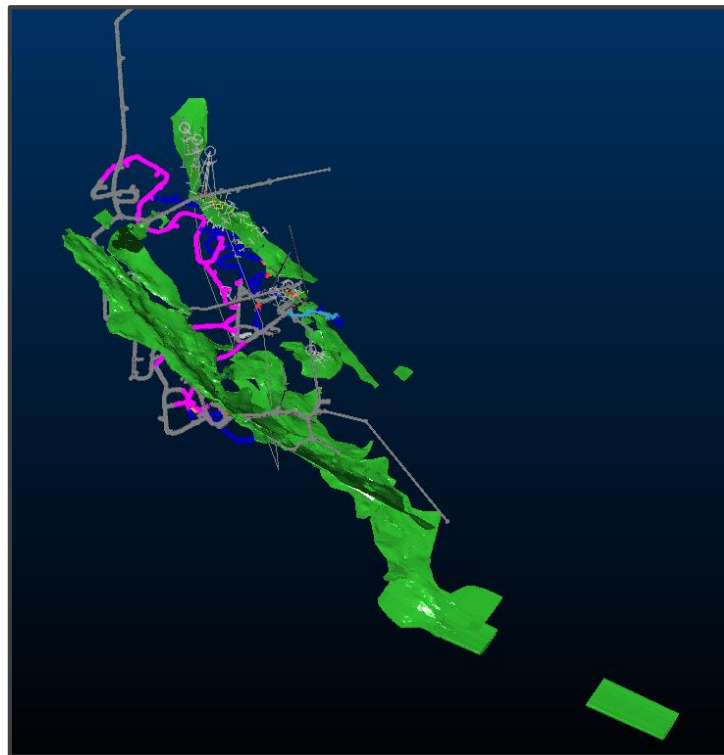




ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



## Εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική



Βουγιούκα Ι. Ευλαμπία  
Γεωλόγος BSc

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



## Εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική

**Βουγιούκα Ι. Ευλαμπία**  
**Γεωλόγος BSc**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών  
«Γεωλογία και Γεωπεριβάλλον» με ειδίκευση στην «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»  
Ημερομηνία προφορικής εξέτασης 19 Απριλίου 2016

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- 1) Μαρίνος Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής, Επιβλέπων
- 2) Βουδούρης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
- 3) Χατζηπέτρος Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016**

© Βουγιούκα Ι. Ευλαμπία

© Α.Π.Θ.

Εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική

«Η έγκριση της παρούσας Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων της συγγραφέως» (Ν.5343/1932, άρθρο 202, παρ.2)



Στη μητέρα μου  
και τη μνήμη του πατέρα μου



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Εικόνων.....	x
Περιεχόμενα Σχημάτων.....	xii
Περιεχόμενα Πινάκων.....	xv
Πρόλογος.....	xvii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός και μεθοδολογία.....	1
1.2 Πηγή των πληροφοριών. Ελληνικός Χρυσός.....	2
1.3 Η ιστορία των Μεταλλείων Κασσάνδρας.....	2
2 Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	5
2.1 Περιγραφή του βράχου και της βραχώμαζας.....	5
2.1.1 Γεωλογική περιγραφή της βραχώμαζας.....	5
2.1.2 Τεχνικογεωλογική περιγραφή της βραχώμαζας.....	7
2.2 Μηχανική συμπεριφορά και αστοχία της βραχώμαζας στα υπόγεια έργα.....	12
2.2.1 Μηχανισμοί αστοχίας βραχώμαζας.....	12
2.2.2 Κριτήρια αστοχίας βραχώμαζας.....	17
2.3 Γεωτεχνικές ταξινομήσεις βραχώμαζας.....	22
2.3.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση – RMR.....	24
2.3.2 Δείκτης ποιότητας Q.....	30
2.3.3 Γεωλογικός δείκτης αντοχής - GSI.....	37
2.3.4 Επιλογή κατάλληλου συστήματος ταξινόμησης.....	40
3 Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης υπόγειων μεταλλευτικών έργων.....	41
3.1 Γενικά.....	41
3.2 Βασικές μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης. Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.....	43
3.2.1 Μέθοδος θαλάμων και στύλων (room and pillar).....	45
3.2.2 Μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κενά μέτωπα (sublevel stoping).....	47
3.2.3 Μέθοδος υποχωρούντος μετώπου κατακόρυφου κρατήρα (Vertical crater retreat - VCR)	48
3.2.4 Μέθοδος κοπής και λιθογόμωσης (cut and fill).....	49

**Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα**

**Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέα Γεωλογίας**

**Σελίδα vii**

3.2.5	Μέθοδος επιμήκους ευθύγραμμου μετώπου (longwall).....	50
3.2.6	Μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κατοκρήμνιση οροφής (sublevel caving) .....	52
3.2.7	Μέθοδος κατακρήμνισης πατώματος (block caving).....	53
3.2.8	Μέθοδος συμπτυσσόμενου μετώπου (Shrinkage stoping).....	55
3.3	Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκμετάλλευσης.....	57
3.4	Μέτρα υποστήριξης μεταλλευτικών έργων .....	59
3.4.1	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα .....	60
3.4.2	Αγκύρια βράχου και συρματόσχοινα .....	61
3.4.3	Συρματόσχοινα .....	62
3.4.4	Χαλύβδινες νευρώσεις – μεταλλικά πλαίσια .....	63
3.4.5	Λοιπά μέτρα υποστήριξης .....	64
4	Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας .....	66
4.1	Γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του Μεταλλείου Ολυμπιάδας.....	66
4.1.1	Γεωγραφική θέση Μεταλλείου Ολυμπιάδας .....	66
4.1.2	Γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	67
4.1.3	Γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	68
4.2	Γεωλογικές συνθήκες της εγγύτερης περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας .....	72
4.2.1	Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας.....	72
4.2.2	Γεωλογική περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών .....	74
4.2.3	Τεκτονική δομή .....	79
4.2.4	Ενεργός τεκτονική και σεισμικότητα.....	82
4.2.5	Υδρογεωλογικές συνθήκες .....	85
4.2.6	Τεχνικογεωλογική περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών .....	87
5	Τεχνικογεωλογική περιγραφή και ταξινόμηση της βραχόμαζας στην περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας.....	91
5.1	Αντοχή και μέτρο ελαστικότητας των πετρωμάτων του μεταλλείου Ολυμπιάδας .....	91
5.2	Γεωτεχνική ταξινόμηση των πετρωμάτων του μεταλλείου Ολυμπιάδας με βάση το σύστημα RMR '89.....	98
5.2.1	Χαρτογραφήσεις μετώπων κατά την ανάπτυξη των στοών πρόσβασης του Ανατολικού Κοιτάσματος.....	98

5.2.2	Περιγραφή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού Κοιτάσματος	103
5.3	Σύγκριση δεδομένων χαρτογράφησης μετώπων και περιγραφής γεωτρήσεων ως προς την ποιότητα της βραχώμαζας .....	108
5.4	Εκτίμηση της ποιότητας της ζώνης μεταλλοφορίας και της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Σύγκριση δεδομένων με παλαιότερες μελέτες.....	109
6	Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχώμαζας του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας.....	113
6.1	Διάκριση τεχνικογεωλογικών ενοτήτων βραχώμαζας .....	113
6.2	Τύποι τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας.....	114
7	Συμπεράσματα και Προτάσεις .....	119
7.1	Συμπεράσματα .....	119
7.2	Προτάσεις.....	121
	Περίληψη.....	122
	Summary.....	124
	Βιβλιογραφία .....	126

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 2.1 Αστοχία βραχώδους σφήνας με ελεύθερη πτώση από την οροφή κατά τη φάση διεύρυνσης και αποκατάστασης της ερευνητικής στοάς -210 του μεταλλείου Ολυμπιάδας.....	16
Εικόνα 3.1 Αγκύρια πρόσφυσης άκρου τύπου swelllex και τρόπος λειτουργίας τους (www.minonausa.com).....	62
Εικόνα 3.2 Χαλύβδινα πλαίσια α) πλαίσια διατομής διπλού ταυ (HEB) κατά την εφαρμογή τους στο μέτωπο -100 του μεταλλείου Ολυμπιάδας, β) δικτυωτά πλαίσια (lattice girder) και (HEB)..	64
Εικόνα 3.3 Εφαρμογή των μεταλλικών των μεταλλικών «συνδέμων» (straps) στο επίπεδο -173 του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	65
Εικόνα 4.1 Δορυφορική εικόνα όπου απεικονίζεται η μεταλλευτική περιοχή της Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική.....	66
Εικόνα 4.2 Δορυφορική εικόνα της εγγύτερης περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	67
Εικόνα 4.3 Τυπικός βιοτιτικός- χαλαζιακός- αστριούχος γνεύσιος (FBGN) α) πλούσιος σε άστριους και με μικρού πάχους πηγματιτικές διεισδύσεις παράλληλα στη φολίδωση, από γεώτρηση OLDD0008 στα 15,90 – 23,80 m, β) πτωχός σε σαλικά ορυκτά, από τη γεώτρηση OLDD0019 στα 40,20 – 47,80 m, γ) σε επαφή με τα υποκείμενα μάρμαρα (MRB), στο επίπεδο -250 της Κατώτερης Ανατολικής Ράμπας (Lower East Ramp), δ) έντονα πτυχωμένος και διαταραγμένος στην οροφή και το άνω μισό του μετώπου, στο επίπεδο -150 της Ανατολικής Πρόσβασης (East Access), και πάλι σε επαφή με τα υποκείμενα μάρμαρα (MRB). 75	75
Εικόνα 4.4 Αμφιβολιτική ενότητα άλλοτε με έντονη γνευσιακή υφή (AGN) και άλλοτε συμπαγής (AM) α) από τη γεώτρηση OL-351 στα 319 - 321 m, β) από τη γεώτρηση OLDD0006 στα 11.40 – 13.40 m.....	76
Εικόνα 4.5 Τυπικά μάρμαρα α) λεπτόκοκκα, ζωνώδη, από τη γεώτρηση OLDD0006 στα 215,70 – 219,90 m, β) μεσόκοκκα, πλούσια σε γραφιτικά φλεβίδια, από τη γεώτρηση OLDD0023 στα 54.00 – 56.70 m, γ) με γραφιτικές ζωνώσεις, από το επίπεδο -100 της Ανατολικής Πρόσβασης (East Access). ....	77
Εικόνα 4.6 Τυπικές γρανιτικές / πηγματιτικές διεισδύσεις (PE) α) από τη γεώτρηση OLDD0016 στα 57,90 – 61,60 m, β) μέσα σε Βιοτιτικούς Γνευσίους στο επίπεδο -150 της Ανατολικής Πρόσβασης (East Access), γ) μέσα σε μάρμαρα στο επίπεδο -240 της πρόσβαση κάτω τεμάχους (Footwall Drive Access), ε) παράλληλα στον άξονα των F2 πτυχών, σε αποκάλυψη επί της οδού Ολυμπιάδας – Βαρβάρας, ε) μέσα σε Βιοτιτικούς Γνευσίους παρουσιάζοντας χαρακτηριστικές μορφές boudinage. ....	78
Εικόνα 4.7 α) Ζώνες μυλωνιτώσης σε α) πυριτωμένο μάρμαρο από τη γεώτρηση OLDD0006 στα 179,40 – 179,80 m, β) σε πυριτωμένο μάρμαρο σε επαφή με τη μεταλλοφορία, από τη γεώτρηση OLDD0013 στα 68,50 – 69,00 m, και ζώνη διάτμησης γ) σε βιοτιτικό γνεύσιο με έντονη εξαλλοίωση σε πράσινο σερικίτη, σε επαφή με τη μεταλλοφορία, από τη γεώτρηση OLDD0025 στα 114,30 – 114,80 m, δ) σε γραφιτικά μάρμαρα με παρουσία αργιλικών και κλαστικών, πιθανόν μεταγενέστερων, υλικών κατά μήκος της διάτμησης, από τη γεώτρηση OLDD0008 στα 80,10 – 80,50 m .....	80
Εικόνα 4.8 Λιθοποιημένα / πυριτωμένα κατακλαστικά λατυποπαγή (breccia) α) ως ενδιάμεσο στάδιο της πλευρικής μετάβασης από ζώνη μυλωνιτώσης σε ρήγμα πληρωμένο με τεκτονική λιθοκονία (fault gouge) από τη γεώτρηση OLDD0022 στα 77,50 – 79,50 m, β), με τεφροπράσινο πυριτικό συνδετικό υλικό	

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Σελίδα x

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

(matrix) από τη γεώτρηση OLDD0007 στα 104,70 – 106,40 m γ) σε επαφή με τη μεταλλοφορία, έντονα αργιλικά εξαλλοιωμένο κατά τόπους, από τη γεώτρηση OLDD0012 στα 96,40 – 101,10 m, δ) σε επαφή με τη μεταλλοφορία, με πυριτικό συνδετικό υλικό (matrix), από τη γεώτρηση OLDD0013 στα 83,20 – 88,90 m.....	81
Εικόνα 4.9 Νεότερα ψαθηρά ρήγματα πληρωμένα με τεκτονική λιθοκονία (fault gouge) α) από τη γεώτρηση OLDD0015 στα 55,35 – 58,20 m, β) από τη γεώτρηση OLDD0011 στα 72,00 – 78,80 m. ....	82
Εικόνα 4.10 Ασθενείς Βιοιτιτικοί Γνεύσιμοι α) μέτρια εξαλλοιωμένοι, με απομειωμένα διατμητικά χαρακτηριστικά ασυνεχειών λόγω της παρουσίας σερικήτη, χλωρίτη και αργιλικών ορυκτών, από τη γεώτρηση OLDD0025 στα 85,50 - 85,90 m, β) μέτρια ως έντονα εξαλλοιωμένη βραχώμαζα με έντονη παρουσία αργιλικών ορυκτών κατά τόπους, που διατηρεί όμως εν γένει τη δομή της, από τη γεώτρηση OLDD0012 στα 44,10 – 48,00 m, γ) πλήρως αποσαθρωμένη βραχώμαζα με έντονη παρουσία αργιλικών ορυκτών και μηχανική συμπεριφορά που προσομοιάζει αυτήν εδαφικού υλικού, από τη γεώτρηση OLDD0019 στα 22,20 – 23,00 m.....	88
Εικόνα 4.11 Έντονα κερματισμένα και αποδιοργανωμένα μάρμαρα α) πλησίον της μεταλλοφορίας, με χαρακτηρισες μυλωνιτίωσης και τεκτονικού λατυποπαγούς (breccia), από τη γεώτρηση OLDD0018 στα 161,50 - 164,50 m, β) σε επαφή με τη μεταλλοφορία και με έντονη παρουσία μαγγανοξειδίων, από τη γεώτρηση OLDD0019 στα 89,90 – 90,60 m. ....	89
Εικόνα 4.12 Πηγματιτικές και λευκογρανιτικές διεισδύσεις α) έντονα εξαλλοιωμένες με σημαντική παρουσία αργιλικών ορυκτών, από τη γεώτρηση OLDD0018 στα 169,90 - 170,80 m, β) πλήρως εξαλλοιωμένη βραχώμαζα αποτελούμενη ως επί το πλείστον από αργιλικά ορυκτά, από τη γεώτρηση OLDD0015 στα 69,90 - 72,90 m. ....	90
Εικόνα 5.1 Απόσπασμα από το χώρο εργασίας του λογισμικού Datamine Studio 3 όπου απεικονίζεται, με μορφή τρισδιάστατου μοντέλου, η δομή του κοιτάσματος Ολυμπιάδας, οι σταθμοί διεξαγωγής των γεωτρήσεων του γεωτρητικού προγράμματος 2015 καθώς και τα ίχνη των γεωτρήσεων. ....	104

