού της βραχομάζας

J_n = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

J_r = βαθμός τραχύτητας του χειρότερου συστήματος ασυνεχειών

J_a = βαθμός εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας

J_w = συντελεστής επίδρασης του υπόγειου νερού στις ασυνέχειες

SRF = συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος (Stress Reduction Factor).

Σημειώνεται ότι ο προσανατολισμός των ασυνεχειών λαμβάνεται έμμεσα υπόψη, καθώς οι τιμές των παραμέτρων J_r και J_a θεωρούνται για τις χειρότερες συνθήκες (Αγιουτάντης, 2002) .

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος (RQD/J_n) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν τη βραχομάζα. Ο δεύτερος λόγος (J_r/J_a) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχομάζας. Τέλος, ο τρίτος λόγος (J_w/SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχομάζα. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων συνοψίζονται στα επόμενα (Καββαδάς, 2005).

1. Συντελεστής RQD

Χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη RQD. Εάν $RQD < 10\%$, χρησιμοποιείται η συμβατική τιμή 10.

2. Συντελεστής J_n

Οικογένειες ασυνεχειών	Τιμή του J_n
Ακέραιο πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5 - 1.0
Μια οικογένεια	2
Μια οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	3
Δύο οικογένειες	4
Δύο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	6
Τρεις οικογένειες	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	12
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20

Σε περιοχές διασταύρωσης σηράγγων, η τιμή του J_n τριπλασιάζεται. Σε περιοχές στομίων, η τιμή του J_n διπλασιάζεται.

3. Συντελεστής J_r

(α) Περίπτωση βραχώμαζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Λείες ή ολισθηρές, κυματώδεις	1.5
Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες	1.5
Ομαλές επίπεδες	1.0
Ολισθηρές επίπεδες	0.5

(β) Περίπτωση βραχώμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του J_r
Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1.0
Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικιώδες υλικό σε επαρκές πάχος, ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1.0

Στην περίπτωση που η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα, η τιμή του J_r αυξάνεται κατά 1.

4. Συντελεστής J_a

(α) Περίπτωση βραχώμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Υγιή και πλήρως 'επουλωμένα' τοιχώματα	0.75
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	1.0
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (αργιλικό) υλικό πλήρωσης	2.0
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3.0
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2 mm	4.0

(β) Περίπτωση βραχύμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά	4.0
Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο πάχους έως 5 mm	6.0
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5 mm	8.0
Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5 mm. Η τιμή του J_a εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης αργίλου	8 - 12

(γ) Περίπτωση βραχύμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του J_a
Ζώνες από θρυμματισμένο ιλυσ-αμμώδες υλικό	5
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος)	6-24

5. Συντελεστής J_w

Παρουσία Υπόγειων Υδάτων	Τιμή του J_w
Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5 lt/min	1.0
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές, χωρίς υλικό πλήρωσης	0.50
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού βαθμιαίως, μειούμενη με την πάροδο του χρόνου	0.2-0.1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	0.05-0.1

6. Συντελεστής SRF

(α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχύμαζας.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)	5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)	2.5
Άφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	7.5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)	5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)	2.5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)	5

(β) Περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων.

Περίπτωση	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_1	Τιμή του SRF
Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές ασυνέχειες	>200	>13	2.5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1.0
Υψηλές τάσεις, πολύ “σφιχτή” δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-0.2
Μέτρια εκτίναξη σκληρού πετρώματος, μετά από 1 ώρα	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Έντονη “έκρηξη” και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	<2.5	<0.16	10-20

(γ) Συνθλίβον πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις λόγω πολύ υψηλών τάσεων.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	10 - 20

(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της διόγκωσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της διόγκωσης	10 - 15

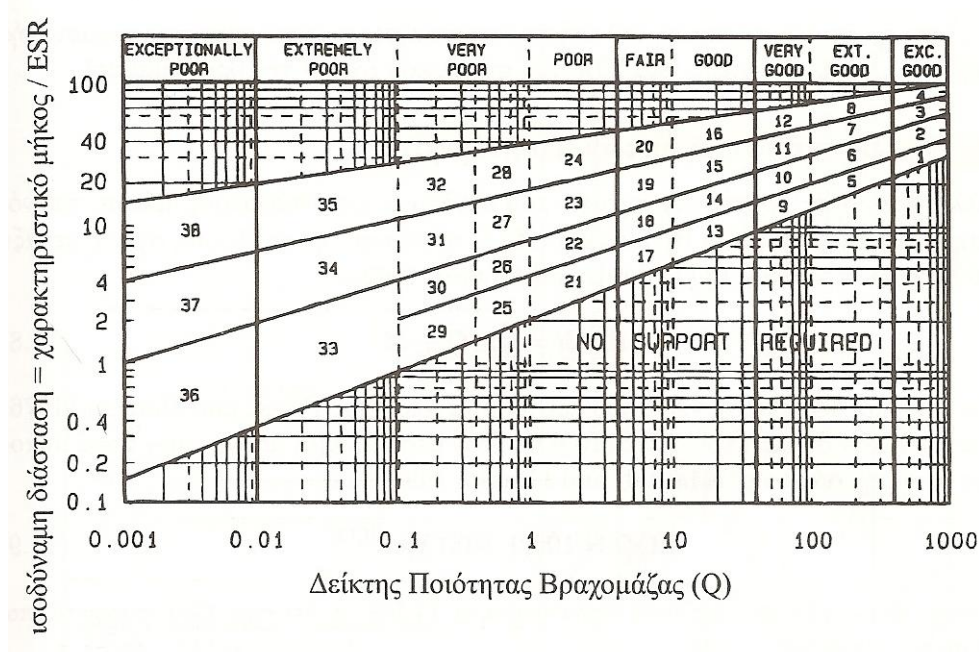
Με βάση το δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q, η βραχομάζα μπορεί να καταταγεί στις ακόλουθες κατηγορίες (Καββαδάς, 2005):

Πίνακας 4.11: Ταξινόμηση ποιότητας βραχομάζας κατά το σύστημα Q.

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Q-Ia	Εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	Πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	Πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	Καλή
4-10	Q-IIIb	Μέτρια
1-4	Q-IVa	πτωχή
0.1-1	Q-IVb	Πολύ πτωχή
0.01-0.1	Q-Va	Πάρα πολύ πτωχή
<0.01	Q-Vb	Εξαιρετικά πτωχή

Πίνακας 4.12: Χαρακτηρισμός ποιότητας βραχομάζας κατά Barton et al - Q system (Barton et al, 1974).

Q	P (kg/cm ²)	Χαρακτηρισμός ποιότητας για σήραγγες
0.001-0.01	12.0	Εξαιρετικά πτωχή
0.01-0.1	6.0	Πάρα πολύ πτωχή
0.1-1	2.25-3.0	Πολύ πτωχή
1-4	1.5	Πτωχή
4-10	1.0	Μέτρια
10-40	0.5	Καλή
40-100	0.25	Πολύ καλή
100-400	0.05	Πάρα πολύ καλή
400-1000	0.01	Εξαιρετικά καλή



Σχήμα 4.5: Σχέση ανάμεσα στον δείκτη Q και στο πλάτος του ανοίγματος (Barton et al., 1974, Mahtab and Grasso, 1992).

4.4.3 Το σύστημα GSI

Ο Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI (Geological Strength Index) σχετίζεται με την εκτίμηση της αντοχής των βραχωδών μαζών για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες κατά τις παρατηρήσεις πεδίου (Hoek and Brown, 1980). Ο χαρακτηρισμός της βραχομάζας βασίζεται στην ταξινόμηση της δομής του πετρώματος όσον αφορά τους όγκους που σχηματίζονται εξαιτίας των διακλάσεων, καθώς και την επιφανειακή κατάσταση των ασυνεχειών.

Αργότερα, με βελτιώσεις το 1998 δίνεται έμφαση σε σχετικά φτωχής ποιότητας βραχομάζες, δηλαδή με δείκτη $RMR < 40$, όπου όμως λαμβάνεται υπόψη η αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμάχων. Σημειώνεται ότι τέτοιου τύπου βραχομάζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό υπόγειων έργων (Καββαδάς, 2000). Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε, ώστε να είναι εν γένει συμβατό με το σύστημα RMR για βραχομάζες με $RMR > 40$, όπου δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχομάζες με $RMR < 40$, το σύστημα GSI

πλεονεκτεί, επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR. Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δύο παραμέτρων (Καββαδάς, 2000):

- της δομής της βραχομάζας που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών, και
- της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής τους αντοχής.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο Σχήμα 4.6. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχομάζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχομάζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχομάζας) (Αγιουτάντης, 2002).

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS	DECREASING SURFACE QUALITY →				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
 BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	80	70			N/A
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets			60	50		
 BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets				40	30	
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces					20	
 FOLIATED/LAMINATED - Folded and tectonically sheared foliated rocks. Schistosity prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness		N/A	N/A			10 5

Σχήμα 4.6: Ταξινόμησης της βραχομάζας κατά το σύστημα GSI (Καββαδάς, 2000).

Η δομή της βραχομάζας περιγράφεται καθέτως, ενώ το είδος των επιφανειών των ασυνεχειών περιγράφεται οριζοντίως.

1. Πολύ καλή ποιότητα: Μη αποσαθρωμένες επιφάνειες.
2. Καλή ποιότητα: Τραχείες ελαφρά αποσαθρωμένες επιφάνειες. Εμφανείς κηλίδες οξείδωσης.
3. Μέτρια ποιότητα: Ομαλές, μέτρια αποσαθρωμένες επιφάνειες.
4. Πτωχή ποιότητα: Επιφάνειες με λεία τοιχώματα ή έντονα αποσαθρωμένες. Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών είναι γωνιώδη θραύσματα.
5. Πολύ πτωχή ποιότητα: Επιφάνειες επικαλυμμένες με αργιλικό υλικό και λεία τοιχώματα, έντονα αποσαθρωμένες. Το υλικό πλήρωσης των ασυνεχειών είναι αργιλικό.
 - a. Τεμαχισμένη βραχομάζα: Μη διακοπτόμενη βραχομάζα αποτελούμενη από κυβικούς όγκους βράχου που σχηματίζονται από τρεις ορθογωνικές ομάδες ασυνεχειών.
 - b. Πολύ τεμαχισμένη βραχομάζα: Μερικώς διακοπτόμενη βραχομάζα αποτελούμενη από πολλαπλά στρώματα γωνιωδών βραχωδών όγκων που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες ομάδες ασυνεχειών.
 - c. Κατακερματισμένη βραχομάζα: Ρηγματωμένη και πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδεις βραχώδεις όγκους που σχηματίζονται από πλήθος ομάδων ασυνεχειών.
 - d. Εξαλλοιωμένη βραχομάζα: Τελείως κατεστραμμένη βραχομάζα με μίξη γωνιωδών και στρογγυλών βραχωδών κομματιών.
 - e. Φολιδωμένη / σχιστοποιημένη βραχομάζα: Λεπτά φολιδωμένη ή σχιστοποιημένη, τεκτονικά διατμημένα ασθενή πετρώματα. Η έντονη σχιστοποίηση υπερισχύει σε οποιαδήποτε άλλη ομάδα ασυνεχειών, έχοντας ως αποτέλεσμα την πλήρη έλλειψη τεμαχών.

Γίνεται εκτίμηση του GSI ως αποτέλεσμα συνδυασμού της τυπικής σχηματικής περιγραφής της δομής του πετρώματος με βάση την πυκνότητα των ασυνεχειών και του ποιοτικού χαρακτηρισμού του πετρώματος (Hoek, 1994). Όπως διαπιστώνεται, οι τιμές του GSI δεν είναι ακριβείς για κάθε περίπτωση, είναι όμως ενδεικτικές και δεν εισάγεται σημαντικό σφάλμα χρησιμοποιώντας (και για λόγους ασφαλείας) την μικρότερη τιμή (Hoek 1994, Chatziangelou et al 2001).

4.4.4 Συσχέτιση Δεικτών Ταξινόμησης

Πολλοί ερευνητές προτείνουν σχέσεις που συνδέουν τους διάφορους δείκτες ταξινόμησης. Για παράδειγμα, ο Bieniawski (1974) προτείνει την ακόλουθη σχέση μεταξύ των δεικτών RMR και Q (Mahtab and Grasso, 1992):

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Μια άλλη γνωστή σχέση που προτείνεται από τους Priest and Hudson (1976) είναι αυτή που συνδέει τον δείκτη RQD με το μέσο αριθμό ασυνεχειών κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης (Mahtab and Grasso, 1992):

$$RQD = 100 (1 + 0.1\lambda)e^{-0.1\lambda}$$

Επίσης, όπως ήδη αναφέρθηκε στην ενότητα 4.3.3, ο δείκτης GSI συσχετίζεται άμεσα με τον δείκτη RMR (Αγιουτάντης, 2002).

Άλλες σχέσεις που προτείνονται για να συνδέσουν τους διάφορους δείκτες ταξινόμησης είναι:

- Rutledge και Preston (1978)

$$RSR = 0.77 RMR + 12.4$$

$$RMR = 5.9 \ln Q + 43$$

- Για διαταραγμένα πετρώματα (πρανή ή εκσκαφές μετά από ανατίναξη) (Edelbro, 2003)

$$m = m_i \cdot \exp \left[\frac{RMR - 100}{14} \right]$$

$$s = \exp \left[\frac{RMR - 100}{16} \right]$$

- Για αδιατάρακτα πετρώματα (εκσκαφές με μηχανικά μέσα ή ήπια ανατίναξη) (Edelbro, 2003)

$$m = m_i \cdot \exp \left[\frac{RMR - 100}{23} \right]$$

$$s = \exp \left[\frac{RMR - 100}{9} \right]$$

- Priest και Hudson (1976)

$$RQD = 100e^{-.1\lambda}(.1\lambda + 1)$$

Όπου $\lambda = \frac{1}{\text{joint frequency}}$.

- Bieniawski (1984)

$$RMR = 9\ln Q + 44$$

- Bieniawski (1989)

$$RMR = (RSR - 12.4)/0.77$$

- Moreno Tallon (1980)

$$RMR = 5.4\ln Q + 55.2$$

- Cameron-Clarke and Budavari (Cameron-Clarke et al., 1981)

$$RMR = 5\ln Q + 60.8$$

- Abad et al. (1987)

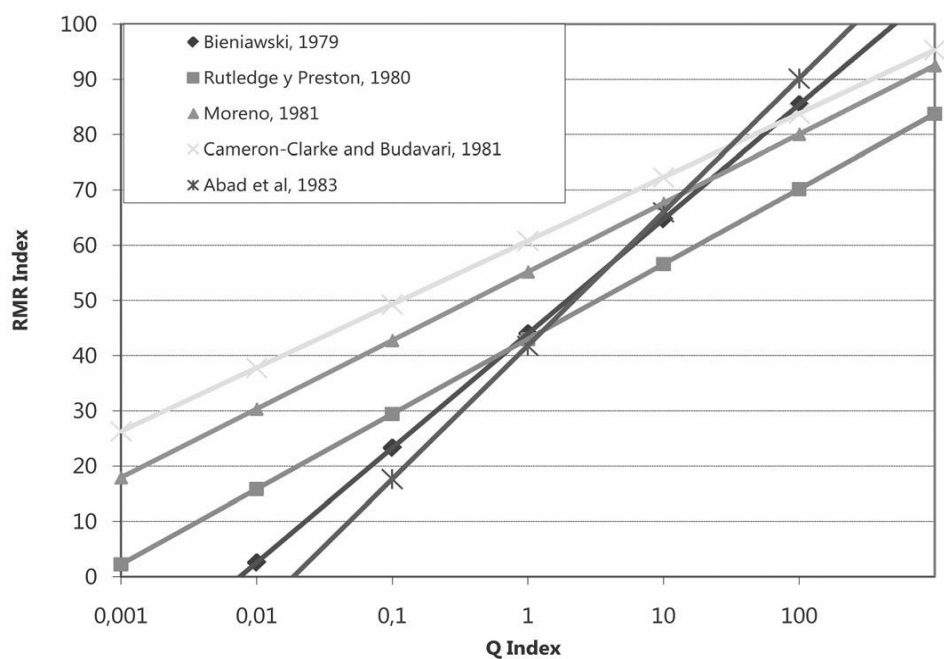
$$RMR = 10.5\ln Q + 41.8$$

Επιπλέον σχέσεις φαίνονται στον πίνακα:

Πίνακας 4.13: Συσχέτιση μεταξύ των συστημάτων ταξινόμησης (Coşar, 2004)

Originator of empirical equation	Equation
Bieniawski (1976)	$RMR = 9 \ln Q + 44$
Hoek et al. (1995)	$GSI = RMR_{76}$ (use of 1976 version of RMR) $GSI = RMR_{89} - 5$ (use of 1989 version of RMR)
Hoek et al. (1995)	$GSI = 9 \ln Q' + 44$ ($Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a}$)
Ünal (1996)	$M-RMR = 9.66 \ln Q + 37.9$

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται γραφικά οι διαφορές των σχέσεων που έχουν προταθεί από τους διάφορους συγγραφείς για τη συσχέτιση των δεικτών ταξινόμησης.