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Διαδικασία υπολογισμού RQD (Deere & Deere, 1988). .....	10
Σχήμα 2.2 Πρωτογενείς γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών (Hudson, 1989). .....	12
Σχήμα 2.3 Ακτινική παραμόρφωση κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε ελαστικό μέσο (Hoek, Kaiser, Bawden, 1995). .....	13
Σχήμα 2.4 Ισοτασικές καμπύλες κάθετα στον άξονα της σήραγγας (Hoek, 1980, από Mathis, 2001). .....	14
Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση του ιστορικού τάσεων-αστοχιών στην ευρύτερη περιοχή υπόγειου μεταλλευτικού έργου που κατασκευάζεται με τη μέθοδο εκσκαφής κι επανεπίχωσης. 1) Αρχικό εντατικό πεδίο, αναλλοίωτο πεδίο τάσεων. Το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, 2) Κατασκευή στοών προσπέλασης, το πεδίο των τάσεων μεταβάλλεται τοπικά, 3) Έναρξη εκμετάλλευσης και επανεπίχωση των εξοφλημένων στοών με το, μικρής συγκριτικά αντοχής, υλικό λιθογόμωσης. Ο προσανατολισμός και το μέγεθος των τάσεων μεταβάλλεται, ιδιαίτερα γύρω από τη στοά προσπέλασης, διευρύνοντας και επιδεινώνοντας τυχόν τασικές αστοχίες, 4) Η εκμετάλλευση συνεχίζεται πέραν της στοάς προσπέλασης, η λιθογόμωση ξεκινά να αναλαμβάνει φορτία, πιθανή δημιουργία ζωνών αποτόνωσης, ανακατανομή τάσεων η οποία μπορεί να προκαλέσει βαρυτικές αστοχίες (Mathis, 2001). .....	15
Σχήμα 2.6 Διάγραμμα του βασικού τεμάχους (key block) (Goodman & Shi, 1985, από Mathis, 2001). .....	16
Σχήμα 2.7 Γραφική απεικόνιση και εξίσωση κριτηρίου Mohr-Coulomb ( <a href="http://www.fhwa.dot.gov">www.fhwa.dot.gov</a> ). .....	17
Σχήμα 2.8 Περιβάλλουσα Hoek-Brown (Hoek, 2007). .....	21
Σχήμα 2.9 α) Υπολογισμός του συντελεστή JRC με βάση τα προφίλ τραχύτητας (Barton & Choubey, 1977), β) Υπολογισμός του συντελεστή JCS (Barton & Choubey, 1977). .....	22
Σχήμα 2.10 α) Διάγραμμα για τον υπολογισμό της βαθμολογίας της αντοχής του άρρηκτου βράχου, β) Διάγραμμα για τον υπολογισμό της βαθμολογίας του RQD γ), Διάγραμμα για τον υπολογισμό της βαθμολογίας της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών, για τρεις οικογένειες ασυνεχειών, δ) Διάγραμμα για το συσχετισμό μεταξύ του RQD και της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών σε περίπτωση που λείπει μία από τις δύο τιμές (Bieniawski, 1989). .....	28
Σχήμα 2.11 Κατηγορίες υποστήριξης με βάση το δείκτη Q και την παράμετρο De (Grimstad & Barton, 1993). .....	34
Σχήμα 2.12 Όρια εφαρμογής του συστήματος Q (Palmstrom & Broch, 2006). .....	36
Σχήμα 2.13 Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI (Marinos & Hoek, 2000) .....	39
Σχήμα 3.1 Τυπική διάταξη της ανάπτυξης ενός υπόγειου μεταλλείου (Pakalnis, 2015). .....	41
Σχήμα 3.2 Βασικές μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης α) με κενά μέτωπα, β) με γομούμενα μέτωπα, γ) με κατακρημιζόμενα μέτωπα (από Μπενάρδος, n.d.). .....	43
Σχήμα 3.3 Ταξινόμηση των βασικότερων από τις μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης μεταλλείων (Μπενάρδος, n.d.). .....	44
Σχήμα 3.4 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων α) με οριζόντια εκμετάλλευση, β) με επικλινή εκμετάλλευση και γ) σε κοιτάσματα αυξημένης κλίσης με διάνοιξη διαδοχικών οριζοντίων στοών σε διαφορετικά επίπεδα με κατερχόμενη φορά εκμετάλλευσης (Μπενάρδος, n.d.). .....	46

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Σχήμα 3.5 Μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κενά μέτωπα α) με την όρυξη ακτινικών διατρημάτων, β) με την όρυξη παράλληλων διατρημάτων (από Hans Hamrin, Atlas Corco 1980). .....	47
Σχήμα 3.6 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο υποχωρούντος μετώπου κατακόρυφου κρατήρα (Μπενάρδος, n.d.). .....	49
Σχήμα 3.7 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο κοπής και λιθογόμωσης (Μπενάρδος, n.d.). .....	50
Σχήμα 3.8 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο επιμήκους ευθύγραμμου μετώπου (Ρακαλνίς, 2015). .....	51
Σχήμα 3.9 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο διαδοχικών υποορόφων με κατακρήμνιση οροφής (Ρακαλνίς, 2015). .....	53
Σχήμα 3.10 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο κατακρήμνισης πατώματος (Μπενάρδος, n.d.). .....	54
Σχήμα 3.11 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο συμπτυσσόμενου μετώπου (Μπενάρδος, n.d.). .....	56
Σχήμα 3.12 Διαμήκης εκμετάλλευση στις στενές περιοχές του κοιτάσματος (Ελληνικός Χρυσός, 2011). .....	57
Σχήμα 3.13 Εγκάρσια εκμετάλλευση σε μεγάλα τμήματα του κοιτάσματος (Ελληνικός Χρυσός, 2011). .....	58
Σχήμα 3.14 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου των διπλών κοπών και λιθογομώσεων (Ελληνικός Χρυσός, 2011). .....	59
Σχήμα 3.15 Τεχνητά μέτρα υποστήριξης υπόγειων στοών α) παθητικά μέτρα – ξύλινα πλαίσια, β) ενεργητικά μέτρα – εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και προεντεταμμένα αγκύρια (Mathis, 2001). .....	60
Σχήμα 3.16 Συμβολή των συρματόσχοινων στην υποστήριξη διατομής κατά την διάνοιξη στοών σε πλαστικές συνθήκες (Mathis, 2001). .....	62
Σχήμα 3.17 Συρματόσχοινα και τρόπος χρήσης αυτών στη μεταλλευτική (Ρακαλνίς, 2005). .....	63
Σχήμα 3.18 Λειτουργία πλαισίων σε πλαστικές συνθήκες (Mathis, 2001). .....	63
Σχήμα 3.19 Μεταλλικοί «σύνδεσμοι» (straps) για εφαρμογή α) χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, β) με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Mathis, 2001). .....	65
Σχήμα 4.1 Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών όπου σημειώνεται η θέση της περιοχής μελέτης (τροποποιημένο από Μουντράκης, 2010). .....	69
Σχήμα 4.2 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής Μεταλλευτικών Εγκαταστάσεων Ολυμπιάδας (Ελληνικός Χρυσός, 2011). .....	70
Σχήμα 4.3 Σκαρίφημα του ευρύτερου χώρου της Σερβομακεδονικής Μάζας με τις κυριότερες πλουτωνικές εμφανίσεις και τις αντίστοιχες ηλικίες των ραδιοχρονολογήσεων (τροποποιημένο από Μουντράκης, 2010). .....	71
Σχήμα 4.4 Γεωλογική τοποθέτηση μεταλλείου Ολυμπιάδας (Rhys, 2013) κατά (Forward, 2011). .....	73
Σχήμα 4.5 Απόσπασμα από το χώρο εργασίας του λογισμικού Datamine Studio 3 όπου απεικονίζεται με μορφή τρισδιάστατου μοντέλου η δομή του κοιτάσματος Ολυμπιάδας, οι υπάρχουσες υποδομές καθώς και τα ίχνη των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. .....	74
Σχήμα 4.6 Σκαρίφημα με προσανατολισμό ΝΔ – ΒΑ κατά μήκος του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας, βασιζόμενο στη σύνθεση των τομών 800ΒΔ έως 1000ΒΔ, όπου παρουσιάζονται οι λιθολογικές ενότητες και οι τεκτονικές δομές καθώς και η θέση αυτών στο χώρο (Rhys, 2013). .....	79
Σχήμα 4.7 Τοπογραφικό ψηφιακό μοντέλο (DEM) με τις επιφανειακές εμφανίσεις ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης όπου διακρίνεται και το ρήγμα της Ολυμπιάδας. Τα ρήγματα προέρχονται	

από ψηφιοποίηση των Γεωλογικών χαρτών του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλα: Αρναία, Ιερισσός, Σταυρός και Στρατονίκη, (Ι.Γ.Μ.Ε., 1978, κλίμακα: 1:50.000) (Μιχαηλίδου, 2005). .....	83
Σχήμα 4.8 Νεοτεκτονικός χάρτης του ευρύτερου χώρου της περιοχής Στρατωνίου - Βαρβάρας - Ολυμπιάδας (από Νεοτεκτονικό χαρτη, Φύλλο Ροδολίβος, κλίμακα 1:100.000 Ο.Α.Σ.Π. - υπό έκδοση). 84	84
Σχήμα 4.9 Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I, II, III) του ελληνικού χώρου σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 (τελευταία τροποποίηση - 2003) (Παυλίδης, et al., 2010). .....	84
Σχήμα 5.1 Κατανομή των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής UCS για τους κύριους λιθολογικούς σχηματισμούς του μεταλλείου Ολυμπιάδας καθώς και για τη μεταλλοφορία μεικτών θειούχων. ....	92
Σχήμα 5.2 Κατανομή των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής UCS για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση. ....	93
Σχήμα 5.3 Κατανομή των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για τους κύριους λιθολογικούς σχηματισμούς του μεταλλείου Ολυμπιάδας καθώς και για τη μεταλλοφορία μεικτών θειούχων. ....	94
Σχήμα 5.4 Κατανομή των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση. ....	95
Σχήμα 5.5 Διαγράμματα Μονοαξονικής Αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) - Μέτρου Ελαστικότητας ( $E_i$ ) για τον προσδιορισμό της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	96
Σχήμα 5.6 Διαγράμματα Μονοαξονικής Αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) - Μέτρου Ελαστικότητας ( $E_i$ ) για τον προσδιορισμό της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση. ....	97
Σχήμα 5.7 Απόσπασμα από το χώρο εργασίας του λογισμικού Datamine Studio 3 όπου απεικονίζεται, με μορφή τρισδιάστατου μοντέλου, η δομή του κοιτάσματος Ολυμπιάδας και οι στοές στις οποίες διεξήχθησαν οι χαρτογραφήσεις μετώπων. ....	99
Σχήμα 5.8 Κυκλικά διαγράμματα της ποιότητας της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR '89 για κάθε κύρια λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων των στοών πρόσβασης του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	101
Σχήμα 5.9 Κυκλικά διαγράμματα της ποιότητας της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR '89 για κάθε κύρια λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος. ....	105

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2.1 Αποσάθρωση και εξαλλοίωση ακέραιου πετρώματος (ISRM, 1981).....	7
Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του μονοαξονική θλίψη. (ISRM, 1981)..	8
Πίνακας 2.3 Συσχέτιση ποιότητας πετρώματος με δείκτη ποιότητας βραχώμαζας RQD (Deere & Deere, 1988).....	10
Πίνακας 2.4 Τιμές της σταθεράς $m_i$ (Marinos & Hoek, 2000). ....	19
Πίνακας 2.5 Εκτίμηση του συντελεστή D για διάφορα είδη βραχώμαζας (Hoek, 2007). ....	20
Πίνακας 2.6 Παράμετροι, εύρος τιμών και βαθμολογίες με βάση το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας RMR 89 (Bieniawski, 1989). ....	26
Πίνακας 2.7 Βαθμολογία ανάλογα με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989). ....	27
Πίνακας 2.8 Κατηγορίες βραχώμαζας σύμφωνα με το άθροισμα των παραμέτρων του RMR (Bieniawski, 1989).....	27
Πίνακας 2.9 Ερμηνεία των κατηγοριών βραχώμαζας (Bieniawski, 1989). ....	27
Πίνακας 2.10 Οδηγίες υπολογισμού της παραμέτρου «Κατάσταση ασυνεχειών» (Bieniawski, 1989). ...	28
Πίνακας 2.11 Επιρροή του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην κατασκευή υπόγειων έργων (Bieniawski, 1989). ....	28
Πίνακας 2.12 Οδηγός για την επιλογή της προσωρινής υποστήριξης σε σήραγγα (Bieniawski, 1989). ...	29
Πίνακας 2.13 Παράμετροι, εύρος τιμών και βαθμολογίες με βάση το δείκτη ποιότητας βραχώμαζας Q (Barton, et al., 1974).....	32
Πίνακας 2.14 Ταξινόμηση ποιότητας βραχώμαζας κατά το σύστημα Q (Barton, et al., 1974). ....	33
Πίνακας 2.15 Τιμές της παραμέτρου ESR (Barton, et al., 1974), (NGI, 2013).....	34
Πίνακας 3.1 Κριτήρια επιλογής μεταλλευτικής μεθόδου (Μπενάρδος, n.d.).....	45
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και στατιστική ανάλυση επί των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	91
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και στατιστική ανάλυση επί των διάφορων τύπων γνευσίου που απαντώνται στο μεταλλείο Ολυμπιάδας. ....	93
Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας των εργαστηριακών δοκιμών που διενεργήθηκαν επί των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας.....	94
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας των εργαστηριακών δοκιμών που διενεργήθηκαν επί των διάφορων τύπων γνευσίου που απαντώνται στο μεταλλείο Ολυμπιάδας. ....	95
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) των εργαστηριακών δοκιμών που διενεργήθηκαν επί των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	96
Πίνακας 5.6 Διαγράμματα Μονοαξονικής Αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) - Μέτρου Ελαστικότητας ( $E_i$ ) για τον προσδιορισμό της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) για τους.....	97
Πίνακας 5.7 Τιμές RMR από τη χαρτογράφηση μετώπων κατά την ανάπτυξη των στοών πρόσβασης του Ανατολικού Κοιτάσματος .....	99

Πίνακας 5.8 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχόμαζας επί του συνόλου των χαρτογραφούμενων μετώπων γιαόπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για το σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων των στοών πρόσβασης του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	100
Πίνακας 5.9 Μέση τιμή του δείκτη RMR '89 και των συντελεστών αυτού ανά λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων των στοών πρόσβασης του Ανατολικού κοιτάσματος. ....	102
Πίνακας 5.10 Μέση τιμή συντελεστών RMR ανά κατηγορία ποιότητας βραχόμαζας .....	103
Πίνακας 5.11 Τιμές RMR όπως προκύπτουν από την περιγραφή πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος. ....	104
Πίνακας 5.12 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχόμαζας όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για το σύνολο των περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος. ....	106
Πίνακας 5.13 Μέση τιμή του δείκτη RMR '89 και των συντελεστών αυτού ανά λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος. ....	107
Πίνακας 5.14 Μέση τιμή συντελεστών RMR ανά κατηγορία ποιότητας βραχόμαζας .....	107
Πίνακας 5.15 Σύγκριση της μέσης τιμής και της ποιότητας της βραχόμαζας, όπως αυτή προκύπτει από το σύστημα RMR' 89, του γεωερευνητικού προγράμματος 2015 και δεδομένων παλαιότερων μελετών. ....	110
Πίνακας 5.16 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχόμαζας όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για τη ζώνη της μεταλλοφορίας και την περιβάλλουσα βραχόμαζα σύμφωνα με τα δεδομένα του τρέχοντος γεωερευνητικού προγράμματος. ....	110
Πίνακας 5.17 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχόμαζας όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για τη ζώνη της μεταλλοφορίας και την περιβάλλουσα βραχόμαζα σύμφωνα με τα δεδομένα παλαιότερων μελετών (SRK (UK), 1999). ....	111
Πίνακας 6.1 Τεχνικογεωλογικές ενότητες βραχόμαζας για την περιοχή του Ανατολικού κοιτάσματος του Μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	113
Πίνακας 6.2 Εύρος τιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες βραχόμαζας του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	114
Πίνακας 6.3 Γενικές κατηγορίες συμπεριφοράς της βραχόμαζας (Austrian Society for Geomechanics, 2010). ....	115
Πίνακας 6.4 Τύποι συμπεριφοράς της ανυποστήρικτης διατομής για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας. ....	117

## Πρόλογος

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος με ειδίκευση «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία».

Η εκπόνηση της Μεταπτυχιακής Διατριβής έγινε υπό την επίβλεψη του Δρ. Βασιλείου Μαρίνου, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή συμπληρώνουν οι Δρ. Κωνσταντίνος Βουδούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και Δρ. Αλέξανδρος Χατζηπέτρος, Επίκουρος του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Βασίλειο Μαρίνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση που μου προσέφερε αλλά και το ενδιαφέρον, την επιμονή και την κατανόηση του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Κωνσταντίνο Βουδούρη και Δρ. Αλέξανδρο Χατζηπέτρο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή καθώς και όλα τα μέλη και το προσωπικό του Τομέα Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Την ευγνωμοσύνη μου οφείλω να εκφράσω στην εταιρία Ελληνικός Χρυσός Ανώνυμη Εταιρία Μεταλλείων και Βιομηχανίας Χρυσού και ειδικότερα το Μεταλλείο Ολυμπιάδας για τη στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής ειδίκευσης καθώς και για την προσφορά των γεωτεχνικών δεδομένων στα οποία στηρίχθηκε η παρούσα διατριβή.

Τέλος θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους δικούς μου ανθρώπους για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.



## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Σκοπός της παρούσας διατριβής ειδίκευσης αποτελεί η εκτίμηση των ιδιοτήτων, των τεχνικογεωλογικών τύπων και της συμπεριφοράς της περιβάλλουσας βραχώμαζας αλλά και της μεταλλοφορίας του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε αρχικά στατιστική επεξεργασία και ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων, κατηγοριοποίηση και αξιολόγηση

Για την επίτευξη του σκοπού της διατριβής συλλέχθηκε και αξιολογήθηκε η διαθέσιμη βιβλιογραφία σχετικά με τις μεθόδους περιγραφής και ταξινόμησης της βραχώμαζας καθώς και κατασκευής και υποστήριξης υπόγειων έργων, με έμφαση στις μεθόδους κατασκευής και υποστήριξης υπόγειων μεταλλευτικών έργων.

Επιπλέον, αξιολογήθηκαν οι διαθέσιμες μελέτες που έχουν διεξαχθεί στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος ώστε να διευκρινιστούν οι επικρατούσες στην περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας γεωλογικές, γεωμορφολογικές, τεκτονικές, υδρογεωλογικές και τεχνικογεωλογικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, γεωλογικά και τεχνικογεωλογικά δεδομένα που αφορούν πλήθος χαρτογραφημένων μετώπων υπόγειων στοών αλλά και περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του μεταλλείου Ολυμπιάδας με σκοπό την εκτίμηση των επί τόπου συνθηκών.

Στη συνέχεια τα υπάρχοντα δεδομένα αναλύθηκαν στατιστικά με σκοπό τον προσδιορισμό των αντιπροσωπευτικών τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) και του μέτρου ελαστικότητας ( $E_i$ ) για κάθε λιθολογικό τύπο. Στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό της ποιότητας της βραχώμαζας, αντλώντας δεδομένα τόσο από τις χαρτογραφήσεις των μετώπων των υπόγειων στοών όσο και από τις περιγραφές των πυρήνων των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

Επιπλέον αξιολογήθηκε η ποιότητα της βραχώμαζας, σύμφωνα το σύστημα ταξινόμησης RMR'89, για κάθε έναν από τους λιθολογικούς τύπους. Διερευνήθηκαν οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται η απομείωση της τιμής του RMR για κάθε έναν από τους τύπους αυτούς και συγκρίθηκαν τα δεδομένα χαρτογράφησης μετώπων και περιγραφής γεωτρήσεων. Στη συνέχεια και με σκοπό τη σύγκριση των δεδομένων της παρούσας φάσης λειτουργίας του μεταλλείου με τα δεδομένα που αντλήθηκαν από παλαιότερες μελέτες που είχαν διεξαχθεί για λογαριασμό της TVX Hellas, τα δεδομένα διακρίθηκαν σε ζώνες γύρω από το σώμα της μεταλλοφορίας του Ανατολικού κοιτάσματος, με σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας που θα κληθεί να υποστηρίξει το υπόγειο άνοιγμα κατά την απόληψη του μεταλλεύματος.

Έπειτα η βραχόμαζα διακρίθηκε σε τεχνικογεωλογικές ενότητες, για κάθε μία από τις οποίες έγινε εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ( $\sigma_c$ ) και του μέτρου ελαστικότητας ( $E_i$ ). Τέλος, προσδιορίστηκαν οι αναμενόμενοι τύποι συμπεριφοράς και αστοχίας κατά την διάνοιξη των υπόγειων στοών.

## 1.2 Πηγή των πληροφοριών. Ελληνικός Χρυσός

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης πραγματεύεται τη διερεύνηση της ποιότητας της βραχόμαζας του Ανατολικού κοιτάσματος του Μεταλλείου Ολυμπιάδας. Για τη διεξαγωγή των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα χαρτογραφήσεων περισσότερων από 900 μετώπων υπόγειων στοών, 2.000m περίπου περιγραφών δειγματοληπτικών γεωτρήσεων καθώς και πλήθος μελετών που διεξήχθησαν για λογαριασμό της Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. ή των προκάτοχων της.

Η Ελληνικός Χρυσός, Ανώνυμος Εταιρεία Μεταλλείων και Βιομηχανίας Χρυσού, ιδρύθηκε το Δεκέμβριο του έτους 2003 με την απόκτηση του ενεργητικού της εταιρείας TVX Hellas Α.Ε. από το Ελληνικό Δημόσιο και μεταξύ αυτών το μεταλλείο Ολυμπιάδας. Εδράζεται στη ΒΑ Χαλκιδική, εντός των ορίων του Δήμου Αριστοτέλη, περίπου 100km ανατολικά της Θεσσαλονίκης και είναι κάτοχος των Μεταλλείων Κασσάνδρας συνολικής μεταλλευτικής παραχώρησης 264.000 στρεμμάτων (Ελληνικός Χρυσός Α.Ε., 2011).

## 1.3 Η ιστορία των Μεταλλείων Κασσάνδρας

Η μεταλλευτική δραστηριότητα στην περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής ξεκινάει από την αρχαιότητα και συγκεκριμένα εντοπίζεται στις αρχές της κλασικής αρχαιότητας (6ο αιώνα π.Χ.) με πλήθος παλαιών μεταλλευτικών σκωριών. Κατά τη ρωμαϊκή περίοδο παρατηρείται μια γενικότερη παρακμή και η μεταλλευτική δραστηριότητα ξαναρχίζει κατά τους Βυζαντινούς χρόνους με κέντρο τη σημερινή Στρατονίκη. Στις αρχές του 15ου αιώνα, τα μεταλλεία της ΒΑ Χαλκιδικής ακμάζουν μετά την κατάκτηση από τους Τούρκους (Ζαφείρης, et al., 2001).

Για πρώτη φορά το 1893 εμφανίζεται η επωνυμία Μεταλλεία Κασσάνδρας κατά την παραχώρηση των μεταλλευτικών δικαιωμάτων από την Οθωμανική Αυτοκρατορία στη Γάλλο-Οθωμανική Α.Ε., με έδρα το Παρίσι. Το όνομα οφείλεται στην τότε ονομασία της χερσονήσου (χερσόνησος της Κασσάνδρας). Περίπου 72.000 τόνοι μεταλλεύματος εξορύχθηκαν και πέρασαν από μεταλλουργική κατεργασία έως το 1900. Το 1901 η εταιρεία αρχίζει την επιφανειακή εκμετάλλευση του κοιτάσματος σιδηροπυρίτη στο μεταλλείο του «Μαντέμ Λάκκου» (Ζαφείρης, et al., 2001).

Τη Γάλλο-Οθωμανική εταιρεία διαδέχεται το 1927 η Ανώνυμη Ελληνική Εταιρεία Χημικών Προϊόντων & Λιπασμάτων ΑΕΕΧΠ&Λ) η οποία αγοράζει επιπλέον τα κοιτάσματα της Κύπρου, της Ερμιόνης, του



Ωροπού και της Κορώνης, ενώ ταυτόχρονα ιδρύει εργοστάσιο λιπασμάτων στην Δραπετσώνα. Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο η πλειοψηφία των μετοχών της ΑΕΕΧΠ&Λ περιέρχονται στην ιδιοκτησία του Μποδοσάκη, ο οποίος με την δραστηριότητά του δίνει ιδιαίτερη ώθηση στον μεταλλευτικό κλάδο. Επίκεντρο των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων της εταιρείας γίνεται το Στρατώνι. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 η ΑΕΕΧΠ&Λ κατασκευάζει στην παραλία του Στρατωνίου εργοστάσιο εμπλουτισμού και ξεκινάει την παραγωγή και επεξεργασία μικτών θειούχων συμπτυκνωμάτων σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη και Γαληνίτη. Παράλληλα αρχίζει η εκμετάλλευση του μεταλλείου μικτών θειούχων της Ολυμπιάδας. Το 1976 κατασκευάζεται το νέο εργοστάσιο εμπλουτισμού στην Ολυμπιάδα, οπότε τα προϊόντα της εκεί μεταλλευτικής δραστηριότητας μεταφέρονται έτοιμα προς φόρτωση στο Στρατώνι (Ζαφείρης, et al., 2001).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 το Ελληνικό Κράτος αποφασίζει τη δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού μέσω της κρατικής ΜΕΤΒΑ στην περιοχή της Ολυμπιάδας. Η απόφαση αυτή, όμως, δε θα υλοποιηθεί ποτέ λόγω των αντιδράσεων της τοπικής κοινωνίας. Το 1992 η ΑΕΕΧΠ&Λ μπαίνει σε ειδική εκκαθάριση εν λειτουργία από την Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος. Το Δεκέμβριο του 1995, μετά από δύο άκαρπους διαγωνισμούς τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των Μεταλλείων Κασσάνδρας και το σύνολο των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων περιέρχονται στην TVX Hellas, θυγατρική της канаδικής μεταλλευτικής εταιρείας TVX Gold . Πρωταρχικός σκοπός της εταιρείας είναι η δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού στην περιοχή της Ολυμπιάδας. Παράλληλα, η TVX έχει άδεια εκμετάλλευσης του κοιτάσματος μικτών θειούχων στις «Μαύρες Πέτρες». Η επένδυση στην Ολυμπιάδα δεν θα υλοποιηθεί ποτέ λόγω των αντιδράσεων της τοπικής κοινωνίας, καθώς και μίας αρνητικής απόφασης του Συμβουλίου της Επικρατείας (ΣτΕ) το 2002. Άλλη μία αρνητική απόφαση του ΣτΕ οδηγεί την εταιρεία, στις αρχές του 2003, στην διακοπή των εργασιών στο μεταλλείο Μαύρες Πέτρες (Ζαφείρης, et al., 2001).