Σχήμα 4.7: Οι υπάρχουσες διαφορές των συστημάτων RMR και Q μεταξύ των προτεινομένων συσχετίσεων (Castro-Fresno et al., 2010).

4.5 Παρατηρήσεις επί των Συστημάτων Ταξινόμησης

Οι δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ταξινομήσεις βραχομάζας είναι RMR Bieniawski του (1976, 1989) και Barton et al, (1974). Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν να γίνουν κάποιες συγκρίσεις μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων. Υπάρχουν αρκετοί επιστήμονες που ασχολήθηκαν με το να τα συγκρίνουν μεταξύ τους καθώς επίσης και την εφαρμογή τους στην πράξη, αλλά στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από τα συμπεράσματα αυτών.

Και στα δύο συστήματα γίνεται καταρχή ποιοτική αξιολόγηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων μέσω πινάκων. Στη συνέχεια η αξιολόγηση αυτή βαθμολογείται ποσοτικά και από το άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών προκύπτει ένας δείκτης ποιότητας της βραχομάζας. Και οι δύο μέθοδοι περιλαμβάνουν γεωλογικές, γεωμετρικές και μηχανικές παραμέτρους οι οποίες εκτιμούνται χωριστά αλλά τελικά συντελούν στην ποσοτικοποίηση της ποιότητας της βραχομάζας. Οι ομοιότητες μεταξύ του RMR, Q και προέρχονται από τη χρήση των ίδιων ή πολύ παρόμοιων παραμέτρων για τον υπολογισμό της τελικής βαθμολογίας ποιότητας της βραχομάζας. Οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων βρίσκονται σε διαφορετικούς συντελεστές στάθμισης που παρέχουν σε ανάλογες παραμέτρους ή στις διαφορετικές παραμέτρους που χρησιμοποιούν.

Το σύστημα RMR χρησιμοποιεί άμεσα την αντοχή της βραχομάζας, ενώ το σύστημα Q σχετίζεται με την επι τόπου (in situ) τάση. Και τα δύο συστήματα ασχολούνται με τη γεωλογία και τη γεωμετρία της βραχομάζας, αλλά με ελαφρώς διαφορετικούς τρόπους. Και οι δύο θεωρούν τα υπόγεια ύδατα, και τα δύο περιλαμβάνουν κάποιο χαρακτηριστικό της αντοχής της βραχομάζας. Κάποια εκτίμηση του προσανατολισμού μπορεί να ενσωματώθηκε στο σύστημα Q με μια κατευθυντήρια γραμμή που υποβλήθηκε από Barton et al (1974): «Οι παράμετροι που J_r, J_a θα πρέπει να σχετίζονται με την επιφάνεια που είναι πιθανότερο να επιτρέψουν τη μη κίνηση. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι η έλλειψη μιας παραμέτρου που να αναφέρεται στις επιτόπου τάσεις στο σύστημα RMR» (Douglas, 2002).

Άλλες διαφορές μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων είναι:

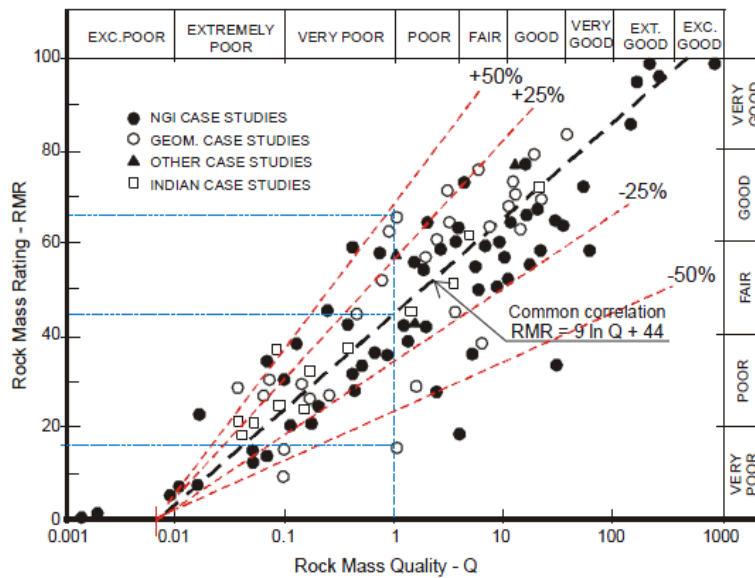
- Η υποστήριξη βρίσκεται με διάφορους τρόπους: για την ακρίβεια, το σύστημα RMR χρησιμοποιεί έναν πίνακα (4.14) για σήραγγες με άνοιγμα 10m, ενώ το σύστημα Q χρησιμοποιεί το γράφημα που περιλαμβάνει τις διαστάσεις του ανοίγματος και τον δείκτη ποιότητας Q (Σχήμα 4.5).
- Ο δείκτης Q χρησιμοποιείται για την έμμεση εκτίμηση των παραμέτρων υποστήριξης και των ιδιοτήτων της βραχομάζας.
- Οι ζώνες αδυναμίας χαρακτηρίζονται διαφορετικά στα δύο συστήματα: στο RMR δεν χρησιμοποιείται καμιά ειδική παράμετρος, ενώ στο Q εφαρμόζεται μια ταξινόμηση με βάση τη σύνθεση και το βάθος της ζώνης αδυναμίας.
- Το RMR χρησιμοποιεί μια κλίμακα 0-100 ενώ στο Q η κλίμακα εκτείνεται από 0.1 έως 10000.

Παρά τις κάποιες διαφορές μεταξύ τους, τρεις σημαντικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας που ενσωματώνονται τόσο στο RMR όσο και στο σύστημα Q, είναι ο βαθμός ρηγμάτων, οι ασυνέχειες και τις συνθήκες των υπόγειων υδάτων.

Πίνακας 4.14: Υποστήριξη που χρησιμοποιείται στο σύστημα ταξινόμησης RMR (εφαρμόζεται σε σήραγγα με 10m πλάτος) (Douglas, 2002).

Ground mass class	Excavation	Support		
		Rock bolts (20 mm diam., fully bonded)	Shotcrete	Steel sets
1. Very good rock RMR: 81-100	Full face: 3 m advance	Generally no support required except for occasional spot bolting		
2. Good rock RMR: 61-80	Full face: 1.0-1.5 m advance; Complete support 20 m from face	Locally bolts in crown, 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
3. Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench: 1.5-3 m advance in top heading; Commence support after each blast; Commence support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50-100 mm in crown, and 30 mm in sides	None
4. Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench: 1.0-1.5 m advance in top heading; Install support concurrently with excavation - 10 m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light ribs spaced 1.5 m where required
5. Very poor rock RMR < 21	Multiple drifts: 0.5-1.5 m advance in top heading; Install support concurrently with excavation; shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται άλλη μια σύγκριση μεταξύ των προαναφερθέντων συστημάτων.



Σχήμα 4.8: Συσχέτιση μεταξύ RMR και Q σύστημα με απόκλιση από την κοινή τους συσχέτιση (Jethwa et al., 1982).

Στον Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται συνοπτικά τα προαναφερθέντα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας συμπεριλαμβανομένου των χαρακτηριστικών τους, των παραμέτρων που υπεισέρχονται σ' αυτά, καθώς επίσης των εφαρμογών τους και την μεταξύ τους συσχέτιση.

Πίνακας 4.15: Συνοπτικός πίνακας Συστημάτων Ταξινόμησης της βραχομάζας.

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ – ΕΚΤΙΜΗΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ
GSI	Διακλάσεις, επιφανειακή κατάσταση ασυνεχειών.	Σταδιακή μεταβολή του δείκτη από 0-100 με βήμα 5. Εύκολη χρήση με βάση διάγραμμα όπου υπάρχουν οπτικές επιλογές. Υποκειμενικός, ο μη έμπειρος χρήστης μπορεί να καταλήξει σε λάθος συμπεράσματα. Υπάρχουν διαφορετικοί πίνακες για διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων.	Σε βραχομάζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών.	RMR
RMR	Ασυνέχειες και χαρακτηριστικά αυτών, Αποσάθρωση πετρώματος, Συνθήκες υπόγειου νερού.	Το άθροισμα των παραμέτρων δίνει την τιμή του δείκτη. Η μέθοδος μπορεί να μην είναι πρόσφορη σε ορισμένες περιπτώσεις με μικρό εύρος τιμών παραμέτρων. Οι τιμές του δείκτη μειώνονται ανάλογα με τον προσανατολισμό του τεχνικού έργου. Ένα άλλο μειονέκτημα του δείκτη είναι ότι εφαρμόζεται με κάποια δυσκολία σε πλαγίες ή έδαφος με κλίση.	Συνήθως στη διάνοιξη σηράγγων, σε θεμελιώσεις, σε ορυχεία κλπ.	RQD, Q,GSI,RSR
Q	Ασυνέχειες και χαρακτηριστικά αυτών.	Δεν λαμβάνει τιμές στο εύρος 0-100, δεν είναι υποκειμενικό σύστημα, σχετικά δύσκολα να εφαρμοστεί από χρήστες που βασίζονται σε σειρά χαρτογραφήσεων για την αξιολόγηση των ασυνεχειών. Η χρήση του συστήματος για το σχεδιασμό υποστήριξης έχει βελτιωθεί και οι μελέτη για την αρχική ανάπτυξη του έργου με βάση το Q είναι πολύ καλά τεκμηριωμένη.	Συνήθως στη διάνοιξη σηράγγων.	RQD
RQD	Ασυνέχειες (μόνο με την ύπαρξη τους).	Λαμβάνει τιμές από 0-100.	Συνήθως σε πυρήνες δειγματοληψίας.	Q

Τα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας έχουν αναπτυχθεί για συγκεκριμένους σκοπούς και τύπους βραχώδους μάζας, κατά συνέπεια, η άμεση χρησιμοποίηση αυτών των συστημάτων, για τους διάφορους τύπους βραχομάζας, δεν είναι πάντα δυνατή. Αυτό είναι πιθανώς ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους οι μελετητές εξακολουθούν να αναπτύσσουν νέα συστήματα, ή να τροποποιούν και να επεκτείνουν αυτά που ήδη υπάρχουν (Milne et al., 1998). Για παράδειγμα, η δυσκολία που αντιμετωπίζει το σύστημα RMR σε πρηνή, πλαγιές και εδάφη με κλίση, λόγω της πολυπλοκότητας της βραχομάζας, ήταν ο λόγος που μια σειρά από επιστήμονες προσπάθησαν να συσχετίσουν το σχεδιασμό πρηνών με παραμέτρους βραχομάζας.

Υπάρχουν πολλές εμπειρικές τεχνικές αξιολόγησης της βραχομάζας, εκτός από τα εν λόγω συστήματα ταξινόμησης, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό πρηνών και αναφέρονται ως διορθωτικοί συντελεστές. Όπως είναι οι παρακάτω (Douglas, 2002):

- MRMR - Mining rock mass rating (Laubscher, 1977 & 1990)
- RMS - Rock mass strength (Selby, 1980)
- SMR - Slope mass rating (Romana, 1985)
- SRMR - Slope rock mass rating (Robertson, 1988)
- M-RMR - Modified rock mass classification (Ünal, 1996)
- BQ - Index of rock mass basic quality (Lin, 1998)

Πολλές από αυτές τις μεθόδους έχουν τροποποιηθεί στη συνέχεια από τους άλλους και χρησιμοποιούνται σήμερα στην πράξη για προκαταρκτικό και τελικό σχέδιο μερικές φορές. Η πλειοψηφία των μεθόδων απαιτεί τον καθορισμό της βασικής βαθμολογίας της βραχομάζας. Η βαθμολογία συνήθως υπολογίζεται ως το άθροισμα μιας σειράς παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν το ακέραιο πέτρωμα, το μέγεθος του μπλοκ και, ενδεχομένως, των υπόγειων υδάτων (Douglas, 2002). Στον Πίνακα 4.16 φαίνεται η σύγκριση των διορθωτικών συντελεστών για τις διάφορες μεθόδους αξιολόγησης της βραχομάζας.

Πίνακας 4.16: Σύγκριση των διορθωτικών συντελεστών για τις διάφορες μεθόδους αξιολόγησης της βραχομάζας (Douglas, 2002).

	Method	RMR ₇₆	RMR ₈₉	MRMR	RMS	SMR	CSMR	M-RMR	SRMR	GSI
BASIC ROCK MASS RATING	Intact strength	0-15	0-15	0-20	5-20	0-15	0-15	0-15	0-30	0-15
	Block size	8-50	8-40	0-40	8-30	8-40	8-40	0-40	8-40	8-50
	- Spacing	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	- ROD	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Defect condition	0-25	0-30	0-40	3-14	0-30	0-30	0-30	0-30	0-25
	- Persistence	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	- Aperture	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	- Roughness	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	- Infilling	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	- Weathering	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Ground water	0-10	0-15	*	1-6	0-15	0-15	0-15	-	10
ADJUSTMENTS	Defect orientation	(60)-0	(60)-0	63-100%	5-20	(60)-0	(60)-0	(12)-(5)	-	-
	- Strike	*	*	*	*	*	*	*	-	-
	- Dip	*	*	*	*	*	*	*	-	-
	- Slope dip – defect dip	*	*	*	*	*	*	*	-	-
	Excavation method	-	-	80-100%	-	(8)-15	(8)-15	80-100%	-	-
	Weathering	-	-	30-100%	3-10	-	-	60-115%	-	-
	Induced stresses	-	-	60-120%	-	-	-	-	-	-
	Major plane of weakness	-	-	-	-	-	-	70-100%	-	-
TOTAL RANGE		(52)-100	(52)-100	0-120	25-100	(60)-115	(63)-141	(7)-105	8-100	18-100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Από μελέτες πολλών ερευνητών, λοιπόν, προέκυψε ότι οι ιδιότητες της βραχομάζας που επηρεάζουν περισσότερο το σχεδιασμό μιας ανατίναξης είναι οι εξής:

- η δυναμική αντοχή των πετρωμάτων,
- η απόσταση και προσανατολισμός των επιπέδων αδυναμίας,
- η λιθολογία και το πάχος των ιζηματογενών πετρωμάτων,
- η ταχύτητα διάδοσης κυμάτων,
- οι ελαστικές ιδιότητες βραχομάζας,
- τα είδη των υλικών επιχωμάτωσης και το πάχος των ασυνεχειών,
- οι δείκτες ανισοτροπίας και ετερογένειας βραχομάζας κλπ.

Σε ένα σύστημα ταξινόμησης οι διάφορες εμπειρικές σχέσεις μεταξύ ιδιοτήτων της βραχομάζας και της συμπεριφορά της βραχομάζας σε σχέση με ένα συγκεκριμένο τεχνικό έργο, συνδυάζονται για να δώσουν τη μέθοδο του σχεδιασμού των τεχνικών έργων μέσα ή πάνω στη βραχομάζα. Η γεωμηχανική ταξινόμηση της βραχομάζας έχει εφαρμοστεί με επιτυχία εδώ και μερικά χρόνια σε σήραγγες και υπόγειες εξορύξεις

Στην ενότητα αυτή θα γίνει προσπάθεια συσχέτισης των παραμέτρων σχεδιασμού μιας ανατίναξης (φορτίο, διάμετρος διατρήματος-εκρηκτικής στήλης, απόσταση διατρημάτων κλπ.) με την αξιολόγηση της βραχομάζας μέσω των διαφόρων συστημάτων ταξινόμησης. Σκοπός της συσχέτισης αυτής είναι να εξεταστεί α) αν υπάρχει συσχέτιση της ποιότητας της βραχομάζας με δείκτες ανατίναξης και β) αν μπορεί να γίνει πρόβλεψη των παραμέτρων ανατίναξης με βάση τους δείκτες ποιότητας της βραχομάζας.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η διεθνής βιβλιογραφία είναι εξαιρετικά περιορισμένη σε αυτά τα θέματα. Λόγω των παραπάνω ελλείψεων αλλά και του μεγαλύτερου ενδιαφέροντος, η παρούσα εργασία ασχολείται με συσχετίσεις σε υπόγειες ανατινάξεις.