Τον Ιανουάριο του 2004 τα μεταλλευτικά δικαιώματα των Μεταλλείων Κασσάνδρας και το σύνολο των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων περιέρχεται στην ιδιοκτησία της εταιρείας ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΡΥΣΟΣ Α.Ε. με ειδικό νόμο που επικυρώνεται από τη Βουλή. Η καινούργια εταιρεία προχωρά αμέσως στη σύνταξη Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την επαναλειτουργία του Μεταλλείου των Μαύρων Πετρών. Το μεταλλείο ξεκινά και πάλι την λειτουργία του τον Οκτώβριο του 2005 με την παραγωγή συμπτυκνωμάτων γαληνίτη και σφαλερίτη (Ζαφείρης, et al., 2001).

Παράλληλα, η Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. υποβάλλει τον Ιανουάριο του 2006, ενιαίο επιχειρηματικό σχέδιο για την παράλληλη ανάπτυξη και εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της Ολυμπιάδας και των Σκουριών, το οποίο προβλέπει και τη δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού στην ευρύτερη περιοχή του Στρατωνίου. Μετά την κατ' αρχήν αποδοχή του επιχειρηματικού σχεδίου από την κυβέρνηση, η Ελληνικός Χρυσός καταθέτει τον Μάιο του ίδιου χρόνου Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΠΠΕ). Μετά την θετική γνωμοδότηση των 5 συναρμοδίων υπουργείων (Υπουργείο Ανάπτυξης, Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Υπουργείο Πολιτισμού, Υπουργείο Γεωργικής Ανάπτυξης και Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας) επί της ΠΠΕ τον Οκτώβριο του 2009, η εταιρεία κατέθεσε την τελική

---

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 3

Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) το τέλος του 2009, η έγκριση της οποίας αποτελεί την τελική περιβαλλοντική αδειοδότηση του επενδυτικού σχεδίου (Ζαφείρης, et al., 2001).

## 2 Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Περιγραφή του βράχου και της βραχώμαζας

Αρχικά κρίνεται απαραίτητη η διάκριση μεταξύ των όρων «βράχος» και «βραχώμαζα».

- Ως βράχος (άρρηκτος, ακέραιος) νοείται το συνεχές, πολυκρυσταλλικό ορυκτό στερεό σώμα που αποτελείται από συνδεδεμένους κόκκους ορυκτών. Ο άρρηκτος βράχος είναι απαλλαγμένος από ασυνέχειες μεγάλης κλίμακας (διακλάσεις, στρώση κ.λπ.), μπορεί όμως να περιέχει ασυνέχειες μικρής κλίμακας, όπως σχιστότητα, φολίδωση κ.λπ. (Deere, 1968).
- Ως βραχώμαζα χαρακτηρίζεται το σύνολο βράχου και ασυνεχειών (διακλάσεων, στρώσεων κ.λπ.). Η βραχώμαζα αποτελεί δηλαδή το σύμπλεγμα τεμαχίων βράχου που βρίσκονται σε επαφή κατά μήκος των πλευρικών επιφανειών τους και διατηρούνται σε συναρμογή μέσω δυνάμεων τριβής. Αποτελεί δηλαδή το σύνολο του πετρώματος στη φυσική του κατάσταση, όπως αυτό εμφανίζεται στο ύπαιθρο, ως ασυνεχές στερεό μέσο με μεταβαλλόμενες κατά περιοχές ιδιότητες.

Η περιγραφή αποτελεί το πρώτο βήμα για την τεχνικογεωλογική και γεωτεχνική εκτίμηση του βράχου και της βραχώμαζας. Η μεθοδολογία περιγραφής του βράχου ή / και της βραχώμαζας θα πρέπει να διακρίνεται από συνοχή και ομοιομορφία ενώ τα δεδομένα που συλλέγονται θα πρέπει να καταγράφονται σε κατάλληλα διαμορφωμένα δελτία ώστε να είναι δυνατή μεταγενέστερη επεξεργασία και αξιοποίηση τους (Bell, 2007).

Η περιγραφή του βράχου μπορεί να γίνει είτε από γεωλογική είτε από τεχνικογεωλογική άποψη. Στην πρώτη περίπτωση η προέλευση, τα ορυκτά συστατικά του πετρώματος, η δομή και οι όποιες αλλαγές έχει υποστεί το πέτρωμα μετά τη γένεση του αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά καταγραφής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η περιγραφή του περιλαμβάνει τις φυσικές και δυναμικές παραμέτρους του βράχου καθώς και τις παραμέτρους αντοχής του.

#### 2.1.1 Γεωλογική περιγραφή της βραχώμαζας

Η βασική γεωλογική έρευνα καλείται να δώσει πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του πετρώματος (λιθολογία), τη δομή και τον ιστό του, το βαθμό αποσάθρωσης ή / και εξαλλοίωσης καθώς και επιμέρους χαρακτηριστικά όπως το χρώμα, το μέγεθος των κόκκων, τη σκληρότητα κ.α.. Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζονται λεπτομερώς οι κυριότερες από αυτές τις παραμέτρους οι οποίες επιπλέον επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά αλλά και τη γεωτεχνική ταξινόμηση της εκάστοτε βραχώμαζας.

##### 2.1.1.1 Λιθολογία

Η λιθολογική περιγραφή και η πετρογραφική ταξινόμηση του πετρώματος παρουσιάζει μεγάλη σημασία από τεχνικογεωλογική άποψη. Ιδιαίτερα όταν η ονοματολογία των σχηματισμών δεν είναι σαφής (π.χ. μεταϊζήματα, Τριτογενείς διεισδύσεις, Τεταρτογενή ηφαιστειακά κ.λπ.) κρίνεται απαραίτητη η λιθολογική περιγραφή των τεχνικογεωλογικών αυτών ενοτήτων (Anonymous, 2001)

**Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα**

**Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας**

**Σελίδα 5**

Ο τύπος του πετρώματος, ο οποίος καθορίζεται κυρίως από τον τρόπο γένεσης αυτού (πυριγενές, ιζηματογενές, μεταμορφωμένο) καθώς και την ορυκτολογική του σύσταση, σχετίζεται άμεσα με τις μηχανικές του ιδιότητες. Συνεπώς η ορυκτολογική σύσταση επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων και αν και δεν είναι δυνατόν να προκύψουν γενικής χρήσης ποσοτικές συσχετίσεις μεταξύ ορυκτολογικής σύστασης και αντοχής, για μερικά πετρώματα τέτοιου είδους συσχετίσεις έχουν προσδιοριστεί (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).

### 2.1.1.2 Δομή πετρώματος

Με το γενικό όρο «δομή» περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του ιστού και της υφής των πετρωμάτων. Συγκεκριμένα, ο όρος «ιστός» αναφέρεται στο σχήμα και το μέγεθος (απόλυτο ή σχετικό) των κρυστάλλων των κόκκων και των κενών καθώς επίσης και στον τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους. Αντίθετα, ο όρος «υφή» αναφέρεται στη διάταξη των συστατικών του πετρώματος στο χώρο και γενικά στα μακροσκοπικά γνωρίσματα των πετρωμάτων, όπως ο αποχωρισμός, η κατάκλαση κ.α. (Ελευθεριάδης & Κορωναίος, 2006).

### 2.1.1.3 Τεκτονικές δομές

Η φύση και η κατανομή των τεκτονικών στοιχείων στη βραχώμαζα, γνωστή ως «δομή της βραχώμαζας» αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία που μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τις τεκτογεωλογικές ιδιότητες της βραχώμαζας και κατ' επέκταση την απαιτούμενη υποστήριξη αυτής κατά την κατασκευή τεχνικών έργων. Επιπλέον είναι δυνατόν να επηρεάζουν την κατανομή της μεταλλοφορίας μέσα στο πέτρωμα και συνεπώς τη μεταλλευτική μέθοδο εκμετάλλευσης. Οι κυριότερες τεκτονικές δομές που οφείλουν να καταγράφονται κατά τη γεωλογική περιγραφή της βραχώμαζας αποτελούνται από τις επιφάνειες στρώσης, τις πτυχές, τα ρήγματα, τις ζώνες διάτμησης και τις φλέβες (Brady & Brown, 2005). Η καταγραφή των στοιχείων αυτών και των χαρακτηριστικών τους, αποτελεί αντικείμενο και της τεκτογεωλογικής περιγραφής της βραχώμαζας καθώς επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές της ιδιότητες και συνεπώς τη συμπεριφορά της κατά τη κατασκευή υπόγειων έργων.

### 2.1.1.4 Βαθμός αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης

Η αποσάθρωση, μηχανική ή χημική, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του βράχου και της βραχώμαζας. Στην τεχνική γεωλογία ο όρος «αποσάθρωση» περιλαμβάνει τόσο τη χημική αποσύνθεση όσο και το μηχανικό αποχωρισμό ως αποτέλεσμα της εξαλλοίωσης. Διακρίνονται όμως από την αποσάθρωση τα αποτελέσματα της χημικής εξαλλοίωσης (π.χ. υδροθερμική εξαλλοίωση) καθώς μπορεί να μη συσχετίζονται επακριβώς με τις κλάσεις διάκρισης της αποσάθρωσης.

- Η χημική εξαλλοίωση αναφέρεται στις ποικίλες φυσικές διεργασίες που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της χημικής σύστασης ή του συστήματος κρυστάλλωσης των ορυκτών και κατ' επέκταση των πετρωμάτων. Διέπεται από τους νόμους της θερμοδυναμικής, σχετίζεται με την εξοικονόμηση ενέργειας και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Συχνά οφείλεται στην παρουσία καταλυτών, και ιδιαίτερα του νερού, ενώ μπορεί να οφείλεται και σε φαινόμενα ανάδρομης μεταμόρφωσης. Η χημική εξαλλοίωση αποτελεί χαρακτηριστικό ιδιαίτερης σημασίας στη

μεταλλευτική όχι μόνο λόγω της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας αλλά και λόγω της πιθανότητας σύνδεσης της με την παρουσία μεταλλοφορίας.

- Διαγνωστικά στοιχεία της παρουσίας αλλά και του βαθμού αποσάθρωσης ή / και εξαλλοίωσης αποτελούν η αλλαγή του χρώματος και της δομής του πετρώματος, η αλλαγή της ποιότητας των ορίων μεταξύ των κόκκων, των ασυνεχειών και του υλικού πλήρωσης αυτών καθώς και η απομείωση των φυσικών του ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα και η αντοχή.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η ταξινόμηση του πετρώματος σύμφωνα με το βαθμό αποσάθρωσης του.

**Πίνακας 2.1 Αποσάθρωση και εξαλλοίωση ακέραιου πετρώματος (ISRM, 1981).**

Ταξινόμηση	Περιγραφή
<b>Υγιές</b>	Κανένα ίχνος αποσάθρωσης. Πιθανός αποχρωματισμός κατά μήκος των κύριων ασυνεχειών.
<b>Ελαφρά αποσαθρωμένο</b>	Αποχρωματισμός του βράχου αλλά και των επιφανειών ασυνέχειας ως ένδειξη αποσάθρωσης και πιθανόν απομείωσης της αντοχής.
<b>Μέτρια αποσαθρωμένο</b>	Το πέτρωμα έχει αποσυντεθεί σε ποσοστό <50%. Παρατηρείται υπολειμματική παρουσία είτε φρέσκου είτε αποχρωματισμένου πετρώματος.
<b>Έντονα αποσαθρωμένο</b>	Το πέτρωμα έχει αποσυντεθεί σε ποσοστό >50%. Παρατηρείται υπολειμματική παρουσία είτε φρέσκου είτε αποχρωματισμένου πετρώματος.
<b>Πλήρως αποσαθρωμένο</b>	Το σύνολο του βραχώδους υλικού είναι αποσαθρωμένο. Η αρχική δομή του πετρώματος εν μέρει διατηρείται.

### 2.1.2 Τεχνικογεωλογική περιγραφή της βραχώμαζας

Τα πετρώματα διαφέρουν από τα υπόλοιπα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές καθώς περιέχουν ασυνέχειες (διακλάσεις, στρώσεις, σχιστότητα κ.α.) που καθιστούν τη μάζα τους ασυνεχή.

Λόγω της ρωγμάτωσης αλλά και του μεταβλητού, κατά θέσεις, βαθμού αποσάθρωσης ή / και εξαλλοίωσής της η βραχώμαζα παρουσιάζει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς η εκτίμηση των αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της δε μπορεί να γίνει με άμεσο τρόπο, όπως στα ισότροπα γεωυλικά (έδαφος, άρρηκτος βράχος), λόγω της αδυναμίας διαμόρφωσης δοκιμίων αντιπροσωπευτικών του συνόλου της. Γίνεται έμμεσα μέσω του υπολογισμού των παραμέτρων του άρρηκτου βράχου και της απομείωσης αυτών με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων ταξινόμησης. Σύμφωνα με τα συστήματα αυτά η βραχώμαζα ταξινομείται σε κατηγορίες και στη συνέχεια εκτιμώνται οι μηχανικές παράμετροι κάθε κατηγορίας με χρήση εμπειρικών σχέσεων.

Οι παράμετροι ταξινόμησης που θα επιλεγούν για την εκτίμηση και των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς ενός γεωυλικού κάτω από ορισμένη εντατική κατάσταση δεν είναι προκαθορισμένες. Η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος στο πεδίο μπορεί να αποδοθεί μέσα από μία σειρά παραμέτρων που πρέπει να αξιολογηθούν σαν σύνολο. Οι παράμετροι αυτές πρέπει να συνδυάζουν την ποιοτική και

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

ποσοτική περιγραφή των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας. Για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

- Η μηχανική αντοχή του πετρώματος
- Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (RQD).
- Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους.
- Η παρουσία υπόγειου νερού.

Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται λεπτομερώς οι παράμετροι αυτές.

### 2.1.2.1 Μηχανική αντοχή άρρηκτου πετρώματος

Η βραχώμαζα αποτελείται από δύο βασικά συστατικά, τον άρρηκτο βράχο και τις ασυνέχειες που τον διατέμνουν (ρήγματα, ζώνες διάτμησης, διακλάσεις κ.λπ.).

Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή του μοναξονική θλίψη. (ISRM, 1981).