5.2 Συσχέτιση παραμέτρων ανατίναξης με το σύστημα RMR

5.2.1 Εισαγωγή

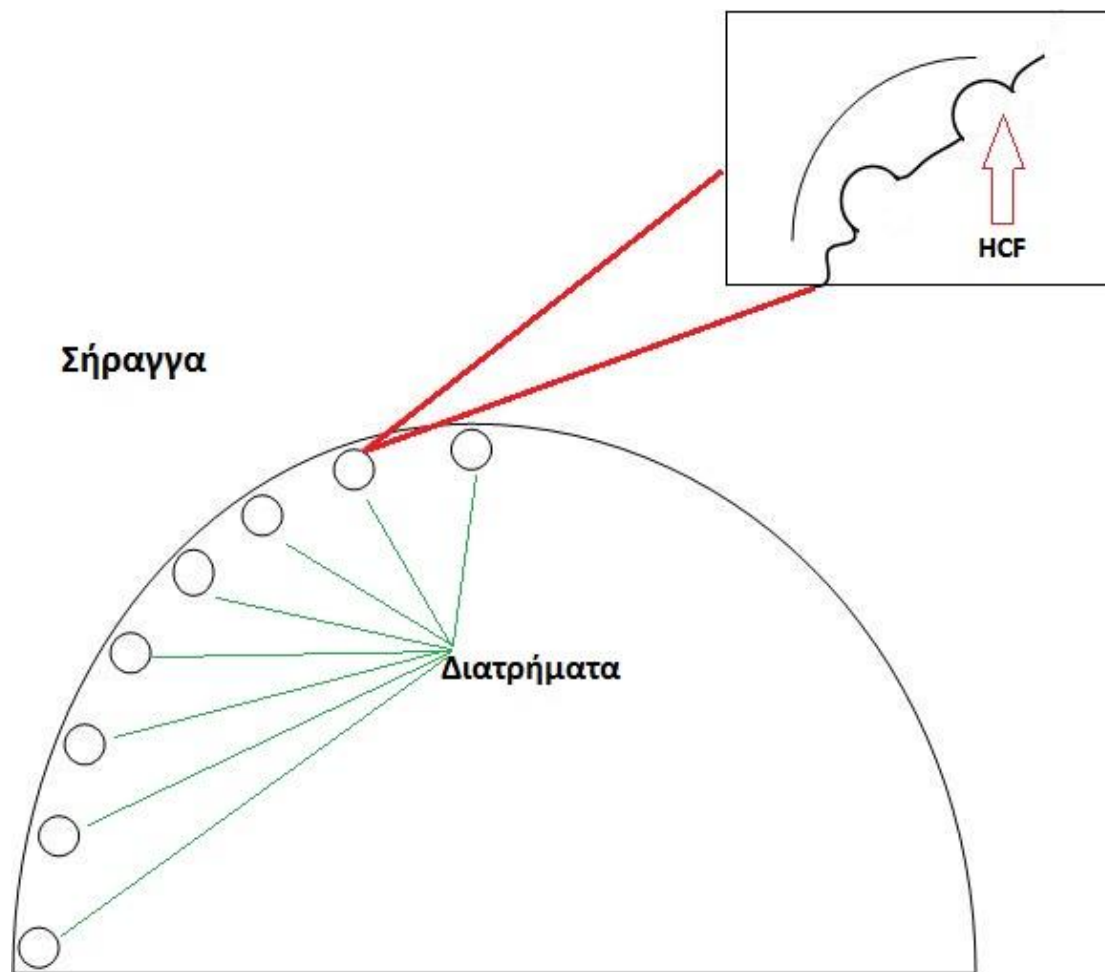
Οι παράγοντες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της ποιότητας της ανατίναξης, σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις είναι (Innaurato et al.,1998):

1. Η αναλογία ανάμεσα στην πραγματική και θεωρητική προχώρηση ανά κύκλο. Συμβολίζεται με «η» και μετριέται επί τοις εκατό (%).
2. Το λόγο του μήκους των ορατών ιχνών των διατρημάτων στην περίμετρο της σήραγγας προς το συνολικό μήκος αυτών (half cast factor). Συμβολίζεται με HCF και μετριέται επί τοις εκατό. Ο όρος αυτός θα αποδίδεται στο εξής ως ποσοστό ορατών ιχνών διατρημάτων.
3. Ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών. Συμβολίζεται με «PF» (powder factor) και οι μονάδες μέτρησής του είναι kg/m^3 .
4. Το πόσο η πραγματική διατομή διαφέρει από την θεωρητική. Αυτό αποδίδεται από τον λεγόμενο υπερθρυμματισμό (overbreak) που συμβολίζεται με OB και μετρείται είτε σε μονάδες μήκους είτε ως λόγος όπως αναπτύσσεται στη συνέχεια.

Οι δύο πρώτες παράμετροι παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα του κανάβου ανατίναξης ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση ανά κύκλο, που να είναι συμβατή με την περιοχή διατομής της σήραγγας. Ο τρίτος είναι ουσιαστικά ένας δείκτης του συνολικού κόστους της ανατίναξης από πλευράς εκρηκτικών. Αντίστοιχος δείκτης δίνεται και για την διάτρηση.

Η επάρκεια του γεωμετρικού προφίλ μετά από ανατινάξεις μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη θεωρητική και να αξιολογηθεί με βάση τις ακόλουθες παραμέτρους (Innaurato et al.,1998):

1. Την τιμή του υπερθρυμματισμού, OB (Εικόνα 5.2).
2. Το ποσοστό των ορατών ιχνών των διατρημάτων ανατίναξης (HCF) (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση του ορατού ίχνους του των διατρημάτων ανατίναξης (HCF).

Η παράμετρος OB εκφράζεται ως ο μέσος όρος πάχους (σε μέτρα ή πόδια) του υπερθρυμματισμού. Άλλοι συγγραφείς προτείνουν να εκφράσουν την παράμετρο OB ως αδιάστατο μέγεθος ή ως λόγο επί τοις εκατό. Αυτή η μέθοδος είναι προτιμητέα όταν πρέπει να αξιολογηθεί ο συνολικός οικονομικός αντίκτυπος του υπερθρυμματισμού. Ωστόσο, όταν χρειαστεί να κριθεί ένα εγγενές πλεονέκτημα του συστήματος διάτρησης και ανατίναξης ή να συγκριθεί με άλλο, η παράμετρος OB δεν οδηγεί σε μια σωστή αξιολόγηση. Πράγματι, είναι προφανές ότι για να παραμείνει εκτός ενός ορίου OB 10%, κατά την οδήγηση μια μεγάλης σήραγγας, απαιτείται πολύ μικρότερη ακρίβεια διάτρησης και ανατίναξης απ' ό,τι να διατηρηθεί το ίδιο OB (επί τοις εκατό) σε μικρότερου μήκους σήραγγα. Ο υπερθρυμματισμός μπορεί να έχει θετική ή αρνητική τιμή. Αρνητική τιμή σημαίνει ότι αφήνεται τμήμα της σήραγγας που πρέπει να εξορυχτεί και να απομακρυνθεί, ενώ θετικός υπερθρυμματισμός σημαίνει ότι η εξόρυξη έχει ξεφύγει των ορίων της σήραγγας (Εικόνα 5.3).

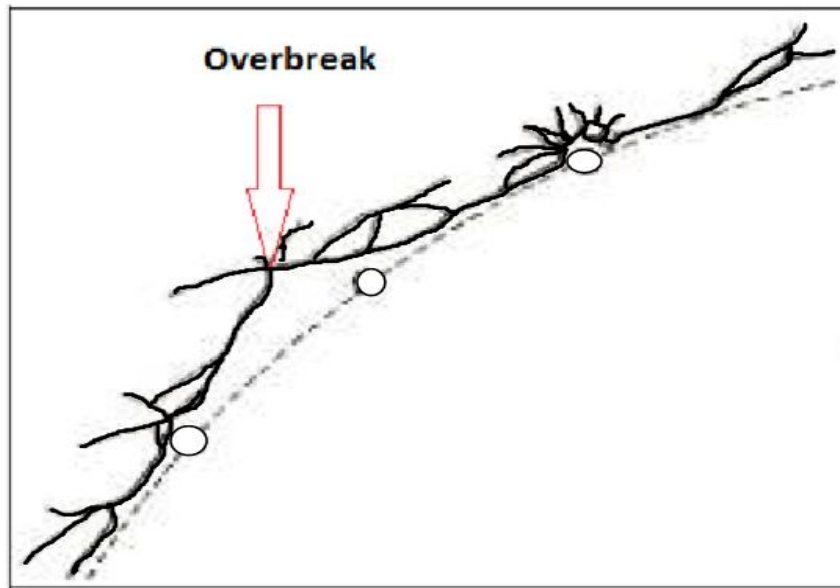
Για την κατανόηση του παράγοντα HCF δίνεται επίσης ο εξής ορισμός: Είναι ένα μέτρο μέτρησης των παραμενόντων τμημάτων των διατρημάτων. Δηλαδή μετά την ανατίναξη πρέπει το κάθε διάτρημα να αφήνει σαν ίχνος το μισό τμήμα αυτού (για αυτό το λόγο ονομάζεται και ‘half cast factor’). Ο παράγοντας αυτός δεν λαμβάνει υπ’ όψιν του τυχόν σφάλματα στην ευθυγράμμιση του διατρήματος κατά την όρυξη του. Αν το διάτρημα παρεκκλίνει από τον κάρναβο που σχεδιάστηκε, δεν πρέπει να ληφθεί υπ’ όψιν η μέτρησή του (Scoble et al., 1997). Υπολογίζεται, επίσης, με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$HCF = \frac{\sum(\text{visible blast hole lengths(after blast)})}{\sum(\text{perimeter blast hole lengths(before blast)})} \times 100$$

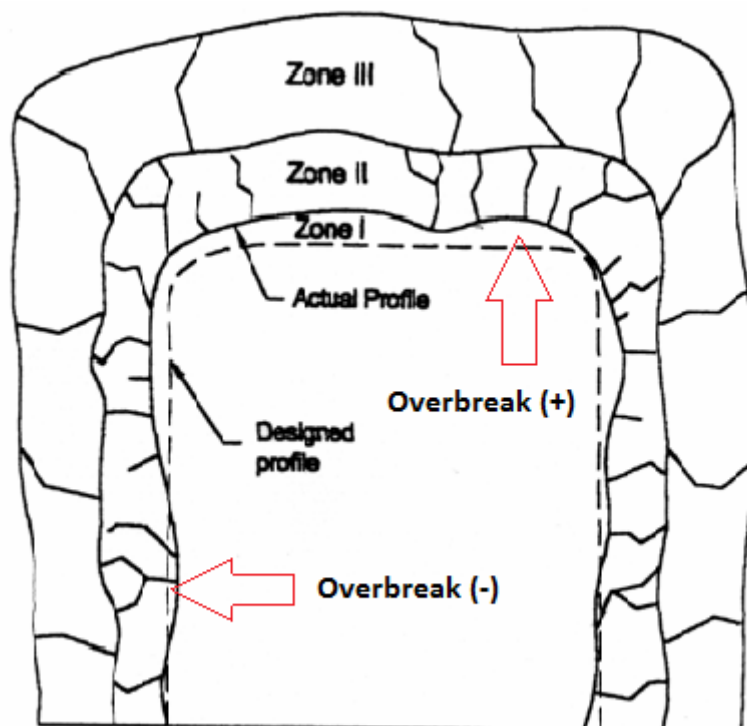
Ουσιαστικά, είναι ο λόγος του συνόλου των ορατών τμημάτων των διατρημάτων που έμειναν μετά την ανατίναξη προς το σύνολο των περιμετρικών διατρημάτων μιας σήραγγας πριν την ανατίναξη (Singh and Lamond, 1994).

Από τις Εικόνες 5.3 και 5.4 γίνεται αντιληπτή η έννοια των παραπάνω μεγεθών που ορίστηκαν, βλέποντας το αρχικό προφίλ σχεδιασμό μιας σήραγγας, το τελικό προφίλ αυτής και τον υπερθρυμματισμό (θετικός και αρνητικός).

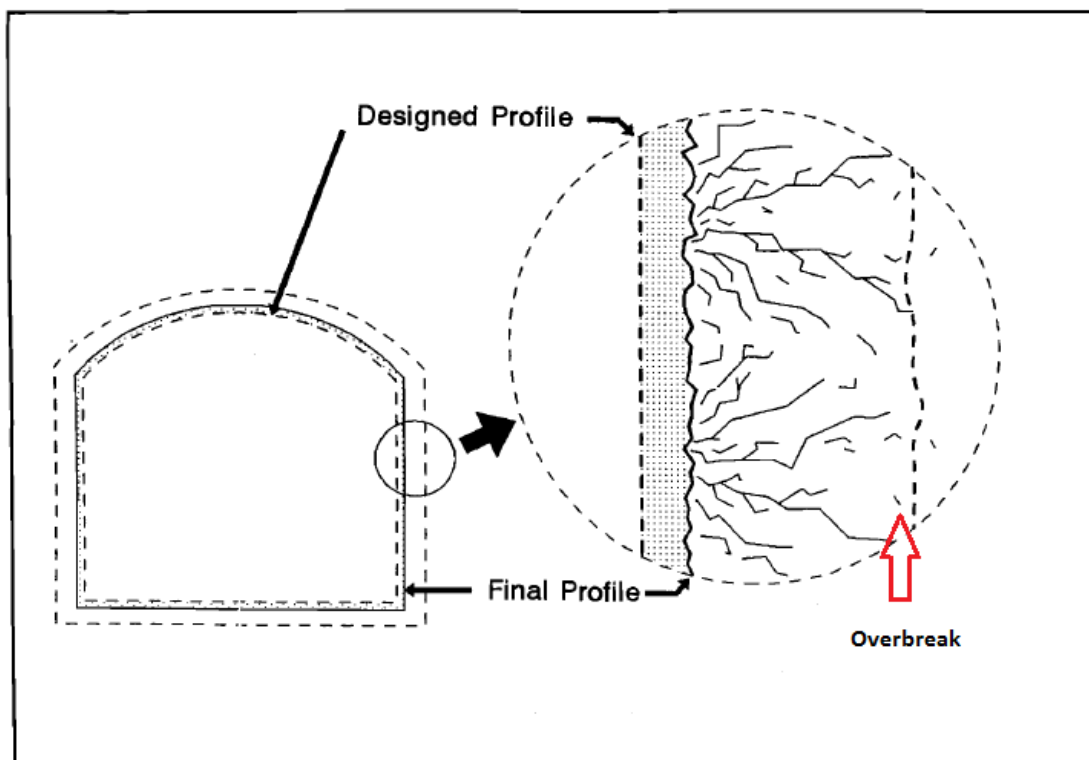
Οι παράμετροι η , OB και HCF είναι δείκτες γεωμετρικής τελειότητας. Η περίπτωση OB=0 και $\eta=1$ αντιστοιχεί σε ένα κύκλο ανατίναξης που το προφίλ σχεδιασμού ακολουθείται πιστά. Ενώ, όταν HCF=1 φαίνεται ότι η δράση του εκρηκτικού δεν επεκτείνεται πέρα από την επιφάνεια επί της οποίας βρίσκεται η περίμετρος του ανοίγματος. Ως εκ τούτου, η έκρηξη δεν αφαίρεσε περισσότερο πέτρωμα απ’ το επιθυμητό. Πράγματι, προκειμένου να επιτευχθεί ένας υψηλός δείκτης HCF, η εφελκυστική τάση που δέχονται τα πετρώματα κατά τη διάρκεια της έκρηξης δεν μπορεί να υπερβαίνει κατά πολύ την αντοχή τους. Αυτό αποτελεί προϋπόθεση για μια σωστή ανατίναξη των περιμετρικών διατρημάτων μιας σήραγγας, γεγονός που συνεπάγεται συγκριτικά χαμηλό επίπεδο τάσης στην επιφάνεια του περιγράμματος και προφανώς και πέρα από την επιφάνεια αυτή (Innaurato et al., 1998).



Εικόνα 5.2: Υπερθρυμματισμός (overbreak) σε τμήμα σήραγγας (Τσουτρέλης, 2001).



Εικόνα 5.3: Θετική και αρνητική τιμή υπερθρυμματισμού (Singh and Narendula, 2009).



Εικόνα 5.4: Αρχικό και τελικό προφίλ σχεδιασμού ανατίναξης σήραγγας (Singh and Lamond, 1994).

5.2.2 Συσχέτιση παραμέτρου η με το σύστημα ταξινόμησης RMR

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται συσχέτιση της παραμέτρου « η » με το σύστημα ταξινόμησης RMR. Οι συγγραφείς έχουν αξιοποιήσει τα δεδομένα, που δέχτηκαν από ανατινάξεις σε σήραγγες, σε τρεις κατηγορίες (Innaurato et al., 1998):

1. Περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται χειροκίνητο διατρητικό φορείο σε ανατίναξη με τη μέθοδο λείων τοιχωμάτων (smooth blasting).
2. Περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται μηχανοκίνητο διατρητικό φορείο σε ανατίναξη με τη μέθοδο μη λείων τοιχωμάτων, και
3. Περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται μηχανοκίνητο διατρητικό φορείο σε ανατίναξη με τη μέθοδο λείων τοιχωμάτων.

Η τρίτη κατηγορία δεν αξιολογείται στα παρακάτω διαγράμματα, διότι τα δεδομένα είναι πολύ λίγα έως ελάχιστα και δεν οδηγούν σε κάποιο συμπέρασμα.

Οι συνθήκες λειτουργίας όπου συλλέχθηκαν τα δεδομένα και μετρήθηκαν κυμαίνονταν από τοποθεσία σε τοποθεσία: 13 έως 17 περιπτώσεις ήταν σήραγγες ορυχείων και οι άλλες περιπτώσεις ήταν αστικές σήραγγες. Στην 1^η περίπτωση (που αφορά στις σήραγγες ορυχείων) ορύχθηκε μια πιλοτική διερευνητική σήραγγα με TBM και στη συνέχεια διευρύνθηκε πλήρως. Όλες οι σήραγγες ανήκουν στην κατηγορία των μεσαίων ή μεγάλων διατομών (δηλ., από 20 έως 90m²). Αυτό δύσκολα μπορεί να θεωρηθεί περιορισμός, διότι στις μικρές διατομές σιράγγων τα προβλήματα που δημιουργούνται από υπερθρυμματισμό είναι περιορισμένα.

Στις 11 από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις η ανατίναξη κάθε γύρου πραγματοποιήθηκε με παράλληλα διατρήματα με τα κεντρικά αγόμετα, ενώ σε 5 από αυτές τα διατρήματα συνέκλιναν μεταξύ τους. Επίσης, σε 11 περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ανατίναξης λείων τοιχωμάτων, ενώ στις υπόλοιπες 5 περιπτώσεις η διάτρηση των διατρημάτων έγινε με ηλεκτροκίνητο jumbo (διατρητικό μηχάνημα). Ο όρος «ηλεκτροκίνητο jumbo» καλύπτει δύο είδη μηχανημάτων: α) αυτά όπου ο σχεδιασμός και η πραγματική θέση διάτρησης δίνονται από τον χειριστή, ο οποίος αναλαμβάνει τη μη αυτόματη (manually) ρύθμιση της σωστής θέσης των διατρημάτων, και β) αυτά στα οποία όλες οι πράξεις εκτελούνται αυτόματα σύμφωνα με το πρόγραμμα που είναι αποθηκευμένο στο μηχάνημα. Η μηχανοκίνητη διάτρηση εγγυάται ακρίβειες εκατοστών. Το τελευταίο μειονέκτημα εμποδίζει ακόμα την ανάπτυξη των μηχανοκίνητων μηχανών στην οδήγηση σιράγγων με ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά, ορισμένες από τις περιπτώσεις που ερευνήθηκαν αναφέρονται σε σήραγγες ορυχείου που καθοδηγούνται από ηλεκτρονικό jumbo.

Η φύση της βραχομάζας των περιπτώσεων που προαναφέρθηκαν ήταν διαφορετική για κάθε σήραγγα, τόσο όσον αφορά στη λιθολογία όσο και στη θέση των ασυνεχειών που υπήρχαν. Στο εργαστήριο, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (C_0) που μετρήθηκε για τις διάφορες περιπτώσεις κυμάνθηκε από 65 έως 200MPa και η βαθμολογία του RMR από 30 έως 86, τα οποία καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα γεωλογικών και γεωτεχνικών επί τόπου συνθηκών. Παρακάτω (Πίνακας 5.1) φαίνονται οι τομείς στους οποίους είναι χωρισμένες οι σήραγγες, ο τύπος του πετρώματος, η διατομή, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η βαθμολογία RMR καθώς και οι συνθήκες των ασυνεχειών.

Πίνακας 5.1: Λεπτομέρειες των γεωλογικών παραμέτρων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τις περιπτώσεις που ερευνήθηκαν (Innaurato et al.,1998).

Tunnel (Ref.)	Rock	S	C ₀	Rock mass Rating	R _{am}	Condition of rock and joints surface
		m ²	MPa		(MPa).	
A /1/	Marble	56	65	-		
B /1/		56	65	-		
C /2/		60	65	58	2	Undulating, slightly altered
D /2/		60	65	50	1	smooth, moderately altered
E /2/		60	65	45	0.7	Smooth, altered
F /2/		60	65			
G /2/		60	65			
H /1/	Porphyritic gneiss	76.8	200	70	38	Smooth or slightly undulating withouth filling
I /1/	Chloritic Micaschist	93		30		Smooth, altered
L /1/	Phyllitic Micaschist	93	100	30	2	Smooth, withouth filling
M /3/	Calcschist	76	40-50	30	1	
N /4/	Micaschist					
Ch.337-348 m		22.2	90	55	7.4	Moderately foliated, slightly altered
348-372 m		22.2	185	86	85	Massive, good conditions
372-387 m		22.2	90	64	12	Slightly foliated, slightly altered
387-415 m		22.2	185	86	85	Massive, good conditions
415-448 m		22.2	185	62	22	Moderately fractured, altered
448-537 m		22.2	90	64	12	Slightly foliated, slightly altered

Οι σήραγγες χαρακτηρίζονται από:

- Χαμηλό ή μεσαίο φορτίο υπερκειμένων.
- Οι σήραγγες A-G αφορούν σ' ένα υπόγειο ορυχείο που εκμεταλλεύεται λευκό μάρμαρο για το χημικά καθαρό ανθρακικό ασβέστιο. Το μάρμαρο εμφανίζεται ομοιογενές και σε στρώσεις.
- Οι σήραγγες H-M είναι οδικές. Συγκεκριμένα η σήραγγα I ορύχθηκε με ένα πιλοτικό διερευνητικό άνοιγμα με TBM το οποίο στη συνέχεια διευρύνθηκε σε πλήρη διατομή με τη χρήση χρήση συμβατικής μεθόδου (εκρηκτικά).

- Η περίπτωση N αφορά σ' ένα ορυχείο τάλκη.
- Οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ζελατοδυναμίτιδα για την αρχική κοπή, γαλάκτωμα (Gelatina i και Tutagex) για τα διατρήματα γύρω από την αρχική κοπή και Profilx ή Emuldin (γαλακτώματα) για τα διατρήματα του περιγράμματος.

Το μέγεθος R_{am} που δίνεται στον παραπάνω πίνακα καλείται ως «αντίσταση της βραχομάζας» και δίνεται από τη σχέση (Innaurato et al.,1998):

$$R_{am} = C_0 \sqrt{s}$$

Όπου

- $s = e^{(RMR-100)/6}$ στην περίπτωση μη ελεγχόμενων ανατινάξεων και
- $s = e^{(RMR-100)/9}$ στην περίπτωση ελεγχόμενων ανατινάξεων.

Με τη βοήθεια του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown (Innaurato et al.,1998):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m C_0 \sigma_3 + s C_0^2)}$$

Όπου σ_1 και σ_3 είναι η μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση, C_0 η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου βράχου, ενώ οι m και s είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες των πετρωμάτων και το βαθμό θρυμματισμού τους.

Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται η τάση τιμών της παραμέτρου «η» συναρτήσει του συστήματος RMR για την περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται χειροκίνητο jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων (smooth blasting), ενώ στο διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται η 2^η περίπτωση που προαναφέρθηκε. Τα δεδομένα προέκυψαν από τους Πίνακες 5.1 και 5.2 που φαίνονται παρακάτω. Ο Πίνακας 5.1 αναφέρεται στην περίπτωση 1, ενώ ο Πίνακας 5.2 στην περίπτωση 2 (Innaurato et al., 1998).

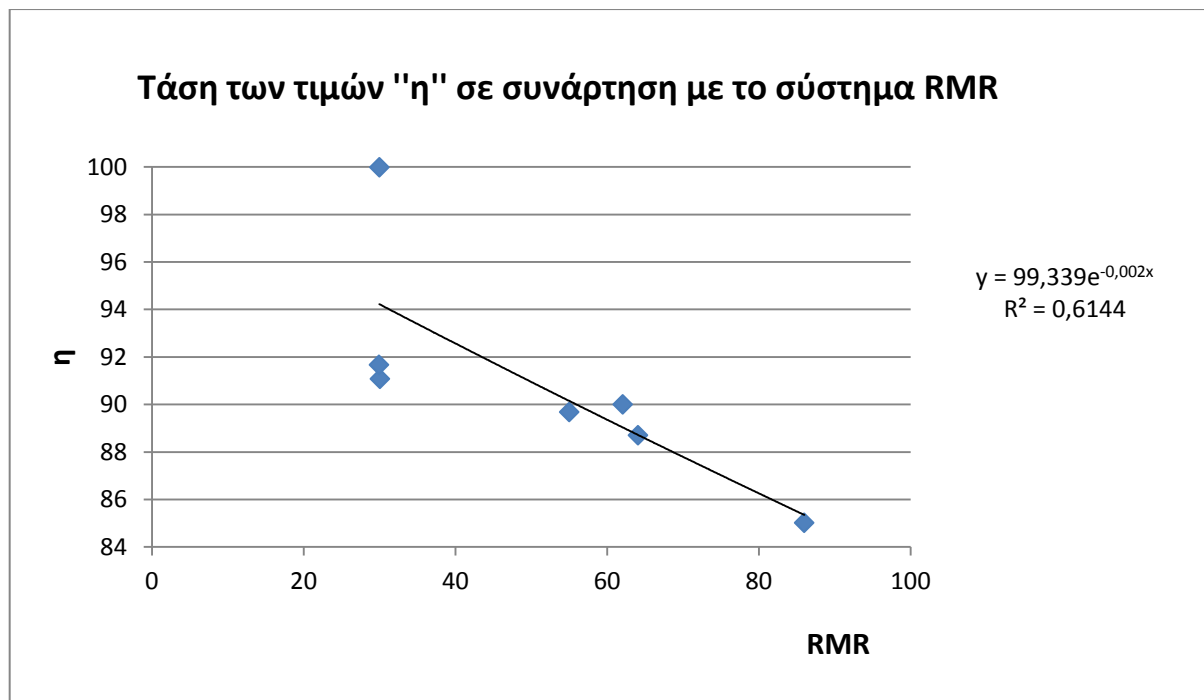
Πίνακας 5.1: Παράμετρος «η» συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται χειροκίνητο jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων(ελεγχόμενη) (Innaurato et al., 1998).

Παράμετρος «η»	Σύστημα RMR
91,1	30,1
91,7	29,9
99,9	29,9
89,7	55,0
90,0	62,1
88,7	64,1
85,0	85,9

Πίνακας 5.2: Παράμετρος «η» συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μηχανοκίνητο jumbo σε με ελεγχόμενη ανατίναξη (Innaurato et al., 1998).

Παράμετρος «η»	Σύστημα RMR
87,0	45,0
99,0	50,0
98,0	58,1

Στους παρακάτω πίνακες δίνεται, βάση στατιστικής ανάλυσης, το μέγεθος της σημαντικότητας (F), που είναι η πιθανότητα λάθους στα δεδομένα. Το μέγεθος αυτό πρέπει να λαμβάνει τιμές μικρότερες από 5% (0,05). Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα είναι συγκεκριμένα και ομαδοποιημένα σε δύο κατηγορίες χωρίς να γίνεται γνωστό αν λαμβάνονται υπ' όψιν άλλοι παράμετροι στον υπολογισμό τους. Επίσης δεν κατηγοριοποιούνται με βάση γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, το οποίο θα βοηθούσε περισσότερο στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

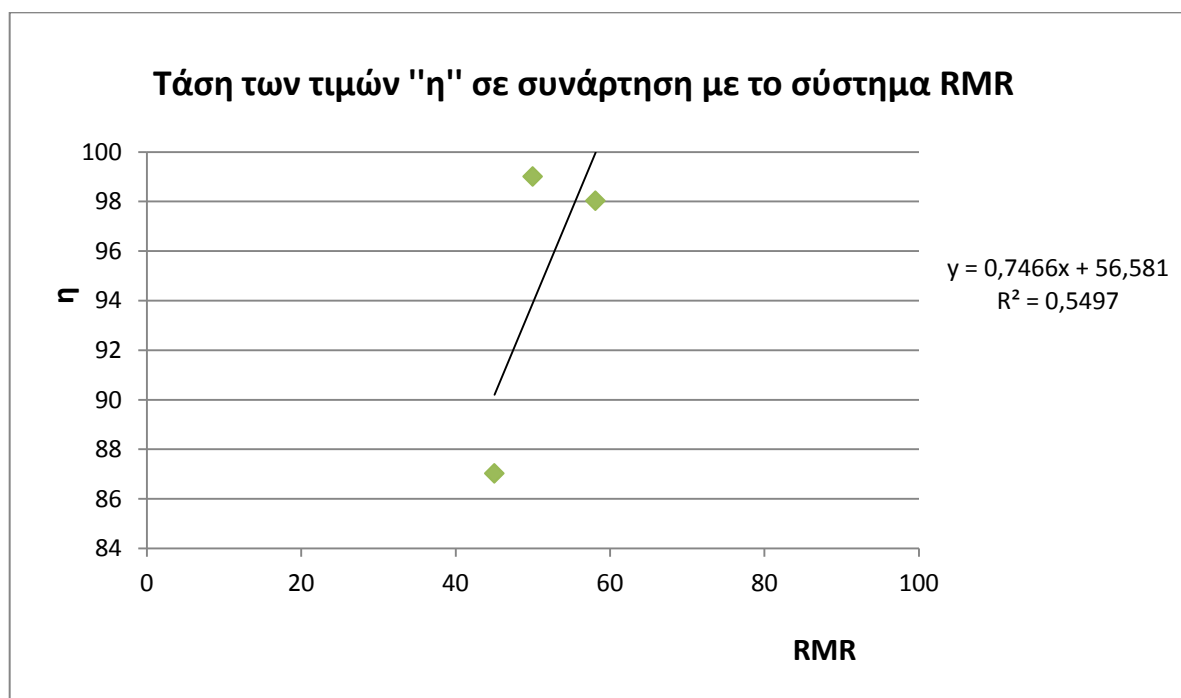


Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση τάσης τιμών παραμέτρου «η» συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, για την περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων(ελεγχόμενη).

Από το διάγραμμα 5.1 παρατηρείται, αρχικά, ότι η παράμετρος «η» λαμβάνει σαν ελάχιστη τιμή της το 84. Η μέγιστη τιμή της δεν ξεπερνά το 100, διότι εξ ορισμού ο λόγος θεωρητικής προς πραγματικής προχώρησης μπορεί να λάβει την τιμή μέχρι 1 ή 100% (αν δίνεται σε ποσοστό). Αυτή είναι και η μέγιστη τεχνικά αποδεκτή τιμή ακόμα και στην περίπτωση καλύτερης ποιότητας βραχομάζας.

Παρατηρείται επίσης μια φθίνουσα εκθετική σχέση ανάμεσα στα μεγέθη «η» και RMR. Αυτό συνεπάγεται ότι, για καλύτερης ποιότητας πετρώματα η παράμετρος «η» μειώνεται. Δηλαδή τα σκληρά πετρώματα είναι πιο δύσκολο να ανατιναχθούν απ' ό,τι τα μαλακά, το οποίο είναι αναμενόμενο λαμβάνοντας υπ' όψιν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ο συντελεστής συσχέτισης των δύο μεγεθών υπολογίστηκε 0,61 περίπου, το οποίο σημαίνει ότι η συσχέτιση μεταξύ τους είναι ικανοποιητική και αλλά υπάρχει περιθώριο για βελτίωση. Θα μπορούσε να αλλάξει αν δίνονταν παραπάνω δεδομένα και παράμετροι που να αφορούσαν στον τύπο πετρώματος, στις μηχανικές ιδιότητες του κλπ. Από τη στατιστική ανάλυση που έγινε για το παραπάνω διάγραμμα, η σημαντικότητα (F) είναι 0,04. Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή ($0,04 < 0,05$).



Διάγραμμα 5.2: Συσχέτιση τάσης τιμών παραμέτρου «η» συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, για την περίπτωση μηχανοκίνητου jumbo σε μη ελεγχόμενη ανατίναξη.

Ομοίως παρατηρείται, αρχικά, ότι η παράμετρος «η» λαμβάνει σαν ελάχιστη τιμή της το 84. Για τιμές μικρότερες της ελάχιστης, εξ ορισμού της παραμέτρου «η», η θεωρητική προχώρηση αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική το οποίο σημαίνει ότι η προχώρηση του μετώπου καθυστερεί σε σχέση με την προβλεπόμενη θεωρητική τιμή της που έχει καθοριστεί. Για τιμές πάνω από την ελάχιστη, η πραγματική προχώρηση είναι μεγαλύτερη της θεωρητικής που είναι το επιθυμητό.

Στο Διάγραμμα 5.2 παρατηρείται επίσης μια γραμμική σχέση μεταξύ των μεγεθών με συντελεστή συσχέτισης 0,55 περίπου και σημαντικότητα (F) 0,5. Αυτό συμβαίνει διότι τα δεδομένα είναι ελλιπή και αφορούν σε μια συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση των ερευνητών. Θα μπορούσε βεβαίως ο συντελεστής συσχέτισης να βελτιωθεί σε πραγματικές συνθήκες και με δεδομένα που να σχετίζονται με όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχέδιο ανατίναξης.

Τέλος, μπορεί να σημειωθεί ότι με βάση τις κατηγορίες στις οποίες είναι καταναμημένα τα δεδομένα επιτυγχάνεται καλύτερη συσχέτιση στην περίπτωση

χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων απ' ότι με μηχανοκίνητο jumbo. Αυτό βέβαια το συμπέρασμα μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικό λόγω των λιγοστών δεδομένων.