Συμβολισμός	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή επί τύπου δοκιμής	Αντοχή $\sigma_{ci}$ (Μρα)	Παραδείγματα
R6	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί	>250	Υγιής βασάλτης, χαλαζιτης, διάβασης, γνεύσιος, γρανίτης, πυριτιόλιθος
R5	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς χτύπους με γεωλογικό σφυρί	100-250	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, γρανοδιορίτης, περιδοτίτης, ρυόλιθος, τόφος
R4	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα χτύπους με γεωλογικό σφυρί	50-100	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
R3	Μέτρια ισχυρό	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι	25-50	Σκυρόδεμα, φυλλίτης, σχιστόλιθος, λυόλιθος
R2	Ασθενές	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι	5-25	Κιμωλία, αργιλόλιθος, ποτάσα, μάργα, αργιλικός σχιστόλιθος, ορυκτό αλάτι
R1	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με το μαχαίρι.	1-5	Έντονα αποσαθρωμένοι ή εξαλλοιωμένοι βράχος
R0	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με το νύχι	0,25-1	Στιφρό υλικό πλήρωσης ρήγματος

Η μηχανική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος αποτελεί μία από τις βασικές του παραμέτρους και αντιπροσωπεύει την ικανότητα ενός υλικού να ανθίσταται σε εξωτερικές δυνάμεις. Η αντοχή οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής των ορυκτών του πετρώματος και του συνδετικού τους υλικού, καθώς και στις δυνάμεις τριβής που εμποδίζουν την ολίσθηση. Η εξέταση της αντοχής του άρρηκτου βράχου ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 και διενεργείται κατά βάση σε κυλινδρικά δοκίμια (Bell, 2007), ενώ τα δείγματα που επιλέγονται θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του συνόλου της βραχώμαζας που θα συναντηθεί

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

κατά την εκσκαφή (Mathis, 2015). Στην πράξη προσδιορίζονται πειραματικά τρεις αντοχές του πετρώματος, η αντοχή σε θλίψη, σε εφελκυσμό και σε διάτμηση. Από αυτές η θλιπτική αντοχή είναι η πλέον σημαντική και μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα ή άμεσα με τη χρήση εργαστηριακών ή επί τόπου δοκιμών.

Από συσχετίσεις αποτελεσμάτων αντοχής σε μοναξονική θλίψη με άλλες παραμέτρους του βραχώδους υλικού φαίνεται ότι:

- Αύξηση της πυκνότητας συνοδεύεται και από αύξηση της αντοχής.
- Αύξηση του πορώδους συνοδεύεται και από μείωση της αντοχής.
- Αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας προκαλεί μείωση της αντοχής.

### 2.1.2.2 Δείκτης κερματισμού βραχώμαζας - RQD

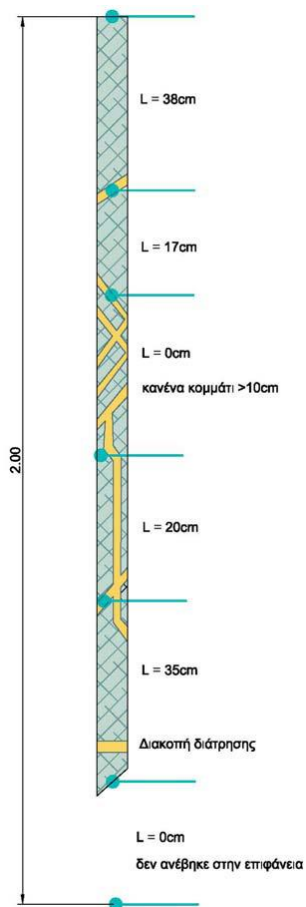
Ο δείκτης ποιότητας βραχώμαζας RQD (Rock Quality Designation) διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Don U. Deere, το 1964 (Deere, 1964) και έγινε ευρύτερα γνωστός το 1968 (Deere, 1968). Στόχος του RQD είναι η ποσοτική εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας και αποτελεί το ποσοστό απόληψης άρρηκτου βράχου από γεώτρηση οποιουδήποτε προσανατολισμού. Η τιμή του δείκτη RQD ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος του μήκους όλων των επί μέρους τεμαχίων άρρηκτου βράχου με μήκος ίσο ή μεγαλύτερο από 100 mm (4 in) προς το συνολικό μήκος του εκάστοτε βήματος προχώρησης (ASTM (2003), Deere & Deere (1988)).

Ο δείκτης RQD αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχώμαζας καθώς αν και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνος του για την πλήρη περιγραφή τη βραχώμαζας έχει αποδειχτεί πολύ χρήσιμος ως οδηγός για την επιλογή των μέτρων υποστήριξης σηράγγων λόγω της απλότητας, οικονομικότητας και επαναληψιμότητας του στην εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας (Deere & Deere, 1988).

Παρά τα όσα πλεονεκτήματα του όμως ο δείκτης RQD παρουσιάζει και τα εξής μειονεκτήματα:

- Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων.
- Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας και εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχώμαζας.
- Δεν λαμβάνει υπόψη του την παρουσία, το πάχος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών.

Η διαδικασία μέτρησης του μήκους και του υπολογισμού του RQD φαίνεται στο Σχήμα 2.1, ενώ στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η κατάταξη των πετρωμάτων με βάση την τιμή του δείκτη RQD.



$$RQD = \frac{\sum (\text{μήκους τεμαχίων μήκους} > 10 \text{ cm})}{\text{Ολικό μήκος του πυρήνα}} \times 100\%$$

Πίνακας 2.3 Συσχέτιση ποιότητας πετρώματος με δείκτη ποιότητας βραχώμαζας RQD (Deere & Deere, 1988)

Ποιότητα πετρώματος	RQD (%)
Πολύ πτωχή	0-25
Πτωχή	25-50
Μέτρια	50-75
Καλή	75-90
Εξαιρετική	90-100

Σχήμα 2.1 Διαδικασία υπολογισμού RQD (Deere & Deere, 1988).

### 2.1.2.3 Ασυνέχειες και ποιότητα ασυνεχειών

Η ευστάθεια της βραχώμαζας στις υπαίθριες και υπόγειες εκσκαφές αλλά και στις θεμελιώσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη και τον προσανατολισμό των γεωλογικών ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις, ρήγματα κ.λπ.). Η καταγραφή, ανάλυση και παρουσίαση των γεωλογικών αυτών δομών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την όλη διερεύνηση της ευστάθειας ενός τεχνικού έργου σε βραχώδεις σχηματισμούς.

Ως ασυνέχεια ορίζεται κάθε επίπεδο αδυναμίας της βραχώμαζας που διαχωρίζει τα τεμάχια του ακέραίου πετρώματος και παρουσιάζει πολύ μικρή έως αμελητέα εφελκυστική αντοχή. Οι ασυνέχειες της βραχώμαζας μπορεί να οφείλονται σε ρήγματα και διακλάσεις (τεκτονικής προέλευσης ασυνέχειες), σε επιφάνειες στρώσης (ιζηματογενούς προέλευσης ασυνέχειες), σε επιφάνειες σχιστότητας (τεκτονικής, μεταμορφικής ή και ιζηματογενούς προέλευσης) ή και σε τυχαίες ρωγμώσεις. Διάκριση των ασυνεχειών μπορεί να γίνει σε δύο κύριες ομάδες με βάση τη συστηματική ή μη εμφάνιση τους:

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

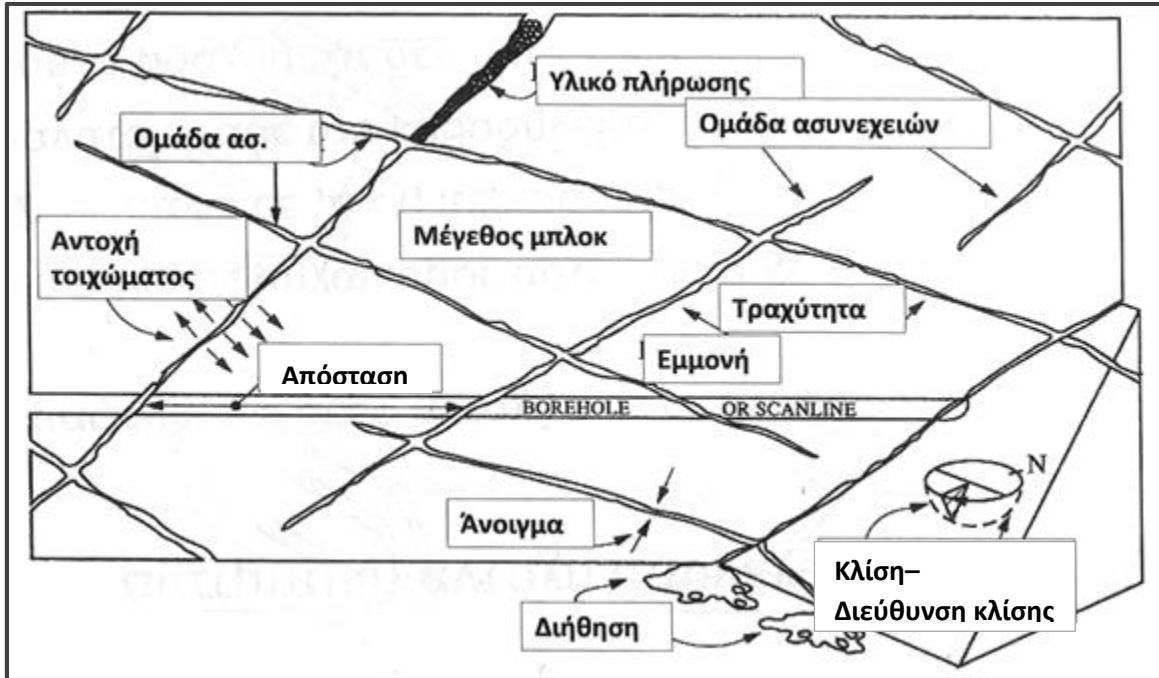


- Συστήματα ασυνεχειών. Πρόκειται για συστηματικά εμφανιζόμενες ασυνέχειες που παρουσιάζουν κοινή γεωμετρία και μηχανική συμπεριφορά και οφείλονται στη δράση συγκεκριμένων γεωλογικών διεργασιών, π.χ. στρώση.
- Μοναδιαίες ασυνέχειες. Πρόκειται για μεμονωμένες ασυνέχειες, χωρίς συστηματική εμφάνιση (στην κλίμακα του έργου), π.χ. ρήγματα.

Η καταγραφή των ασυνεχειών και η ημιποσοτική περιγραφή τους γίνεται με βάση τις παρακάτω δέκα παραμέτρους οι οποίες προτείνονται και προδιαγράφονται από τη Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM, 1978c). Στο Σχήμα 2.2 αναπαρίστανται γραφικά οι δέκα αυτές παράμετροι.

- Προσανατολισμός: Αποτελεί τη θέση της ασυνέχειας στο χώρο. Περιγράφεται από τη διεύθυνση κλίσης (ή παράταξη) και τη γωνία μέγιστης κλίσης της επιφάνειας της ασυνέχειας.
- Απόσταση: Πρόκειται για τη μέση ή τη συνηθέστερη κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών.
- Εμμονή: Το μήκος του ίχνους της ασυνέχειας όπως μετράται στην επιφάνεια παρατήρησης. Αποτελεί μία αδρή εκτίμηση του μήκους της ασυνέχειας. Η διακοπή μίας ασυνέχειας από μία άλλη ή από άρρηκτο τέμαχος βράχου μειώνει την εμμονή.
- Τραχύτητα: Οι διάφορες μορφές, όπως οδοντώσεις, βυθίσματα και εξάρσεις που συχνά παρουσιάζουν οι επιφάνειες των ασυνεχειών, ως προς το μέσο επίπεδο της ασυνέχειας, συμβάλλοντας στην αύξηση της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας κατά μήκος της ασυνέχειας. Μεγάλης κλίμακας ασυνέχειες μπορούν να επηρεάσουν τοπικά ακόμη και την κλίση της επιφάνειας.
- Αντοχή τοιχωμάτων: Η ισοδύναμη θλιπτική αντοχή των γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Μπορεί να είναι χαμηλότερη της αντοχής του πετρώματος λόγω αποσάθρωσης ή εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων. Αποτελεί σημαντική συνιστώσα της διατμητικής αντοχής, όταν τα τοιχώματα της ασυνέχειας είναι σε επαφή.
- Άνοιγμα: Η κάθετη απόσταση μεταξύ των γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας η οποία μπορεί να παραμένει κενή ή να παρεμβάλλεται νερό.
- Υλικό πλήρωσης: Το υλικό που διαχωρίζει τα γειτονικά τοιχώματα της βραχώμαζας και εμφανίζεται συνήθως ασθενέστερο από το υπόλοιπο πέτρωμα. Τυπικά υλικά πλήρωσης αποτελούν οι άμμοι, η ιλύς, οι άργιλοι, τα λατυποπαγή (breccia), η τεκτονική λιθοκονία (gouge) και οι μυλωνίτες. Περιλαμβάνουν επιπλέον μικρού πάχους επικαλύψεις από ορυκτά όπως ο χαλαζίας και ο ασβεστίτης, που οδηγούν στην επούλωση των ασυνεχειών και την εμφάνισή τους με τη μορφή φλεβών και φλεβιδίων.
- Συνθήκες υπόγειου νερού - Διήθηση: Ροή νερού και εμφανής υγρασία είτε σε μεμονωμένες ασυνέχειες είτε στο σύνολο της βραχώμαζας.
- Αριθμός οικογενειών ασυνεχειών: Ο αριθμός των οικογενειών των ασυνεχειών που αποτελούν τέμνονται μεταξύ τους. Η βραχώμαζα μπορεί να τέμνεται επιπλέον από μοναδιαίες ασυνέχειες.

- Μέγεθος τεμαχίου: Το μέγεθος των τεμαχίων βράχου προκύπτει από την τομή των οικογενειών των ασυνεχειών. Οι μοναδιαίες ασυνέχειες μπορούν επίσης να επηρεάσουν το μέγεθος και το σχήμα των τεμαχίων.



Σχήμα 2.2 Πρωτογενείς γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών (Hudson, 1989).

## 2.2 Μηχανική συμπεριφορά και αστοχία της βραχώμαζας στα υπόγεια έργα

Η συμπεριφορά της βραχώμαζας ελέγχεται από το γεωλογικό καθεστώς που επικρατεί στην περιοχή και κυρίως από τη λιθολογία και την τεκτονική. Για το σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου είναι απαραίτητη η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των πιθανών μηχανισμών αστοχίας, δηλαδή των μηχανισμών διακινδύνευσης ενός τεχνικού έργου. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η περιγραφή της βραχώμαζας ως μηχανικό μέσο, η λεπτομερή δηλαδή περιγραφή της βραχώμαζας ως συνεχές (αντοχή άρρηκτου βράχου, παραμορφωσιμότητα κ.λπ.) αλλά και ως ασυνεχές (διατμητική αντοχή ασυνεχειών) μέσο σε συνδυασμό με τις συνθήκες φόρτισης και τους τυχόν περιορισμούς.