5.2.3 Συσχέτιση παραμέτρου OB με το σύστημα ταξινόμησης RMR

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι συσχετίσεις της παραμέτρου του υπερθρυμματισμού συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, για τις δύο κατηγορίες στις οποίες έχουν ομαδοποιηθεί τα δεδομένα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

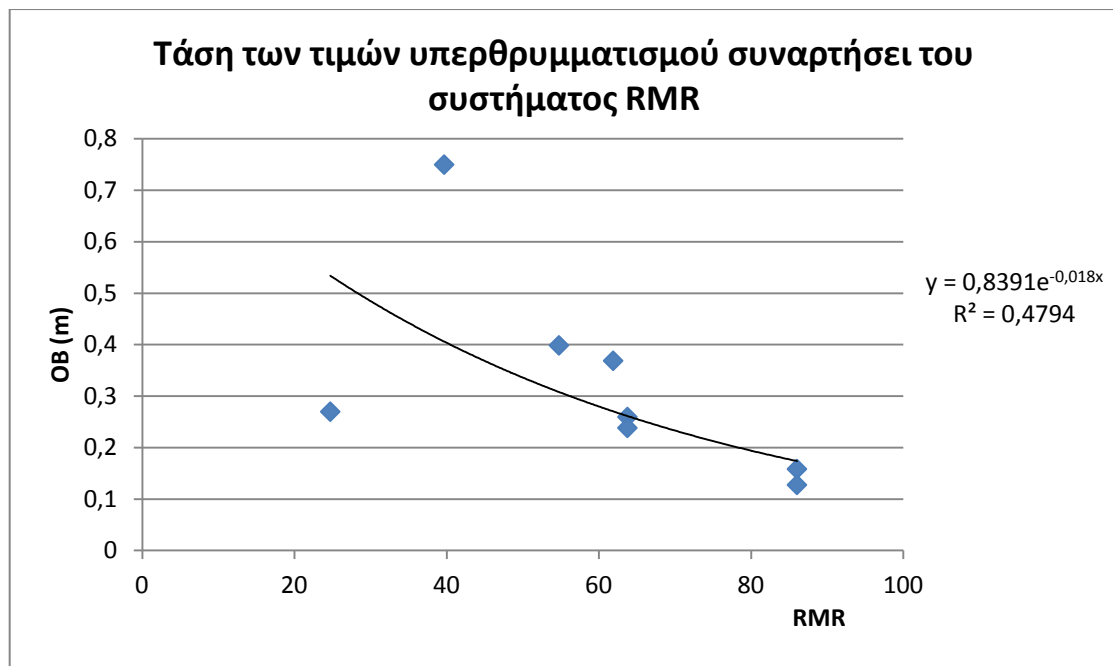
Τα δεδομένα βρίσκονται στους Πίνακες 5.3 και 5.4, αντίστοιχα, όπου έχουν γίνει και οι μετατροπές της αντίστασης της βραχομάζας R_{am} στο σύστημα RMR με τη σχέση που αναφέρεται στην παράγραφο 5.2.2 (Innaurato et al., 1998). Δηλαδή:

$$R_{am} = C_0 \sqrt{s}$$

Όπου $s = e^{(RMR-100)/9}$ (περίπτωση ελεγχόμενων ανατινάξεων).

Πίνακας 5.3: Παράμετρος «OB» συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, στην περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων(ελεγχόμενη) (Innaurato et al., 1998).

OB (m)	R_{am}	C_0 (Mpa)	s	RMR
0,3	0,9	65,0	0,000233	24,7
0,7	2,0	58,0	0,001229	39,7
0,4	7,3	90,0	0,006567	54,8
0,2	12,0	90,0	0,017844	63,8
0,2	12,0	90,0	0,017829	63,7
0,4	22,3	185,0	0,014487	61,9
0,1	85,2	185,0	0,211898	86,0
0,1	85,1	185,0	0,211863	86,0



Διάγραμμα 5.3: Συσχέτιση τιμών υπερθρυμματισμού σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR, για την περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων(ελεγχόμενη).

Στο διάγραμμα αυτό, παρατηρείται μια φθίνουσα εκθετική σχέση μεταξύ των μεγεθών του υπερθρυμματισμού και του συστήματος RMR. Το οποίο σημαίνει ότι όσο καλύτερης ποιότητας είναι το πέτρωμα τόσο μειώνεται ο υπερθρυμματισμός του μετά την ανατίναξη. Δηλαδή η ανατίναξη γίνεται χωρίς δυσμενείς συνέπειες (εκτόξευση τεμάχων στον αέρα κλπ.), το πέτρωμα σπάζει όσο πιο κοντά στο επιθυμητό μέγεθος και επίσης δεν αφήνεται τμήμα αυτού που να μην έχει ανατιναχθεί.

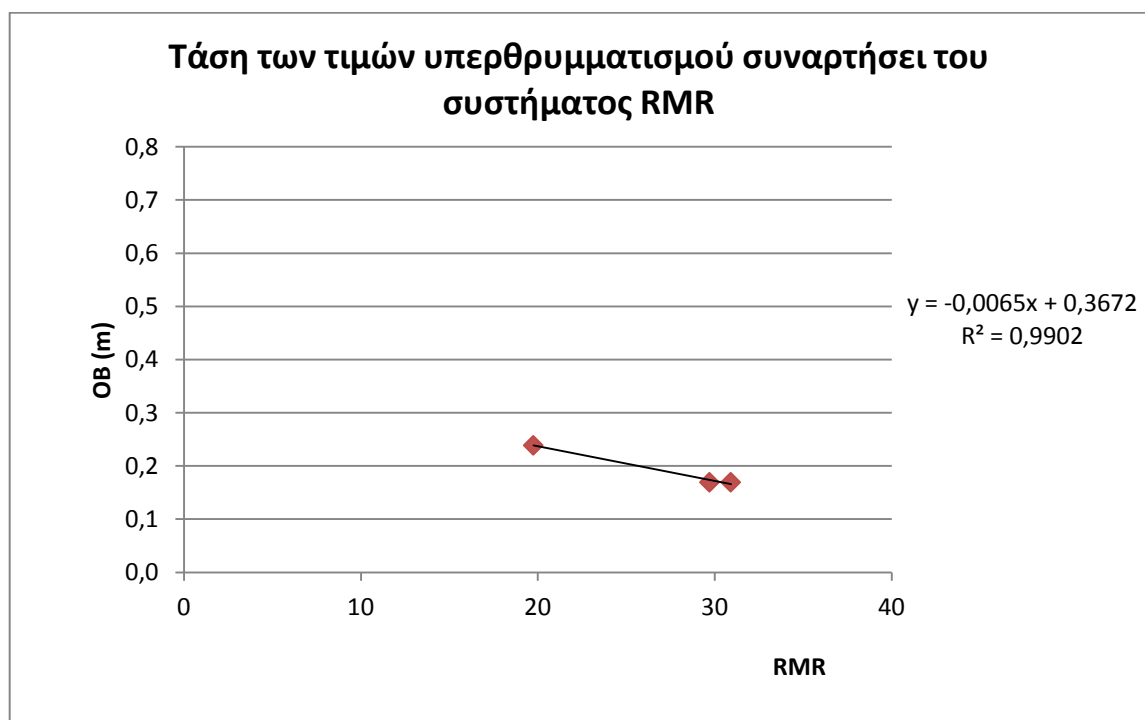
Ο συντελεστής συσχέτισης είναι 0,48 περίπου, ο οποίος είναι χαμηλός και η σημαντικότητα (F) 0,09 που δεν είναι αποδεκτή τιμή. Θα μπορούσε σαφώς να βελτιωθεί λαμβάνοντας περισσότερες μετρήσεις και κατηγοριοποιώντας ίσως τα δεδομένα με διαφορετικό τρόπο. Άλλος ένας τρόπος βελτίωσης της παραμέτρου του υπερθρυμματισμού είναι η τοποθέτηση των διατρημάτων πιο κοντά στο μέτωπο, με το σωστότερο τρόπο.

Από το διάγραμμα εξάγεται επίσης το συμπέρασμα ότι η τεχνικά αποδεκτή τιμή της παραμέτρου του υπερθρυμματισμού δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 0,8m διότι από εκεί και πέρα η ανατίναξη του πετρώματος δεν έχει γίνει σωστά ή το πέτρωμα μπορεί να αποτελείται από επίπεδα ασυνεχειών, τα οποία δεν έχουν μελετηθεί και επιφέρουν

προβλήματα στην ανατίναξη του. Ακόμα, ο υπερθρυμματισμός δεν μπορεί να πάρει την τιμή μηδέν καθώς δεν είναι αποδεκτή, το οποίο σημαίνει ότι δεν πραγματοποιήθηκε ανατίναξη του πετρώματος.

Πίνακας 5.4: Παράμετρος «OB» συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR, στην περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε μη ελεγχόμενη ανατίναξη.

OB (m)	R _{am}	C ₀ (MPa)	s	RMR
0,2	0,7	65	0,000134187	19,7
0,7	0,9	45	0,000463709	30,9
0,2	2,0	100	0,000405688	29,7



Διάγραμμα 5.4: Συσχέτιση τιμών υπερθρυμματισμού σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR, για την περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε μη ελεγχόμενη ανατίναξη.

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται φθίνουσα γραμμική σχέση μεταξύ των μεγεθών, με συντελεστή συσχέτισης τους περίπου 1. Όπως φαίνεται, λοιπόν, για καλύτερης ποιότητας βραχομάζα η παράμετρος του υπερθρυμματισμού μειώνεται.

Η γραμμική όμως αυτή σχέση δεν είναι αντιπροσωπευτική λόγω έλλειψης στοιχείων και δεδομένων, το οποίο διαπιστώνεται και από τη σημαντικότητα που πήρε την τιμή 0,4 (μη αποδεκτή). Επίσης, η συσχέτιση είναι καλύτερη στην περίπτωση ανατίναξης μη λείων τοιχωμάτων απ’ ότι αυτής των λείων τοιχωμάτων.

Παρατηρείται ακόμα ότι στην περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε μη ελεγχόμενη ανατίναξη η ποιότητα του πετρώματος είναι μέτρια έως πτωχή. Αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις και τα δεδομένα αφορούν συγκεκριμένη περιοχή πτωχής ποιότητας βραχομάζας, το οποίο δεν μας παρέχει γνώσεις για όλη την περιοχή μελέτης και δεν αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα για ένα γενικό συμπέρασμα.

5.2.4 Συσχέτιση παραμέτρου HCF με το σύστημα ταξινόμησης RMR

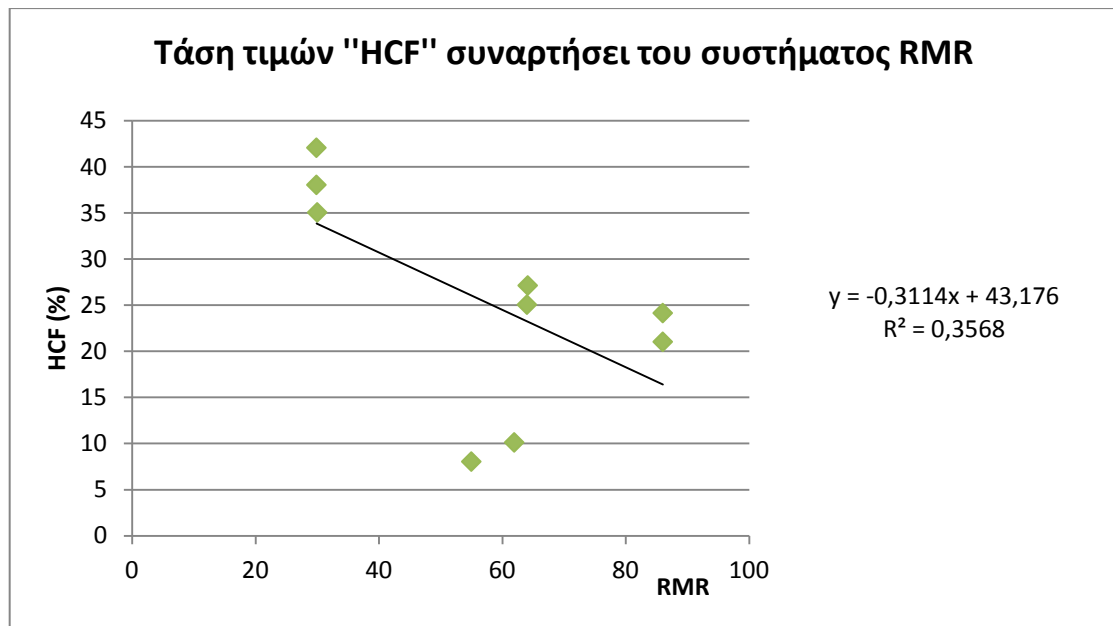
Τα δεδομένα για την κατασκευή των παρακάτω διαγραμμάτων φαίνονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6, αντίστοιχα (Innaurato et al., 1998).

Πίνακας 5.5: Παράμετρος «HCF» συναρτήσεως του συστήματος ταξινόμησης RMR, στην περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων(ελεγχόμενη) (Innaurato et al., 1998).

HCF%	RMR
35,1	30,0
38,0	29,9
42,1	29,9
8,0	55,0
10,1	62,0
25,1	64,0
27,1	64,1
24,1	86,0
21,0	86,0

Πίνακας 5.6: Παράμετρος «HCF» συναρτήσεως του συστήματος ταξινόμησης RMR, στην περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε μη ελεγχόμενη ανατίναξη (Innaurato et al., 1998).

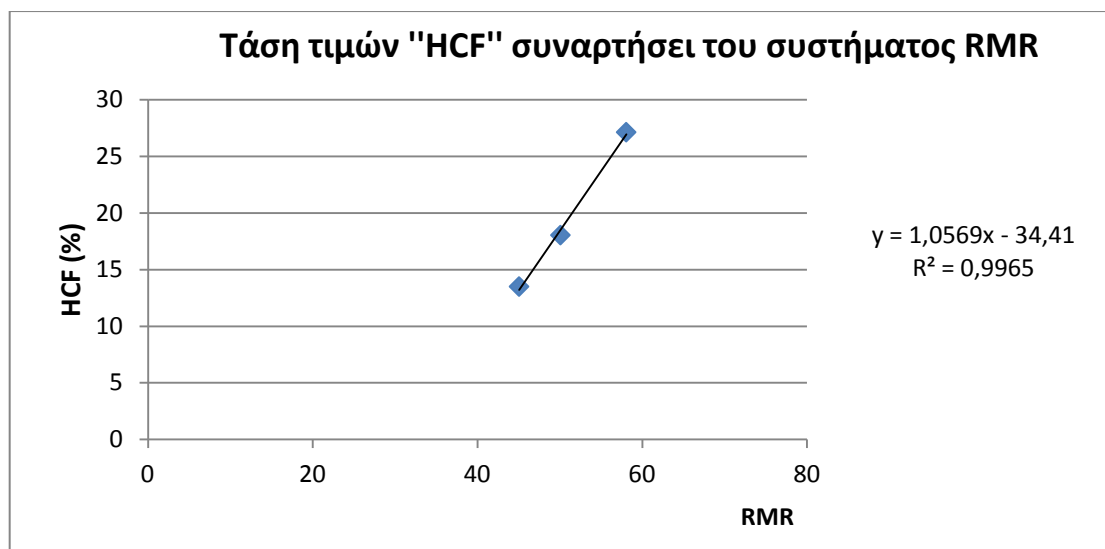
HCF%	RMR
13,5	45,1
18,0	50,1
27,1	58,1



Διάγραμμα 5.5: Συσχέτιση τιμών HCF σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR, για την περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων (ελεγχόμενη).

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, ο δείκτης HCF συνδέεται γραμμικά με το σύστημα ταξινόμησης RMR και συγκεκριμένα φθίνει. Από τον ορισμό όμως του δείκτη HCF, το συνολικό ορατό ίχνος που αφήνουν τα διατρήματα μιας σήραγγας πριν την ανατίναξη θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από εκείνο του συνόλου των περιμετρικών διατρημάτων αυτής. Στην περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε ανατίναξη λείων τοιχωμάτων παρατηρείται ότι ο προηγούμενος ισχυρισμός δεν αποδεικνύεται, το οποίο μπορεί να οφείλεται σε ελλιπή στοιχεία που δίνονται από τους συγγραφείς ερευνητές ή στην μη απόδοση τελικά της μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης (λείων τοιχωμάτων) στην ποιότητα της βραχομάζας στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Ο συντελεστής συσχέτισης στο διάγραμμα είναι 0,36 περίπου και η σημαντικότητα 0,08, το οποίο σημαίνει ότι τα δύο μεγέθη δεν έχουν συσχετιστεί επιτυχώς. Ο κύριος λόγος αυτού είναι τα ελάχιστα δεδομένα που διατίθενται.