### 2.2.1 Μηχανισμοί αστοχίας βραχώμαζας

Οι μηχανισμοί αστοχίας της βραχώμαζας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- **Τασικές αστοχίες:** Αστοχία της βραχώμαζας λόγω υπέρβασης της αντοχής της κάτω από την υφιστάμενη εντατική κατάσταση.

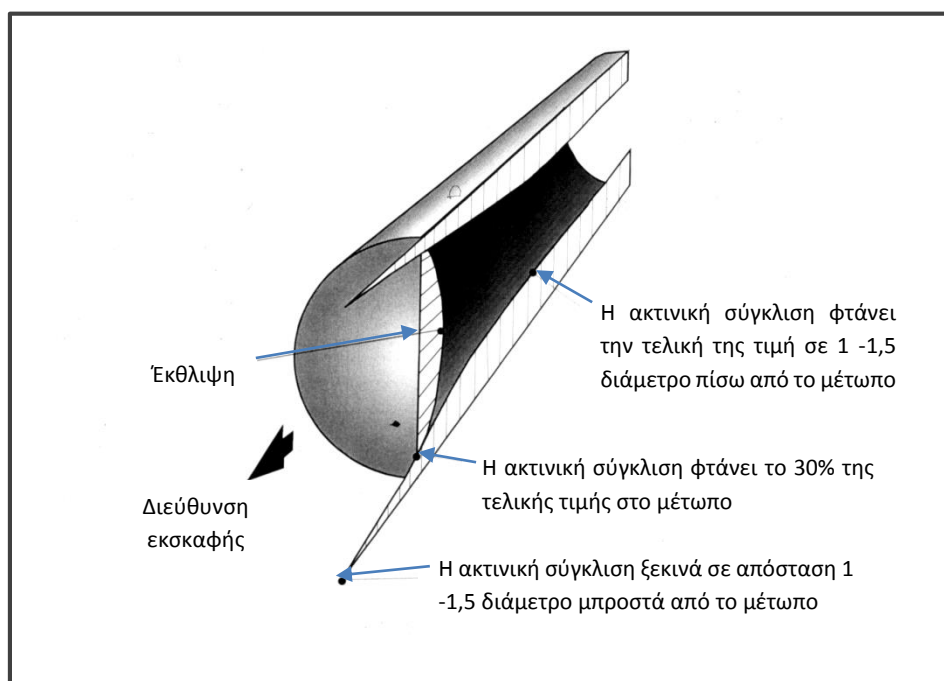
- **Δομικές ή βαρυτικές αστοχίες (αστοχία κατά το επίπεδο ασυνέχειας):** Αστοχία κατά μήκος προϋπαρχόντων επιπέδων αδυναμίας λόγω της υπέρβασης της διατμητικής αντοχής αυτών.

Ανεξάρτητα από τον τύπο της αστοχίας όμως, η βραχώμαζα θα αστοχήσει είτε λόγω διάτμησης, όταν η φόρτιση είναι θετική, είτε λόγω εφελκυσμού, όταν η φόρτιση είναι αρνητική. Σε περιπτώσεις βραχώμαζας που τέμνεται από ένα σύνολο ασυνεχειών η αστοχία ελέγχεται κυρίως από τη διατμητική αντοχή των άρρηκτων τεμαχών και των επιφανειών ασυνέχειας, καθώς η εφελκυστική αντοχή κατά μήκος των ασυνεχειών είναι πολύ μικρή ή και μηδενική.

### 2.2.1.1 Τασικές αστοχίες

Πρόκειται για αστοχίες που προκαλούνται από ολόκληρο το δακτύλιο της βραχώμαζας γύρω από το υπόγειο έργο λόγω της υφιστάμενης εντατικής κατάστασης. Εκδηλώνονται κυρίως σε βραχώμαζες με χαμηλές τιμές παραμέτρων αντοχής και μέτρο ελαστικότητας, με τη μορφή συγκλίσεων, όταν οι επιβαλλόμενες τάσεις είναι μεγαλύτερες από την αντοχή τους.

Κατά την κατασκευή ενός υπόγειου έργου δύο κατανομές τάσεων γύρω από το υπόγειο άνοιγμα πρέπει να ληφθούν υπόψη, η κατανομή κατά μήκος του άξονα του έργου και η κατανομή κάθετα στον άξονα του.



Σχήμα 2.3 Ακτινική παραμόρφωση κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε ελαστικό μέσο (Hoek, Kaiser, Bawden, 1995).

Η αξονική κατανομή τάσεων θα πρέπει να εξεταστεί κατά προτεραιότητα καθώς μεταβάλλεται συνεχώς κοντά στο μέτωπο εκσκαφής, ενώ σταθεροποιείται όσο η απόσταση από αυτό αυξάνει. Συγκεκριμένα,

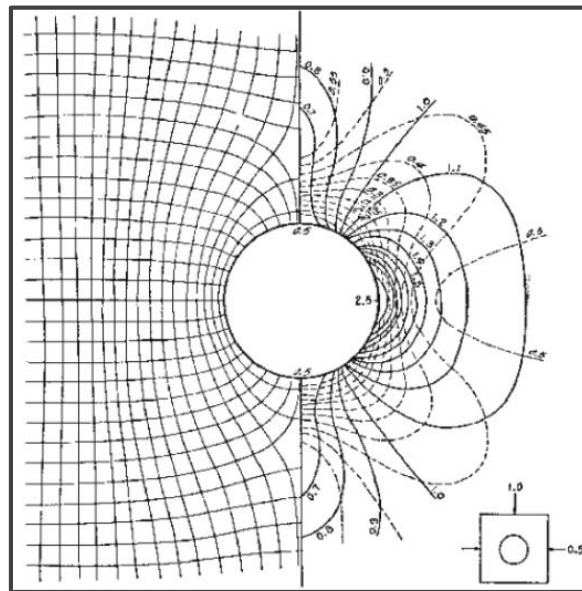
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 13

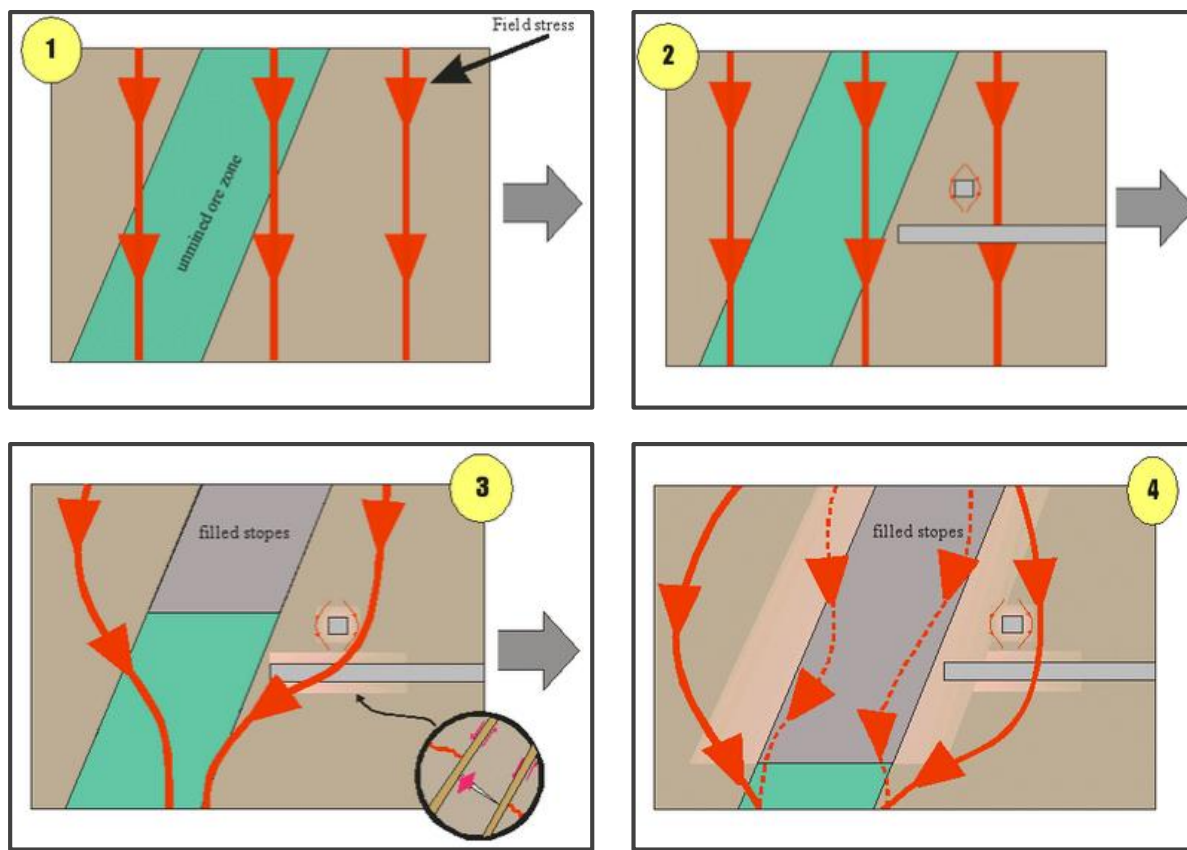
όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, σε ελαστικό μέσο, η μετρήσιμη μετατόπιση αρχίζει περίπου μισή διάμετρο μπροστά από το μέτωπο, στο μέτωπο εκσκαφής περίπου το ένα τρίτο της συνολικής μετατόπισης έχει λάβει χώρα ενώ πλήρης μετατόπιση επιτυγχάνεται περίπου 1,5 διάμετρο πίσω από αυτό. Η απόσταση αυτή είναι πιθανόν μεγαλύτερη για περισσότερο πλαστικές και παραμορφώσιμες βραχώμαζες.

Στο σημείο όπου το μέτωπο δεν επιδρά πλέον στο τασικό πεδίο που περικλύει το άνοιγμα αρχίζει να αποκτά μεγαλύτερη σημασία η κατανομή των τάσεων κάθετα στον άξονα της στοάς. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται μια τυπική κατανομή των τάσεων κάθετα στο άξονα στοάς, κυκλικής διατομής, με αναλογία οριζόντιας τάσης ίση με το μισό της κατακόρυφης.



Σχήμα 2.4 Ισοτασικές καμπύλες κάθετα στον άξονα της σήραγγας (Hoek, 1980, από Mathis, 2001).

Τα υπόγεια μεταλλευτικά έργα παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα της συνεχούς μεταβολής των τάσεων γύρω από τα υπόγεια ανοίγματα αλλά και στην ευρύτερη περιοχή του έργου εξαιτίας της ίδιας της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Οποιοδήποτε υπόγειο άνοιγμα μπορεί να μεταβάλλει την εντατική κατάσταση στην γύρω περιοχή, με συνέπεια την αύξηση των τάσεων σε κάποιες περιοχές και τη μείωση αυτών σε κάποιες άλλες, καθώς επίσης και τη δυνατότητα αντιστροφής του προσήμου τους (μετατροπή των θλιπτικών τάσεων σε εφελκυστικές). Στο Σχήμα 2.5 αναπαρίσταται σχηματικά η επίδραση της κατασκευής υπόγειων μεταλλευτικών έργων με τη μέθοδο της εκσκαφής κι επανεπίχωσης στο καθεστώς των τάσεων της ευρύτερης περιοχής.



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση του ιστορικού τάσεων-αστοχιών στην ευρύτερη περιοχή υπόγειου μεταλλευτικού έργου που κατασκευάζεται με τη μέθοδο εκσκαφής κι επανεπίχωσης. 1) Αρχικό εντατικό πεδίο, αναλλοίωτο πεδίο τάσεων. Το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, 2) Κατασκευή στοών προσπέλασης, το πεδίο των τάσεων μεταβάλλεται τοπικά, 3) Έναρξη εκμετάλλευσης και επανεπίχωση των εξοφλημένων στοών με το, μικρής συγκριτικά αντοχής, υλικό λιθογώμωσης. Ο προσανατολισμός και το μέγεθος των τάσεων μεταβάλλεται, ιδιαίτερα γύρω από τη στοά προσπέλασης, διευρύνοντας και επιδεινώνοντας τυχόν τασικές αστοχίες, 4) Η εκμετάλλευση συνεχίζεται πέραν της στοάς προσπέλασης, η λιθογώμωση ξεκινά να αναλαμβάνει φορτία, πιθανή δημιουργία ζωνών αποτόνωσης, ανακατανομή τάσεων η οποία μπορεί να προκαλέσει βαρυντικές αστοχίες (Mathis, 2001).

### 2.2.1.2 Δομικές ή βαρυντικές αστοχίες

Πρόκειται για αστοχίες που ελέγχονται αποκλειστικά από την παρουσία γεωλογικών δομών (ασυνχειών) και προκύπτουν όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στα τεμάχια της βραχώμαζας υπερνικήσουν την διατμητική αντοχή των ασυνχειών που ορίζουν τα τεμάχια αυτά. Οι πιο κοινές βαρυντικές αστοχίες που συναντιούνται στα υπόγεια έργα είναι είτε σφήνες (αποτελούμενες από τρεις έδρες) είτε πρίσματα (αποτελούμενα από τέσσερις ή περισσότερες έδρες) και προκύπτουν ως:

- Ολίσθηση κατά μήκος μίας επιφάνειας,
- Ολίσθηση κατά μήκος της τομής δύο επιφανειών,
- Αποκόλληση και ελεύθερη πτώση (μόνο από την οροφή).

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

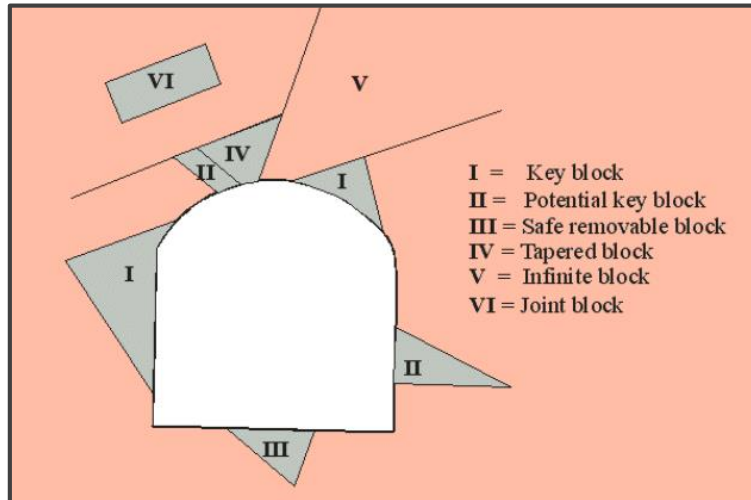
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 15



Σύμφωνα με τη θεωρία των Goodman και Shi (key block concept, (Goodman & Shi, 1985)) για να πραγματοποιηθεί μία μεγάλη αστοχία θα πρέπει πρώτα να μετακινηθεί το βασικό τεμάχος (key block), ενώ για να πραγματοποιηθεί μία αστοχία θα πρέπει:

- Μία από τις έδρες της σφήνας / πρίσματος προς αστοχία να είναι ελεύθερη,
- Να παρουσιάζεται διαστολή κατά μήκος των ασυνεχειών που ελέγχουν την αστοχία,
- Να ακολουθείται ένας από τους παραπάνω τρόπους αστοχίας.