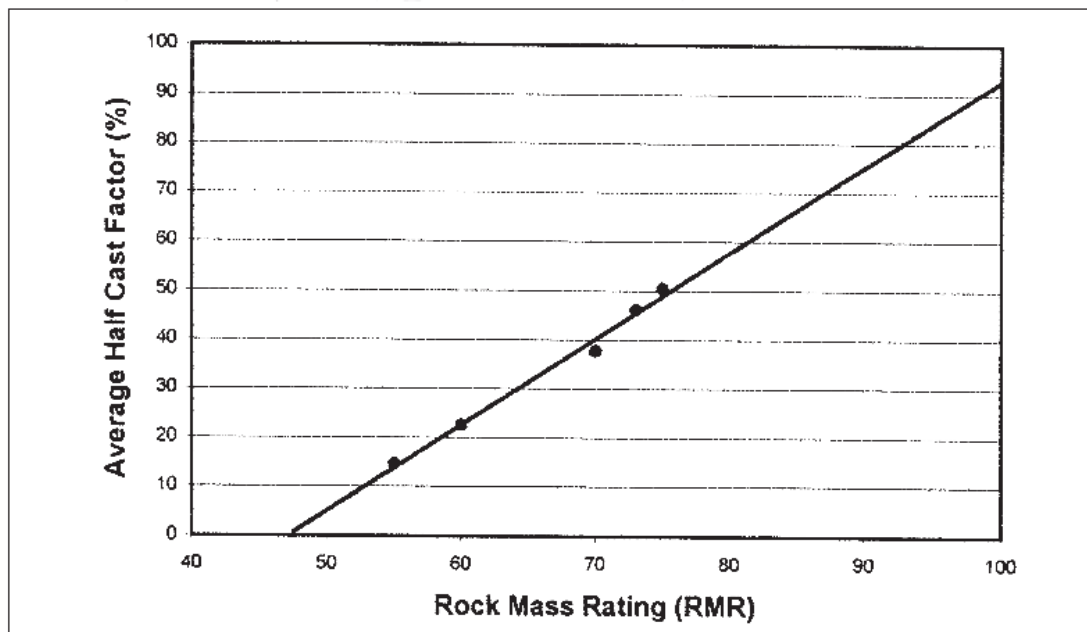


Διάγραμμα 5.6: Συσχέτιση τιμών HCF σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR, για την περίπτωση χειροκίνητου jumbo σε μη ελεγχόμενη ανατίναξη.

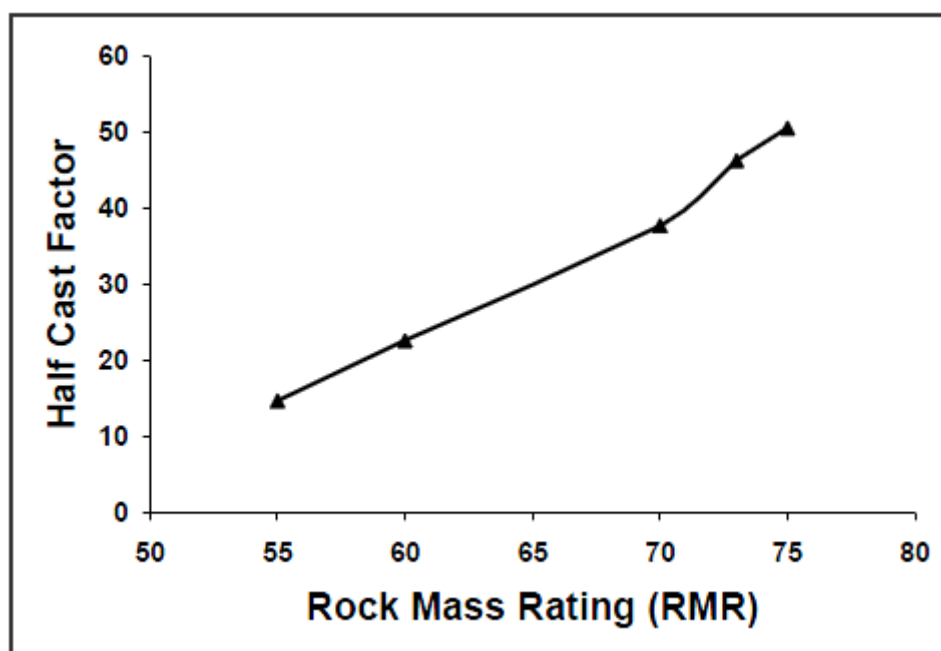
Στον Διάγραμμα 5.6 παρατηρείται γραμμική αύξηση μεταξύ των HCF και RMR, όπως είναι αναμενόμενο. Δηλαδή όσο καλύτερης ποιότητας είναι το πέτρωμα τόσο αυξάνεται το ποσοστό του ορατού ίχνους που αφήνουν τα διατρήματα μετά την ανατίναξη τους σε σχέση με τα περιμετρικά διατρήματα. Από τον ορισμό του δείκτη HCF, η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι 100%, το οποίο σημαίνει ότι δεν αφαιρέθηκε περισσότερο πέτρωμα από το επιθυμητό.

Παρατηρείται επίσης ότι η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη HCF και του συστήματος RMR γι' αυτήν την περίπτωση (χειροκίνητο jumbo σε ανατίναξη μη λειών τοιχωμάτων) είναι επιτυχής και συγκεκριμένα με συντελεστή συσχέτισης 0.99 και σημαντικότητα 0,04. Αυτό συνεπάγεται ότι αύξηση της ποιότητας της βραχομάζας επιφέρει αύξηση του δείκτη HCF, δηλαδή το συνολικό ορατό ίχνος που αφήνουν τα διατρήματα μετά την ανατίναξη τους είναι μεγαλύτερο από το συνολικό μήκος των διατρημάτων της περιμέτρου μιας σήραγγας πριν την ανατίναξη των.

Άλλα διαγράμματα που αποδεικνύουν το παραπάνω είναι το Διάγραμμα 5.7 και 5.8, στα οποία φαίνεται η γραμμική σχέση του δείκτη HCF και του συστήματος RMR για καλύτερης ποιότητας βραχομάζας (>50). Πιο συγκεκριμένα, για βραχομάζες ποιότητας μικρότερη από 50 είναι δύσκολο να διατηρηθεί μετά την ανατίναξη το ορατό ίχνος διατρημάτων στο 50%.



Διάγραμμα 5.7: Συσχέτιση τιμών HCF σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR (https://www.minewiki.org/index.php/Influence_Geology_Blast_Damage#Rock_Mass_Rating_and_Half_Cast_Factor).



Διάγραμμα 5.8: Συσχέτιση τιμών HCF σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR (Singh and Narendula, 2009).

5.3 Συσχέτιση των παραμέτρων ανατίναξης με το σύστημα ταξινόμησης Q

5.3.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι οι ιδιότητες και η ποιότητα της βραχομάζας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον κατακερματισμό του πετρώματος. Επιπλέον, ιδιότητας όπως η αντίσταση της βραχομάζας (R_{am} , ενότητα 5.2.2) και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών ασκούν σημαντική επιρροή στην αλληλεπίδραση εκρηκτικών και πετρώματος. Ο Hagan (1992) σχολίασε ότι η επίδοση μιας έκρηξης συνήθως επηρεάζεται περισσότερο από τις ασυνέχειες και τα επίπεδα αυτών παρά από τις μηχανικές και της φυσικές ιδιότητες του πετρώματος.

Το συσχετισμό, λοιπόν, αυτό ερεύνησαν μια ομάδα επιστημόνων οι οποίοι πραγματοποίησαν ανατινάξεις σε φυσικά μοντέλα προσομοίωσης σχηματισμών άνθρακα (coal measure formation) με διαφορετικούς προσανατολισμούς ασυνεχειών και επιτόπιες έρευνες σε διάφορων ειδών πετρώματα προκειμένου να καθορίσουν τις συνέπειες της ποιότητας της βραχομάζας και του κοινού προσανατολισμού μετώπου-ασυνεχειών στην έκρηξη της σήραγγας, όσον αφορά στην προχώρηση και τον κατακερματισμό (ή υπερθρυμματισμό). Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε η συμβατική αρχική κοπή V-cut, επειδή χρησιμοποιείται ευρέως σε διάνοιξη αστικών σηράγγων και σηράγγων ορυχείων. Η διάτρηση πραγματοποιήθηκε με jumbo μεγάλης διαμέτρου.

Οι ερευνητές αυτοί προσομοίωσαν μοντέλα πετρώματος με διαφορετικό προσανατολισμό ασυνεχειών σε σχέση με το μέτωπο και σε διαφορετικά είδη πετρωμάτων. Ορισμένα από τα δεδομένα που χρησιμοποίησαν φαίνονται παρακάτω (Chakraborty et al., 1994):

Μηχανικές ιδιότητες βραχομάζας

- Ειδικό βάρος: $2,32\text{g/cm}^3$
- Θλιπτική τάση: $200\text{-}400\text{kg/cm}^2$ ($20\text{-}40\text{MPa}$)

Μοτίβο ανατίναξης

- Μέγιστο βάθος διατρήματος: 2,3m
- Διάμετρος διατρήματος: 0,038m
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων ανά γύρο: 60
- Τύπος εκρηκτικού: Special Gelatine 80%, Make: IEL. Velocity of detonation: 5000m/s.
- Εκρηκτική κατανάλωση ανά γύρο: 45kg
- Μέσος όρος προχώρησης: 1,45m
- Συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών: 1,47kg/m³.

5.3.2 Συσχέτιση συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών με το σύστημα ταξινόμησης Q

Ο συντελεστής κατανάλωσης (powder factor) ή η ειδική κατανάλωση (specific charge) αποδίδει το βάρος του εκρηκτικού που απαιτείται για τη θραύση μίας μονάδας βάρους πετρώματος και υπολογίζεται σε μονάδες lbs/ton, lbs/yd³, kg/ton, kg/m³ κλπ. Σημειώνεται ότι μερικές φορές χρησιμοποιείται το αντίστροφο του προηγούμενου ορισμού. Για τον υπολογισμό του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών για μια δεδομένη γεωμετρία εξόρυξης πρέπει να υπολογισθεί το βάρος του εκρηκτικού σε ένα διάτρημα και ο αντίστοιχος όγκος (ή βάρος) του πετρώματος που εξορύσσεται σε μια επιφανειακή εκμετάλλευση. Ο υπολογισμός του συντελεστή κατανάλωσης που αντιστοιχεί στην ανατίναξη ενός διατρήματος και αυτός που αντιστοιχεί στην ανατίναξη μιας ομάδας διατρημάτων (round) διαφέρει λόγω του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού του εξορυσσόμενου πετρώματος. Για το λόγο αυτό, ο καλύτερος τρόπος για τον υπολογισμό του βάρους του εξορυσσόμενου πετρώματος είναι η μέτρηση του, σύμφωνα με τις διάφορες εμπειρικές σχέσεις. Σημειώνεται επίσης, ότι όταν συγκρίνονται δύο συντελεστές ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικών πρέπει ο όγκος του εξορυγμένου πετρώματος να έχει υπολογισθεί με τον ίδιο τρόπο (Αγιουτάντης, 2009). Τυπικές τιμές για τους συντελεστές ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικών σε επιφανειακές εκρήξεις παραγωγής είναι από 0,4 έως 2,5lbs/yd³ (0,25-1,6kg/m³) (Dick et al., 1983). Για υπόγειες ανατινάξεις, οι συντελεστές κατανάλωσης εκρηκτικών υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο αλλά είναι

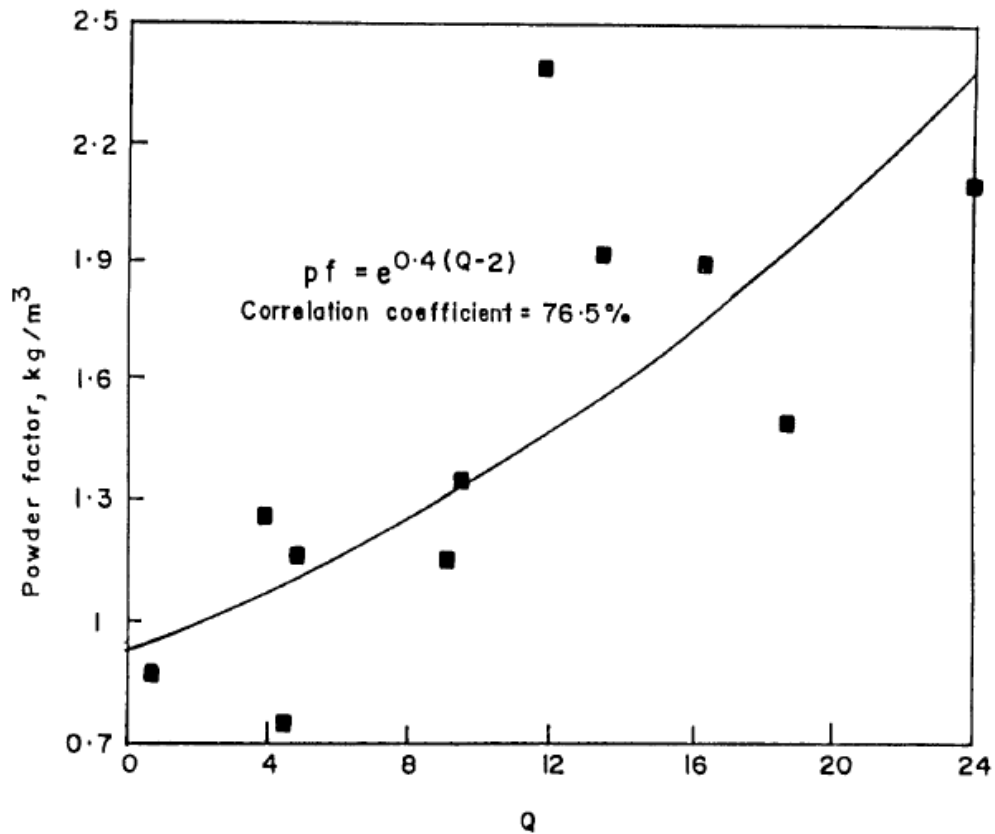
αρκετά μεγαλύτεροι (δύο, τρεις ή και περισσότερες φορές) από εκείνους των επιφανειακών. Αυτά συμβαίνει διότι, στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις καταναλώνεται μεγαλύτερη ποσότητα εκρηκτικών για να δημιουργηθούν ελεύθερες επιφάνειες κυρίως κατά την αρχική κοπή καθώς και για να εκτοξευθεί το υλικό προς τη μεριά προχώρησης τους μετώπου.

Ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών είναι μια παράμετρος που σχετίζεται έμμεσα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βαθμίδας, που μας αφορούν, καθώς επίσης και με τα μεγέθη σχεδιασμού του σχεδίου ανατίναξης.

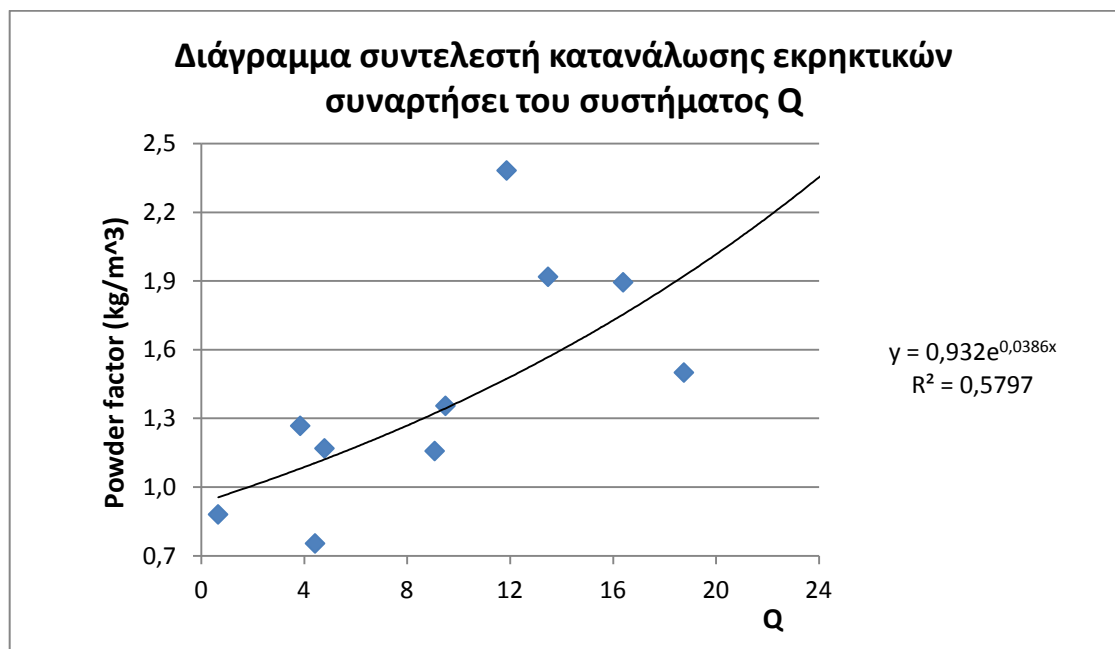
Πίνακας 5.7: Συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης Q (Chakraborty et al., 1994).

Q	Συντελεστής κατανάλωσης (kg/m ³)
0,6	0,9
3,8	1,3
4,4	0,7
4,8	1,2
9,1	1,1
9,5	1,3
11,9	2,4
13,5	1,9
16,4	1,8
18,7	1,5
24,1	2,1

Οι συγγραφείς-ερευνητές παραθέτουν το Διάγραμμα 5.9, που προέκυψε από τις μετρήσεις τους. Το αντίστοιχο διάγραμμα που προέκυψε από τα δεδομένα είναι το παρακάτω (Διάγραμμα 5.10).



Διάγραμμα 5.9: Συσχέτιση τιμών του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης Q, σύμφωνα με τους συγγραφείς-ερευνητές (Chakraborty et al., 1994).



Διάγραμμα 5.10: Συσχέτιση τιμών του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης Q.