Σχήμα 2.6 Διάγραμμα του βασικού τεμάχους (key block) (Goodman & Shi, 1985, από Mathis, 2001).



Εικόνα 2.1 Αστοχία βραχώδους σφήνας με ελεύθερη πτώση από την οροφή κατά τη φάση διεύρυνσης και αποκατάστασης της ερευνητικής στοάς -210 του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

### 2.2.2 Κριτήρια αστοχίας βραχώμαζας

Στην προσπάθεια κατανόησης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας, η οποία αποτελεί μία από τις κύριες παραμέτρους στην κατασκευή τεχνικών έργων, μελετήθηκε εκτενώς η συμπεριφορά του υλικού του άρρηκτου βράχου οδηγώντας στην πρόταση διαφόρων, κατά καιρούς, κριτηρίων αστοχίας.

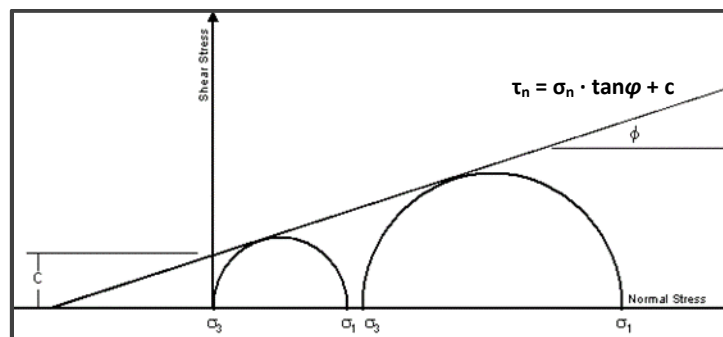
Το πρώτο κριτήριο αστοχίας παρουσιάστηκε το 1773 από τον Coulomb ο οποίος διατύπωσε την άποψη ότι η αστοχία μιας επίπεδης επιφάνειας οφείλεται στην αύξηση της διατμητικής τάσης πάνω από τα όρια της διατμητικής της αντοχής. Ο Coulomb θεώρησε ότι η διατμητική τάση ( $\tau$ ) είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής σε αυτήν τάσης ( $\sigma_n$ ).

Επέκταση του κριτηρίου έγινε από τον Mohr και τη θεώρηση ότι τα επίπεδα διάτμησης είναι συζυγή και ότι η παραπάνω συνάρτηση δεν είναι πάντα γραμμική. Επίσης προτάθηκε και γραφική παρουσίαση των παραπάνω κριτηρίων στο επίπεδο  $\sigma$ - $\tau$ .

Το 1921 ο Griffith θεώρησε ότι η θραύση των ψαθυρών υλικών αρχίζει όταν ξεπερασθεί η εφελκυστική αντοχή από τάσεις που δημιουργούνται στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών στο υλικό. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν πιο πολύπλοκα, μη γραμμικά, εμπειρικά κριτήρια, όπως το κριτήριο Hoek-Brown (1980). Το κριτήριο αυτό περιγράφει τις οριακές καταστάσεις αστοχίας για όλες τις ισότροπες βραχώμαζες, που η συμπεριφορά τους ελέγχεται από το αλληλοκλείδωμα των γωνιωδών βραχωδών τεμαχών.

#### 2.2.2.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb αποτελεί γραμμική σχέση ( $\tau_n = f(\sigma_n)$ ) και είναι το απλούστερο κριτήριο για την προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Η γραφική του απεικόνιση είναι η εφαπτόμενη (περιβάλλουσα) ευθεία στους κύκλους Mohr, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν κρίσιμους συνδυασμούς των κύριων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_3$ ). Λόγω της γραμμικότητας του κριτηρίου, η αντοχή καθορίζεται από δύο παραμέτρους, που ορίζονται στο επίπεδο ( $\sigma, \tau$ ), τη γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi$ ) και τη συνοχή ( $c$ ).



Σχήμα 2.7 Γραφική απεικόνιση και εξίσωση κριτηρίου Mohr-Coulomb ([www.fhwa.dot.gov](http://www.fhwa.dot.gov)).

Το κριτήριο Mohr-Coulomb έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην εδαφομηχανική αλλά και στην βραχομηχανική. Παρά την ευρεία του όμως αποδοχή η ευθεία περιβάλλουσα των κύκλων Mohr δεν ταυτίζεται πάντα με τα πειραματικά αποτελέσματα των οποίων η περιβάλλουσα τείνει να είναι καμπύλη.

### 2.2.2.2 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown περιγράφει τις οριακές καταστάσεις αστοχίας της ισότροπης βραχώμαζας, της βραχώμαζας δηλαδή που είτε είναι άρρηκτη είτε αποτελείται από περισσότερες από τρεις οικογένειες ασυνχειών. Αποτελεί δηλαδή ένα κριτήριο που δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει το αλληλοκλείδωμα των μεταξύ βραχωδών τεμαχίων που απαντώνται σε μία κερματισμένη βραχώμαζα και όχι σχηματισμούς όπου η δομή του αρχικού πετρώματος έχει εντελώς καταστραφεί (εδάφη ή εντελώς αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες βραχώμαζες) και η συμπεριφορά της συνολικής μάζας του γεωυλικού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τριβής των κόκκων μεταξύ τους, τη συνοχή της συγκολλητικής ύλης ή την κολλώδη υφή των σωματιδίων.

Το κριτήριο Hoek-Brown προτάθηκε το 1980 με βάση μελέτες του Hoek για τις μορφές αστοχίας του άρρηκτου βράχου και μελέτες του Brown για τη συμπεριφορά της βραχώμαζας. Το 1988 οι Hoek και Brown (Hoek & Brown, 1988) παρουσίασαν μία ανανεωμένη έκδοση του κριτηρίου σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη η πίεση πόρων ( $\sigma' = \sigma - u$ ) αλλά και οι προσπάθειες των Priest και Brown για τον προσδιορισμό των σταθερών  $m$  και  $s$ , το 1992 οι Hoek, Wood και Shah (Hoek, et al., 1992) παρουσιάζουν το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας όπου λαμβάνεται υπόψη η μηδενική εφελκυστική αντοχή της τεμαχόδους βραχώμαζας, ενώ το 1995 παρουσιάστηκε η τελική, γενικευμένη, μορφή του κριτηρίου (Hoek, et al., 1998) το οποίο και περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

Όπου:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

Και:

$\sigma'_1, \sigma'_3$	Μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας.
$\sigma_{ci}$	Μοναξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.
$m_b, s, \alpha$	Σταθερές που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της βραχώμαζας.
GSI	Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής.
D	Συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό διαταραχής της βραχώμαζας γύρω από τη διάνοιξη της σήραγγας (Πίνακας 2.5).



- m<sub>i</sub> Σταθερά που αναφέρεται στον άρρηκτο βράχο και εκφράζει το αλληλοκλείδωμα των συστατικών των ορυκτών και των κόκκων και εξαρτάται από τον εκάστοτε πετρογραφικό τύπο (πετρογραφική σταθερά) ( Πίνακας 2.4).
- m<sub>b</sub> Η απομειωμένη τιμή m<sub>i</sub> για τη βραχώμαζα.

Πίνακας 2.4 Τιμές της σταθεράς m<sub>i</sub> (Marinos & Hoek, 2000).

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλασσικό	Κροκαλοπαγή *	Ψαμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλασσικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρηγίς 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3 Γρανοδιорίτης (29 ± 3)	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ. Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	


\* Η τιμή εξαρτάται από το υλικό συγκόλλησης.

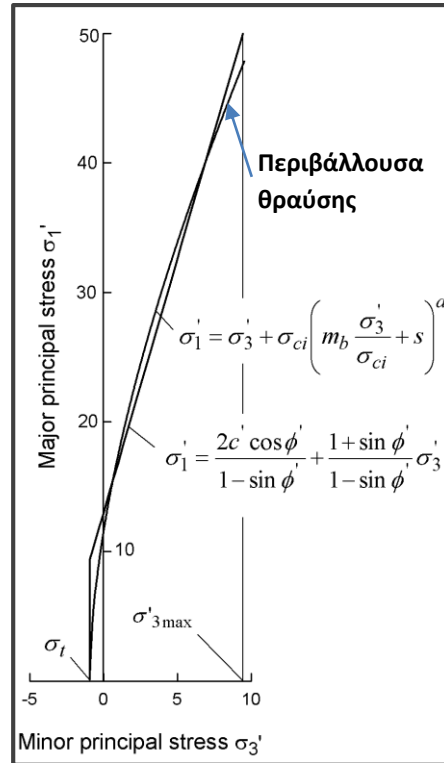
Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown ορίζει τη σχέση μεταξύ των κύριων τάσεων στην κατάσταση αστοχίας με δεδομένο ότι όλες οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στην εξίσωση του κριτηρίου μπορούν να υπολογιστούν είτε εμπειρικά είτε πειραματικά. Η σχέση που περιγράφει το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown είναι της μορφής  $\sigma_1 = f(\sigma_3)$  και μπορεί να απεικονιστεί σε ένα σύστημα συντεταγμένων με άξονες  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ . Η καμπύλη που ορίζεται αποτελεί την περιβάλλουσα αστοχίας της βραχώμαζας, καθώς αποτελεί το γεωμετρικό τόπο όλων των ζευγών των κύριων τάσεων που οδηγούν σε αστοχία. Όλα τα

**Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα**

σημεία που βρίσκονται κάτω από την περιβάλλουσα δεν αντιπροσωπεύουν κατάσταση αστοχίας. Τα σημεία που βρίσκονται επί της περιβάλλουσας αντιπροσωπεύουν οριακή κατάσταση αστοχίας. Η περιοχή πάνω από την περιβάλλουσα είναι μία μη εφικτή περιοχή, γιατί αντιπροσωπεύει εντατικές καταστάσεις, οι οποίες δεν πρόκειται ποτέ να συμβούν, αφού η βραχώμαζα θα έχει ήδη αστοχήσει.

Πίνακας 2.5 Εκτίμηση του συντελεστή  $D$  για διάφορα είδη βραχώμαζας (Hoek, 2007).

Εμφάνιση της βραχώμαζας	Περιγραφή της βραχώμαζας	Προτεινόμενη τιμή του $D$
	Άριστης ποιότητας ελεγχόμενη έκρηξη ή εκσκαφή με χρήση TBM που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας	$D = 0$
	Μηχανική ή εκσκαφή με το χέρι σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζες (όχι έκρηξη) που συντελεί σε ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχώμαζας  Όπου προβλήματα συγκλίσεων συντελούν σε σημαντική ανύψωση του δαπέδου, η διαταραχή μπορεί να είναι έντονη εκτός και αν τοποθετηθεί ένα προσωρινό ανάστροφο τόξο, όπως στη φωτογραφία	$D = 0$  $D = 0.5$  Όχι ανάστροφο τόξο
	Πολύ πτωχής ποιότητας εκρήξεις σε σήραγγες σε σκληρό βράχο που συντελούν σε σοβαρές τοπικές φθορές, εκτεινόμενες κατά 2 ή 3 m, εντός της περιβάλλουσας βραχώμαζας	$D = 0.8$
	Μικρής κλίμακας εκρήξεις σε πρηνή πολιτικού μηχανικού που συντελούν σε μέτριες φθορές της βραχώμαζας, ειδικά αν χρησιμοποιείται ελεγχόμενη έκρηξη όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας. Ωστόσο, λόγω ανακούφισης των τάσεων παρουσιάζονται ορισμένες διαταραχές.	$D = 0.7$ Καλή έκρηξη $D = 1.0$ Πτωχή έκρηξη
	Πρηνή πολύ μεγάλο λατομείου δέχονται σημαντικές διαταραχές εξαιτίας ισχυρής παραγωγής εκρήξεων και, επιπλέον, ανακούφιση των τάσεων λόγω απομάκρυνσης των υπερκείμενων  Σε κάποιους μαλακότερους βράχους, η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανική άρωση και χρήση προωθητήρων με λεπίδες, ώστε ο βαθμός της φθοράς στα πρηνή να είναι μικρότερος	$D = 1.0$ Εκρήξεις Παραγωγής  $D = 0.7$ Μηχανική εκσκαφή



Σχήμα 2.8 Περιβάλλουσα Hoek-Brown (Hoek, 2007).