Το Διάγραμμα 5.9 διαφέρει σε σχέση με το Διάγραμμα 5.10 στο συντελεστή συσχέτιση των μεγεθών. Η σημαντικότητα για το Διάγραμμα 5.9 είναι 0,009 ενώ για το Διάγραμμα 5.10 είναι $5,4 \cdot 10^{-9}$. Αυτό συμβαίνει διότι το δεύτερο διάγραμμα είναι πιο απλοποιημένο μοντέλο εκθετικής συνάρτησης από το πρώτο διάγραμμα.

Παρατηρείται, λοιπόν, αρχικά ότι για καλής ποιότητας πετρώματα ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών αυξάνεται. Συγκεκριμένα η αύξηση αυτή είναι εκθετική, όπως φαίνεται και από τη μαθηματική σχέση στο διάγραμμα 5.10. Αυτό συνεπάγεται ότι πετρώματα καλύτερης ποιότητας καταναλώνουν μεγαλύτερη ποσότητα εκρηκτικών για την θραύση τους.

Μια ακόμη παρατήρηση που προκύπτει από το διάγραμμα είναι ότι το σύστημα Q δίνεται σε συγκεκριμένο εύρος τιμών από 0-24 για δεδομένη περιοχή, που σημαίνει ότι η περιοχή μελέτης των ερευνητών χαρακτηριζόταν από αρκετά χαμηλής ποιότητας πετρώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι μετρήσεις να μην είναι αντιπροσωπευτικές και τα διεξαγόμενα συμπεράσματα πολύ αβέβαια. Παρ' όλα αυτά όμως, ένα ορθό συμπέρασμα που προκύπτει είναι αυτό που αναφέρθηκε προηγουμένως δηλαδή ότι όσο αυξάνεται η ποιότητα του πετρώματος αυξάνεται και ο συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών.

Επιπρόσθετα, η συσχέτιση του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών με το σύστημα ταξινόμησης Q μπορεί να μην επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα, διότι το σύστημα Q δεν περιλαμβάνει παραμέτρους που αφορούν στο πέτρωμα παρά μόνο στα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που υπάρχουν σ' αυτό. Για το λόγο αυτό, θα μπορούσε να γίνει συσχετισμός και με άλλα συστήματα ταξινόμησης ώστε να λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι που αφορούν τον τύπο πετρώματος και τα γεωμετρικά-γεωμηχανικά χαρακτηριστικά αυτού.

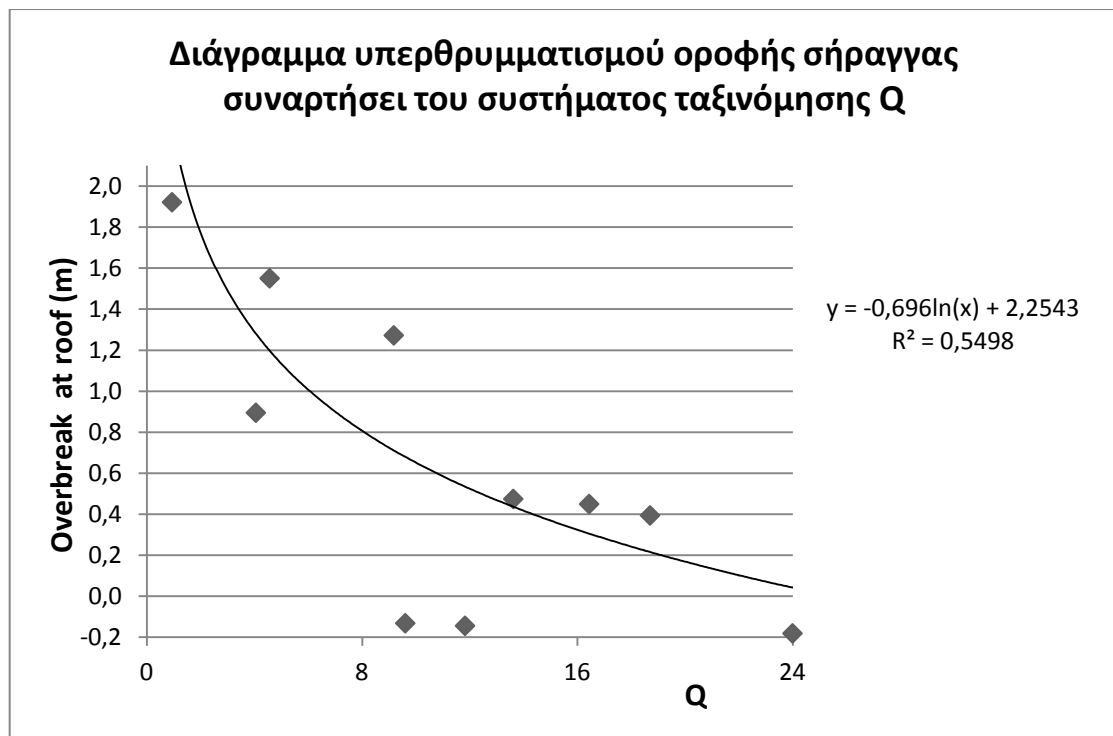
5.3.3 Συσχέτιση παραμέτρου OB με το σύστημα Q

Για τα δεδομένα που αναφέρθηκαν προηγουμένως (παράγραφος 5.3.1), γίνεται συσχέτιση του μεγέθους του υπερθρυμματισμού σε σήραγγα της περιοχής στην οροφή (overbreak at roof) και στις πλευρές (overbreak at sides) αυτής. Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 5.8: Υπερθρυμματισμός οροφής σήραγγας σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης Q (Chakraborty et al., 1994).

Q	Υπερθρυμματισμός στην οροφή (m)	Υπερθρυμματισμός στις παρειές (m)
0,9	1,9	0,7
4,0	0,9	0,9
4,6	1,5	1,1
4,9	2,3	0,0
9,2	1,3	1,2
9,6	-0,1	1,7
11,8	-0,1	0,7
13,6	0,5	0,0
16,4	0,4	0,7
18,7	0,4	0,7
24,0	-0,2	0,3

Ο υπερθρυμματισμός των πλευρών συναρτήσει του συστήματος Q δεν παρουσιάζεται, διότι δεν βοηθά στην εξαγωγή συμπερασμάτων λόγω του χαμηλού συντελεστή συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών.



Διάγραμμα 5.11: Συσχέτιση τιμών του υπερθρυμματισμού στην οροφή σήραγγας σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης Q.

Παρατηρείται αρχικά ότι για καλύτερης ποιότητας πετρώματα ο υπερθρυμματισμός μειώνεται, πράγμα που οδηγεί στον επιθυμητό στόχο. Δηλαδή επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος θρυμματισμός του πετρώματος χωρίς να αφήνεται υλικό ή να θραύεται περισσότερο. Συγκεκριμένα, το αρνητικό πρόσημο του υπερθρυμματισμού δηλώνει ότι το άνοιγμα δεν ορύχθηκε στην επιθυμητή διατομή, αλλά σε μικρότερη.

Για κακής ποιότητας πετρώματα ο υπερθρυμματισμός αυξάνεται, το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να δαπανηθούν χρόνος και χρήματα για την υποστήριξη του τμήματος αυτού της σήραγγας. Η μείωση του υπερθρυμματισμού είναι λογαριθμική, όπως φαίνεται από το διάγραμμα. Ο συντελεστής συσχέτισης των δύο μεγεθών πήρε την τιμή 0,55 περίπου, γεγονός που δηλώνει 50% επιτυχία στη συσχέτιση μεταξύ τους και η σημαντικότητα πήρε την τιμή 0,009. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ελλιπή και λιγοστά δεδομένα. Άλλος ένας λόγος είναι και πάλι το μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται το σύστημα Q για τη δεδομένη περιοχή μελέτης, το οποίο αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Η βέλτιστη, επομένως, απόδοση της ανατίναξης είναι όταν επιτυγχάνεται ο ελάχιστος υπερθρυμματισμός του πετρώματος.

5.4 Συγκριτικά διαγράμματα συσχέτισης των παραμέτρων ανατίναξης με τα συστήματα ταξινόμησης Q και RMR

Με βάση τα παραπάνω και τις διάφορες συσχετίσεις μεγεθών ανατινάξεων με την ποιότητα της βραχομάζας, παρουσιάζονται επιπλέον διαγράμματα για τη σύγκριση των συσχετίσεων μεταξύ των δύο πιο χρησιμοποιούμενων συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q.

Η παράμετρος που συσχετίστηκε στα δύο αυτά συστήματα ήταν αυτή του υπερθρυμματισμού του υλικού μετά την ανατίναξη, συγκεκριμένα σε σήραγγες ορυχείων.

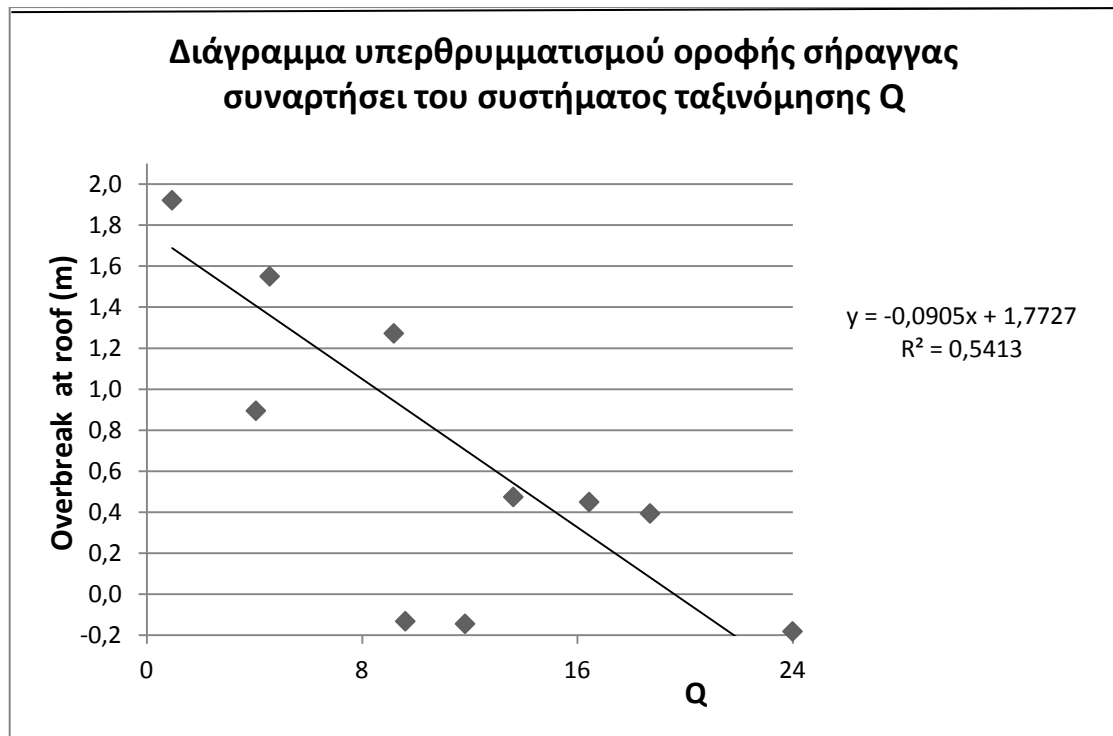
Τα δεδομένα φαίνονται στον Πίνακα 5.9. Έγινε επίσης μετατροπή του συστήματος Q στο σύστημα RMR με βάση τη σχέση του Moreno Tallon (1980):

$$RMR = 5,4 \ln Q + 55,2$$

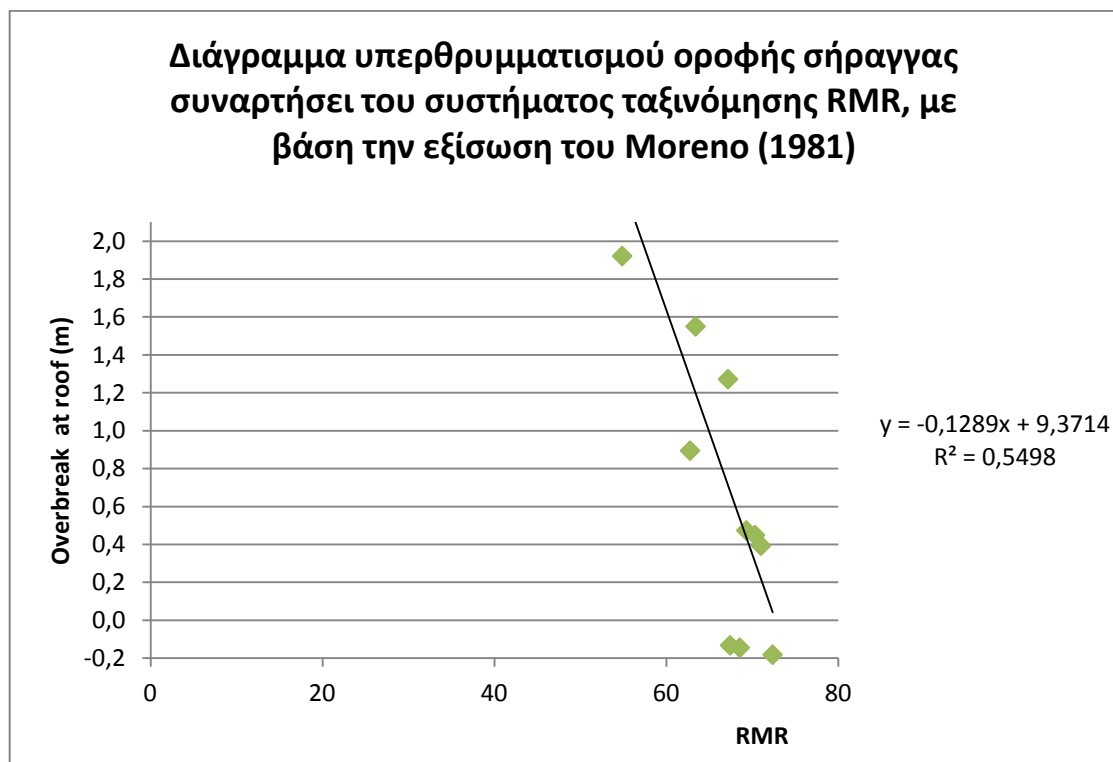
Πίνακας 5.9: Υπερθρυμματισμός οροφής σήραγγας σε συνάρτηση με τα συστήματα ταξινόμησης Q και RMR (Chakraborty et al., 1994).

Υπερθρυμματισμός στην οροφή (m)	Q	RMR (Moreno 1981)
1,9	0,9	54,9
0,9	4,0	62,8
1,5	4,6	63,4
2,3	4,9	63,9
1,3	9,2	67,2
-0,1	9,6	67,4
-0,1	11,8	68,5
0,5	13,6	69,3
0,4	16,4	70,3
0,4	18,7	71,0
-0,2	24,0	72,4

Στο Διάγραμμα 5.12 φαίνεται η συσχέτιση της παραμέτρου του υπερθρυμματισμού συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης Q στη γραμμική της μορφή, ενώ στο Διάγραμμα 5.13 φαίνεται η συσχέτιση της παραμέτρου του υπερθρυμματισμού συναρτήσει του συστήματος ταξινόμησης RMR όπως μετατράπηκε από την παραπάνω εξίσωση.

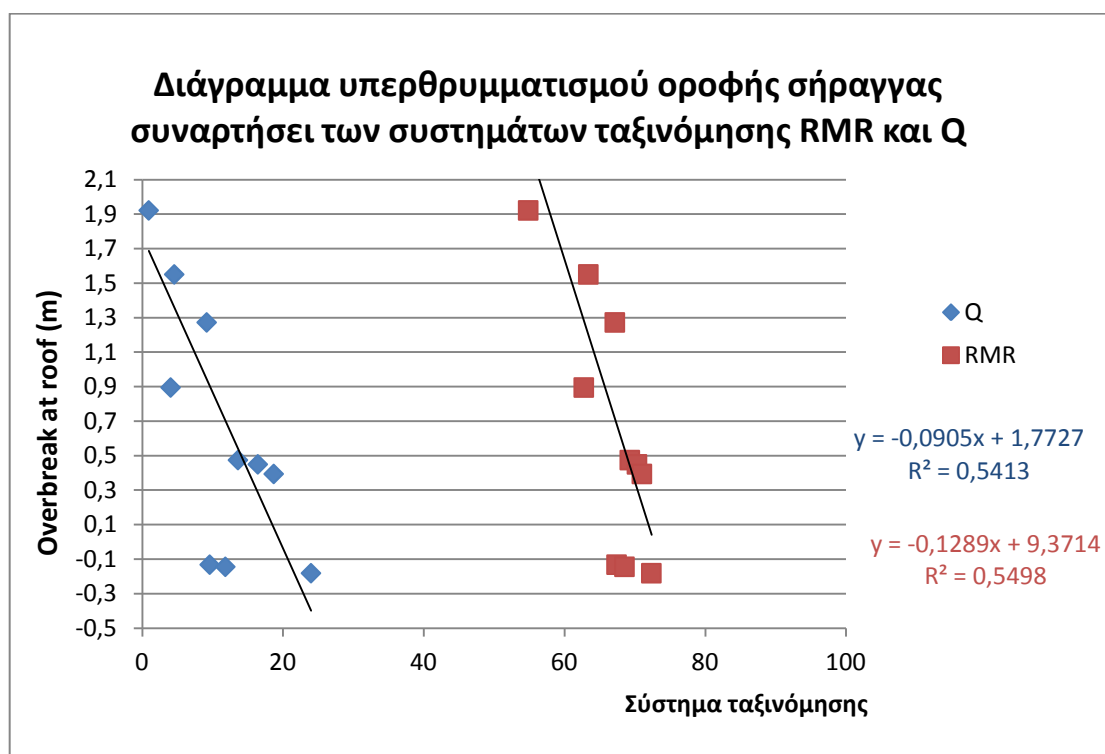


Διάγραμμα 5.12: Συσχέτιση τιμών του υπερθρυμματισμού στην οροφή σήραγγας σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης Q.



Διάγραμμα 5.13: Συσχέτιση τιμών του υπερθρυμματισμού στην οροφή σήραγγας σε συνάρτηση με το σύστημα ταξινόμησης RMR.

Για το σχεδιασμό του παραπάνω διαγράμματος, επιλέχθηκε η σχέση του Moreno (1980) εφόσον και οι διάφοροι άλλοι συγγραφείς που πρότειναν σχέσεις μεταξύ των συστημάτων RMR και Q δεν διαφοροποιούνται κατά πολύ. Απώτερος σκοπός ήταν εξάλλου η ενδεικτική μετατροπή του ενός συστήματος στο άλλο και όχι η σύγκριση των σχέσεων της παραγράφου 4.4.4 .



Διάγραμμα 5.14: Συσχέτιση τιμών του υπερθρυμματισμού στην οροφή σήραγγας σε συνάρτηση με τα συστήματα ταξινόμησης RMR και Q.

Από το συγκριτικό λοιπόν Διάγραμμα 5.14 παρατηρείται ότι η σχέση των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q με την παράμετρο του υπερθρυμματισμού είναι φθίνουσα γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι για καλύτερης ποιότητας βραχομάζας ο υπερθρυμματισμός μειώνεται, δηλαδή αποφεύγονται φαινόμενα εκτόξευσης τεμάχων πετρώματος, υπερβολικού θρυμματισμού ή περισσότερων αερίων έκρηξης. Παρατηρείται ότι οι δύο γραμμές των συστημάτων ταξινόμησης στο διάγραμμα είναι σχεδόν παράλληλες, γεγονός που δείχνει ότι και τα δύο αυτά συστήματα έχουν σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα στη συσχέτιση τους με αυτή την παράμετρο ανατίναξης. Όπως φαίνεται όμως, ο συντελεστής συσχέτισης του συστήματος RMR είναι ελάχιστα καλύτερος από εκείνον του συστήματος Q.

Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, ενώ τα δεδομένα και τα στοιχεία που δίνονται είναι ελλιπή, παρ' όλα αυτά η συσχέτιση που επιτυγχάνεται με το σύστημα RMR μπορεί να θεωρηθεί ελαφρά καλύτερα εκείνης του συστήματος Q.

Οι συντελεστές συσχέτισης είναι 0,54 και 0,55 περίπου για το σύστημα Q και RMR αντίστοιχα, το οποίο σημαίνει 50% ποσοστό επιτυχίας της συσχέτισης ποιότητας της βραχομάζας με την παράμετρο του υπερθρυμματισμού.

Για την ελαχιστοποίηση του OB προτείνεται ελεγχόμενη ανατίναξη ειδικότερα στις περιοχές πτωχής ποιότητας βραχομάζας όπως και για την βελτιστοποίηση απόδοσης της ανατίναξης προτείνεται σωστός σχεδιασμός λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος ταξινόμησης που χρησιμοποιείται, εκτός από τις παραμέτρους σχεδιασμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας μελετώντας την ποιότητα της βραχομάζας σε υπόγειες ανατινάξεις, ως επί των πλείστων σε σήραγγες προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα μεγέθη που σχετίζονται με το σχεδιασμό μιας ανατίναξης είναι άμεσα συνδεδεμένα με την ποιότητα της βραχομάζας.
- Η ποιότητα της βραχομάζας καθώς και οι ασυνέχειες με τα χαρακτηριστικά τους παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση ενός σχεδίου ανατίναξης.
- Η συσχέτιση των παραμέτρων ανατίναξης με την ποιότητα της βραχομάζας για κάθε τεχνικό έργο επιφέρει θετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα για την απόδοση της ανατίναξης και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχει στη βραχομάζα.
- Οι παράμετροι που προκύπτουν έμμεσα από το σχέδιο μιας ανατίναξης, όπως είναι αυτές με τις οποίες ασχολήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία (συντελεστής κατανάλωσης εκρηκτικών, υπερθρυμματισμός, HCF, η), σχετίζονται ομοίως με επιτυχία με την ποιότητα της βραχομάζας.
- Η συσχέτιση των παραμέτρων HCF, η και OB με τα συστήματα RMR και Q ήταν ικανοποιητική, χωρίς όμως να αποκλείει καλύτερη συσχέτιση με άλλο σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας.
- Η συσχέτιση των παραμέτρων HCF, η, OB και του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών με τα συστήματα RMR και Q φαίνεται ότι χωρά βελτίωση λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις παραμέτρους και τα μεγέθη που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό μιας ανατίναξης σε συνδυασμό πάντα με το είδος του πετρώματος.
- Η συσχέτιση των παραμέτρων HCF, η, OB και του συντελεστή κατανάλωσης εκρηκτικών με τα συστήματα RMR και Q δεν ήταν η βέλτιστη λόγω έλλειψης στοιχείων και δεδομένων.

- Δεν επιτεύχθηκε συσχέτιση των μεγεθών σχεδιασμού μιας ανατίναξης (φορτίο, απόσταση διατρημάτων, διάμετρος διατρημάτων κλπ) με την ποιότητα της βραχομάζας λόγω έλλειψης αντίστοιχης βιβλιογραφία.
- Η συσχέτιση των όποιων παραμέτρων ανατίναξης έγινε περιορίστηκε σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις λόγω έλλειψης δεδομένων.

6.2 Προτάσεις

Για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος προτείνονται τα ακόλουθα:

- Εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων για τις υπόγειες ανατινάξεις για την βελτίωση της συσχέτισης ποιότητας της βραχομάζας και παραμέτρων ανατίναξης
- Πρωτογενή ταξινόμηση του πετρώματος με περισσότερα συστήματα ταξινόμησης, ώστε να μπορεί να επιλεγεί στη συνέχεια το σύστημα που προσαρμόζεται καλύτερα στις συνθήκες και στο τύπο πετρώματος του εκάστοτε τεχνικού έργου.
- Συσχετισμό της ποιότητας της βραχομάζας με τα μεγέθη και τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό στις υπαίθριες ανατινάξεις για τις οποίες υπάρχουν ελάχιστα δημοσιευμένα δεδομένα.
- Εκτενή εξέταση παραμέτρων σχεδιασμού υπόγειων και υπαίθριων ανατινάξεων για κακής ποιότητας βραχομάζα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Barton, N.R.; Lien, R.; Lunde, J. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". Rock Mechanics and Rock Engineering (Springer) Vol.6, No.4, pp. 189–236.
2. Bhandari, S., (1997), "Engineering rock blasting operations", Balkema, 375p.
3. Bieniawski, Z.T., (1973), "Engineering Classification on Jointed Rock Masses", Trans. South African Inst. Civil Engineering, Vol.15, pp. 335-344.
4. Bieniawski, Z.T., (1974), "Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling" Proc. 3rd Congress of International Society for Rock Mechanics, Denver, Vol. 2, pp. 27-32.
5. Bieniawski, Z.T., (1976), "Rock Mass Classifications in Rock engineering, Proceedings Symposium on Exploration for rock Engineering", (ed. Z.T. Bieniawski), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 97-106.
6. Bieniawski, Z.T., (1979), "The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications", Proc. 4th International Congress Rock Mechanics, ISRM, Montreaux, A.A.Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp. 51-58.
7. Bieniawski, Z.T., (1984), "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A. Balkema, 272p.
8. Bieniawski, Z.T., (1989), "Engineering Rock Mass Classifications", New York: Wiley and Sons, 251p.
9. Brady, B.H.G. and E.T. Brown, (1993), "Rock Mechanics for Underground Mining", 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, 628p.
10. Broch, E. and J.A. Franklin, (1972), "The point Load Strength Test", International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vo.9, pp. 669-697.
11. Castro-Fresno D., Diego-Carrera R., Ballester-Munoz F., Alvarez-Garcia J., (2010), Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q Index in Low-Quality Soils.

12. Chakraborty, A. K., Jethwa J. L. and Paithankar A. G., (1994), "Assessing the Effects of Joint Orientation and Rock Mass Quality on Fragmentation and Overbreak in Tunnel Blasting", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 471-482.
13. Cecil, O.S., (1970), "Correlations of rock bolt-shotcrete support and rock quality parameters in Scandinavian tunnels" Ph. D thesis Univ. of Illinois 1970, also in *Proc. Swedish Geotech. Institute*, No.27, 1975, 275pp.
14. Coşar, S., (2004), "A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of Middle East Technical University", Application of rock mass classification systems for future support design of the Dim tunnel near Alanya.
15. Deere, D.U. and R.P. Miller, (1966), "Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock", Air Force Weapons Laboratory, Technical Report No. AFNL-TR-65-116, New Mexico.
16. Deere, D. U., (1969), "Engineering Classification of In-Situ Rock", University of Illinois, Air Force Weapons Lab Contract No AFWL-TR-67-144.
17. Deere, D.U., R.B. Peck, H. Parker, J.E. Monsees and B. Schmidt, (1970), "Design of Tunnel Support Systems", *Highway Research Record*, No.339, pp. 26-33.
18. Deere, D.U. and Deere, D.W., (1988), "The rock quality designation (RQD) index in practice" In *Rock classification systems for engineering purposes*, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, pp. 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test.Mat.
19. Deere, D.U., (1989), "Rock quality designation (RQD) after 20 years", U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1, Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
20. Dick, R.A., L.R. Fletcher and D.V. D' Andrea, (1983), "Explosives and Blasting Manual", Information Circular 8925, US Bureau of Mines, Washington, DC.
21. Douglas, K.J., (2002), "The shear strength of Rock Masses", A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales Sydney, Australia.

22. Edlbro, C., (2003), "Rock Mass Strength: a preview", Technical Report, Lulea University of technology, 33pp.
23. Gregory, C.E., (1984), "Explosives for North American engineers", 3rd Edition, Trans Tech Publications.
24. Hagan, T. N., (1992), "Safe and cost-efficient drilling and blasting for tunnels, caverns, shafts and raises in India", Proc. Of a Workshop on Blasting Technology for Civil Engineering Projects, 16-18 Nov., New Delhi, 7.4-7.5 .
25. Hartman, H.L., (1987), "Introductory mining engineering", Wiley-Interscience Publications, 572p.
26. Hoek, E. and E.T. Brown, (1980), "Underground Excavations in Rock", Inst. Mining and Metallurgy, London< England and Elsevier Science Publishers, Barking, UK, 527p.
27. Hoek, E., (1994), "Strength of rock and rock masses", ISRM News Journal, Vol. 2, No. 2, pp.4-16.
28. Hustrulid, W., (1999), "Blasting principles for open pit mining: Theoretical Foundations", Vol. 2, Balkema.
29. Innaurato, N., Mancini, R. and Cardu M., (1998), "On the influence of rock mass quality on the quality of blasting work in tunnel driving", Tunnel and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 1, pp.81-89.
30. ISRM Suggested Methods (1981), "Rock characterization, testing and monitoring", E.T. Brown (Editor), Pergamon Press, Oxford.
31. Jethwa, J.L., A.K Dube, B. Singh, and R.S. Mithal, (1982), Evaluation of methods for tunnel support design in squeezing rock conditions. Proc. 4th Int. Congr. Int. Assoc. Eng. Geol., New Delhi, Vol. 5 pp. 125-134.
32. Jimeno, C.L., E.L. Jimeno and F.J.A. Carcedo, (1995), "Drilling and Blasting of rocks", Balkema.
33. Kennedy, B.A., (1990), "Surface Mining", 2nd edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 459p.
34. Kose H., C.O. Aksoy, A. Gönen, M. Kun and T. Malli, (2005), "Economic evaluation of optimum bench height in quarries", The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 129-135.
35. Livingston, C. W., (1956), "Fundamentals of rock failure, Quarterly of the Colorado School of Mines", Vol. 51, No. 3, Jul.

36. Mahtab, A.M. and P. Grasso, (1992), "Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rocks", Elsevier, 250p.
37. Means, W.D., (1985), "Stress and Strains – Basics Concepts of Continuum Mechanics for Geologists", Springer – Verlag, pp.339.
38. Merritt, A.H., (1982), "Geologic prediction for underground excavations", Proc. North American. Rapid Excav. Tunneling conf., Chicago, (eds K.S. Lane and L.A. Garfield) Vo. 1, pp.115-132, New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
39. Milne, D., Hadjigeorgiou, J., Pakalnis, R., (1998), "Rock mass characterization for underground hard rock mines", 15th Canadian Tunnelling Conference.
40. Moreno Tallon, E., (1982), "Comparison and application of the geomechanics classification schemes in tunnel construction", Proc. Tunneling 1982, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 241–246.
41. Palmstrom, 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 5, 221-228.
42. Priest, S.D. & J.A. Hudson, (1976), "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scan line surveys" Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech., Vol.18, pp.183-197.
43. Roberts, A., (1981), "Applied geotechnology a text for students and engineers on rock excavation and related topics", Mackay School of mines, University of Nevada, Pergamon Press.
44. Rutledge J. C. and Preston R. L., (1978), "Experience with Engineering Classifications of Rock" Proc. Int. Tunnelling Syrup., Tokyo, pp. A3.1-A3.7.
45. Singh P. S. and Lamond R. D., (1994), "Investigation of Blast Damage and Underground Stability", 12th Conference on Ground Control in Mining, School of Engineering Laurentian University Sudbury, Ontario, Canada, pp.336-372.
46. Singh P. S. and Narendrula R., (2009), "The influence of Rock Mass Quality in Controlled Blasting", 26th International Conference on Ground Control in Mining, School of Engineering Laurentian University Sudbury, Ontario, Canada, pp.314-319.
47. Scoble M. J., Lizotte Y. C., Paventi M. and Mohanty B. B., (1997), "Measurement of blast damage", Technical papers, Mining Engineering, pp.103-108.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ., (2002), Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Αγιουτάντης, Ζ., (2009), Στοιχεία Διάτρησης και Ανατίναξης, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
3. Αλεξούλη-Λειβαδίτη, Α., (2008), "Τεχνική Γεωλογία", Εκδόσεις ΕΜΠ.
4. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2005), Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Ι, Ηλεκτρονικές σημειώσεις διαλέξεων, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών εργαστηρίου Τεχν. Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας.
5. Καββαδάς, Μ., (2000), Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων, Σημειώσεις Μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα.
6. Καββαδάς, Μ., (2005), Σχεδιασμός Υπόγειων Έργων, Σημειώσεις Μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα.
7. Μενεγάκη, Μ., (2010), " Σχεδιασμός Υπόγειων Εκμεταλλεύσεων", Σημειώσεις του μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα
8. Παπαδημητρίου, Α., (2012), "Σημειώσεις Προχωρημένη Σεισμική Μηχανική", Έκδοση Π.Θ.
9. Ρόζος, Δ., (2005), "Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας Ι", Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Ι, Ηλεκτρονικές σημειώσεις διαλέξεων, ΕΜΠ
10. Σαρρής, Ε., (2004), "Προσομοίωση ανατίναξης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
11. Σοφιανός Α.Ι. & Π.Π. Νομικός, (2008), "Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων", ΕΜΠ
12. Τσουτρέλης, Χ., (2001), Εκρηκτικές ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων, Τόμος 2, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
13. Χατζηαγγέλου, Μ., Χρηστάρας, Β., (2001), "Ποιότητα της βραχομάζας κατά μήκος της υπό κατασκευή σιδηροδρομικής σήραγγας του Πλαταμώνα", 9th International Congress of the Geological Society of Greece, Athens, pp. 1741-1748.
14. Χρηστάρας, Β., Χατζηαγγέλου, Μ., Μαλλιαρουδάκης, Εμ. & Μέρκος, Σ., (2002), "Support Capacity of wedges and RMR classification along the Asprovalta tunnel of Egnatia Highway in Greece", 9th Congress of the

International Association for Engineering Geology and the Environment, J.L.
van Rooy and C.A. Jermy, ISBN No.0-620-28559-1.

Ιστοσελίδες

1. http://www.geo.auth.gr/883/Rock_Class.htm
2. <http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/contents.html>
3. <http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/terminology.html>
4. http://www.civ.uth.gr/lessons/52%5Ckephalaio_6.pdf
5. <http://hirise.lpl.arizona.edu/gr/temi/geologic.php>
6. http://www.metal.ntua.gr/uploads/2699/9_DIALEXI.pdf
7. <http://www.scribd.com/miyasuman/d/46334771/41-%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82-%CE%B1%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%AD%CF%87%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82>
8. <http://www.isrm.net/gca/?id=177>
9. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%88%CE%B4%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%82>