### 2.2.2.3 Κριτήριο Barton για διατμητική αντοχή ασυνεχειών

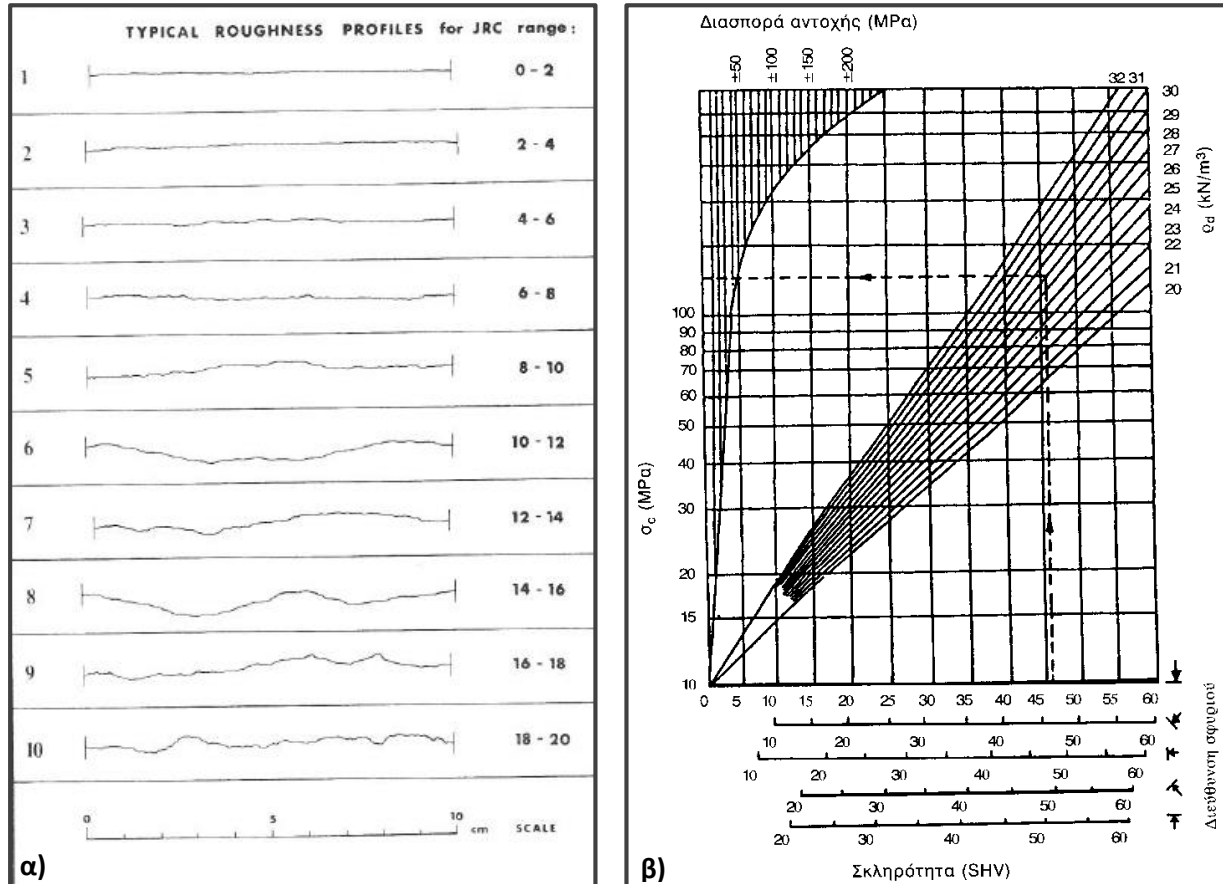
Το κριτήριο Barton προέρχεται από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για τα εδαφικά υλικά και αναφέρεται στην οριακή κατάσταση αστοχίας ασυνεχειών με μηδενική συνοχή ( $c=0$ ) στις οποίες υπάρχει επαφή μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Το κριτήριο Barton εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tau = \sigma_n \tan[\phi_b + JRC \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n})]$$

Όπου:

- $\tau$  Η διατμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας για τη δεδομένη ορθή τάση  $\sigma_n$ .
- $\sigma$  Η ορθή τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας.
- $\phi_b$  Η βασική γωνία τριβής της ασυνέχειας.
- JRC: Συντελεστής που προκύπτει με βάση το προφίλ της τραχύτητας της ασυνέχειας (Σχήμα 2.9).

JCS Είναι η αντοχή του βράχου στην επιφάνειας της ασυνέχειας. Η τιμή του συντελεστή JCS λαμβάνεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 2.9 με βάση τη δοκιμή σκληρότητας κατά Schmidt και το ειδικό βάρος του βράχου.



Σχήμα 2.9 α) Υπολογισμός του συντελεστή JRC με βάση τα προφίλ τραχύτητας (Barton & Choubey, 1977), β) Υπολογισμός του συντελεστή JCS (Barton & Choubey, 1977).

### 2.3 Γεωτεχνικές ταξινομήσεις βραχώμαζας

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή τεχνικών έργων απαιτεί τον αριθμητικό προσδιορισμό πλήθους παραμέτρων και ιδιοτήτων που σχετίζονται τόσο με τις ιδιότητες της βραχώμαζας όσο και με τις επί τόπου συνθήκες της θέσης του έργου. Παρά τον ισχυρισμό ότι η γεωλογία δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για κατασκευή τεχνικών έργων καθώς και η απαίτηση για ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό οδήγησε, μέσω της εξέλιξης της τεχνικογεωλογικής έρευνας, στην ποσοτικοποίηση της ποιότητας της βραχώμαζας μέσω της ανάπτυξης εμπειρικών συστημάτων γεωτεχνικής ταξινόμησης.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Ως ταξινόμηση της βραχώμαζας ορίζεται η κατηγοριοποίηση του γεωυλικού σύμφωνα με τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας του με σκοπό την τυποποίηση του, την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών του και την εκτίμηση της μηχανικής του συμπεριφοράς. Σύμφωνα με τους Einstein, et al. (1979) ένα σύστημα ταξινόμησης θα πρέπει:

- Να εφαρμόζεται εύκολα.
- Να χρησιμοποιεί εύκολα προσδιορίσιμες παραμέτρους.
- Να αναπαριστά με ακρίβεια τη συμπεριφορά της βραχώμαζας.
- Να αποφεύγει την υποκειμενικότητα.
- Να εγγυάται την ασφάλεια και την οικονομία.

Ενώ κατά τον Bieniawski (1989) τα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας στοχεύουν στην:

- Ταυτοποίηση των βασικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχώμαζας.
- Διαίρεση μίας ορισμένης μάζας πετρώματος σε ομάδες με παρόμοια μηχανική συμπεριφορά.
- Συμβολή στην κατανόηση των χαρακτηριστικών ομάδων πετρωμάτων.
- Συσχετισμό των εμπειριών που αποκτήθηκαν από συνθήκες που συναντήθηκαν σε διάφορες περιοχές.
- Απόκτηση ποσοτικών δεδομένων και κατευθυντήριων γραμμών για το σχεδιασμό.
- Θέσπιση κοινής βάσης επικοινωνίας μεταξύ μηχανικών και γεωλόγων και δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων.

Τα προαναφερθέντα στοιχεία προβάλλουν τα τρία κυριότερα πλεονεκτήματα της ταξινόμησης της βραχώμαζας:

- Βελτίωση της ποιότητας των επί τόπου ερευνών θεωρώντας ως ελάχιστα δεδομένα εισόδου τις παραμέτρους ταξινόμησης.
- Παραγωγή ποσοτικών δεδομένων για το σχεδιασμό τεχνικών έργων.
- Αποτελεσματικότερη επικοινωνία σε ένα έργο μέσω της καλύτερης μηχανικής θεώρησης.

Στα αρχικά στάδια ενός έργου, λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα της βραχώμαζας, η χρήση συστημάτων ταξινόμησης μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη. Αν και η εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης είναι ιδιαίτερα ελκυστική, δεν θα πρέπει να υποκαθιστά αλλά να συμπληρώνει τη γεωλογική και τεχνική κρίση στην εκτίμηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας. Επιπλέον, οι διάφορες ταξινομήσεις έχουν κάποια όρια εφαρμογής και είναι προφανές ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις αναμενόμενες γεωλογικές και εντατικές καταστάσεις. Είναι σημαντικό λοιπόν τα συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας να εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου η βραχώμαζα και η γενική γεωλογική κατάσταση προσομοιάζει περισσότερο τις περιπτώσεις στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη τους (Hoek, 2007).

### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας αναπτύσσονται εδώ και πάνω από 100 χρόνια, από τότε που ο Ritter (1879) προσπάθησε να επισημοποιήσει μία εμπειρική προσέγγιση για το σχεδιασμό σιηράγγων και συγκεκριμένα για την επιλογή των μέτρων υποστήριξης. Το πρώτο κύριο σύστημα ταξινόμησης για την κατασκευή σιηράγγων με χρήση υποστήριξης από μεταλλικά πλαίσια προτάθηκε από τον Terzaghi το 1946 λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις βασικές προσεγγίσεις για το σχεδιασμό εκσκαφών σε βράχο: την αναλυτική, την παρατηρησιακή και την εμπειρική. Στη συνέχεια και έπειτα από εμπειρία που αποκτήθηκε από μεταλλευτικά έργα και έργα πολιτικού μηχανικού οι ταξινομήσεις βραχώμαζας αποτέλεσαν, και αποτελούν μέχρι και σήμερα, αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού υπόγειων έργων.

Μερικά από τα σημαντικότερα συστήματα ταξινόμησης, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους πλήθος παραμέτρων και τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια, είναι:

- RMR (Rock Mas Rating - Bieniawski (1973)),
- Q (Rock Quality Index - Barton, et al. (1974)),
- GSI (Geological Strenght Index - Hoek, Wood and Shah (1992)).

### 2.3.1 Γεωμηχανική ταξινόμηση – RMR

Το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας RMR, ή αλλιώς γεωμηχανική ταξινόμηση, αναπτύχθηκε από τον Bieniawski το 1972 - 1973, τροποποιήθηκε, με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από κατασκευές, και παρουσιάστηκε το 1979. Έλαβε την τελική του μορφή το 1989, χωρίς όμως να έχει αλλάξει η βασική του φιλοσοφία, παρά τις ποικίλες τροποποιήσεις που δέχτηκε με σκοπό την επέκταση του πεδίου εφαρμογής του (μεταλλευτική, Laubscher (1977, 1984), μεταλλευτική σε σκληρό βράχο, Kendorski et al. (1983), ανθρακωρυχεία, Unal (1983), Newman and Bieniawski (1986), θεμελίωση φράγματος Serafim and Pereira (1983), σήραγγες, Gonzalez de Vallejo (1983), ευστάθεια πρανών, Romana (1985), ινδικά ανθρακωρυχεία (Venkateswarlu, 1986)) (Bieniawski, 1989).

#### 2.3.1.1 Μεθοδολογία

Για την ποσοτική περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας με βάση το RMR απαιτούνται περισσότερες από μία μεταβλητές ή δείκτες, σε αντίθεση με προγενέστερα συστήματα όπως το RQD, οι οποίες μπορούν εύκολα να μετρηθούν στο ύπαιθρο. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η αντοχή του άρρηκτου βράχου,
- Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας, RQD.
- Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.
- Η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών.
- Οι συνθήκες υπόγειου νερού.

Η κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές έχει μία βαθμολογία, το άθροισμα των οποίων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR της βραχώμαζας. Στον Πίνακα 2.6 παρατίθενται οι παράμετροι που συνυπολογίζονται για την εκτίμηση του δείκτη RMR, το εύρος των τιμών τους καθώς και οι αντίστοιχες βαθμολογίες.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Να σημειωθεί ότι για την εφαρμογή του RMR η βραχώμαζα διαιρείται σε ενότητες με κοινά μηχανικά χαρακτηριστικά που αντικατοπτρίζουν την ποιότητα της βραχώμαζας στην κλίμακα του έργου και όχι μικρές εναλλαγές μέσα σ' αυτήν. Εξαιρέση αποτελούν ζώνες μεταλλοφορίας, ζώνες ρηγμάτων και διάτμησης ή ζώνες πολύ πτωχής ποιότητας που πρέπει να επισημανθούν (Bieniawski (1989), Dempers et al. (2010)). Έπειτα λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί στις μέσες τυπικές συνθήκες κάθε ενότητας. Σε οριακές περιπτώσεις μεταξύ των κατηγοριών καθώς και για την εξάλειψη της εντύπωσης απότομης μετάβασης μεταξύ αυτών μπορούν αντί του Πίνακας 2.6 να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα των Σχήμα 2.10 και Πίνακας 2.10.

Με βάση την τιμή του RMR η βραχώμαζα κατατάσσεται σε μία από τις πέντε κατηγορίες του Πίνακας 2.8, ενώ στον Πίνακας 2.9 προσδιορίζεται ο χρόνος αυτοϋποστήριξης και οι μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας.

Μετά τον υπολογισμό της βασικής τιμής του RMR μπορεί να ληφθεί υπόψη και η έκτη παράμετρος που αναφέρεται στην επιρροή του προσανατολισμού των ασυνεχειών στα τεχνικά έργα και καταδεικνύει τη σημασία αυτών στην ευστάθεια του τεχνικού (Πίνακας 2.11). Να σημειωθεί ότι ως προσανατολισμός ασυνεχειών λαμβάνεται η κύρια οικογένεια ασυνεχειών η οποία και ελέγχει την ευστάθεια του έργου. Τέλος, με βάση την κατηγορία κατάταξης επιλέγεται η μέθοδος εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας (Πίνακας 2.12).

Πίνακας 2.6 Παράμετροι, εύρος τιμών και βαθμολογίες με βάση το σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας RMR 89 (Bieniawski, 1989).

Α. Παράμετροι ταξινόμησης και βαθμολογίες									
Παράμετρος			Εύρος τιμών						
1	Αντοχή άρρηκτου βράχου	Δοκιμή σημειακής φόρτισης (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Για τόσο χαμηλές τιμές να προτιμάται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη		
		Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Βαθμολογία		<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
2	Δείκτης ποιότητας πετρώματος RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Βαθμολογία		<b>20</b>	<b>17</b>	<b>19</b>	<b>8</b>	<b>3</b>		
3	Απόσταση ασυνεχειών		>2m	0.6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm		
	Βαθμολογία		<b>20</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>5</b>		
4	Κατάσταση ασυνεχειών		Πολύ τραχείς Χωρίς υλικό πλήρωσης Χωρίς αποχωρισμό Χωρίς αποσάθρωση τοιχωμάτων	Ελαφρά τραχείς Αποχωρισμός <1mm Ελαφρά αποσαθρωμένα τοιχώματα	Ελαφρά τραχείς Αποχωρισμός <1mm Έντονα αποσαθρωμένα τοιχώματα	Ολισθαίνουσες ή Υλικό πλήρωσης (gouge) <5mm ή Αποχωρισμός 1-5mm Συνεχείς	Μαλακό υλικό >5mm ή Αποχωρισμός >5mm Συνεχείς		
	Βαθμολογία		<b>30</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>0</b>		
5	Υπόγειο Νερό	Εισροές ανά 10m μήκους σήραγγας (l/min)	Καθόλου	<10	10-25	25-152	>125		
		(Πίεση νερού ασυνεχειών) / (Μέγιστη κύρια τάση)	0	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
	Γενικευμένες συνθήκες		Ξηρό	Ύφυγρο	Υγρό	Στάγδην	Ροή		
	Βαθμολογία		<b>15</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>		

\* Η βαθμολογία που δίνεται για την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών έχει οριστεί για τρεις οικογένειες ασυνεχειών. Επομένως σε περίπτωση διαφορετικού αριθμού ασυνεχειών είναι απαραίτητο να γίνεται αναπροσαρμογή της αντίστοιχης βαθμολογίας είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω.



Πίνακας 2.7 Βαθμολογία ανάλογα με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών (Bieniawski, 1989).

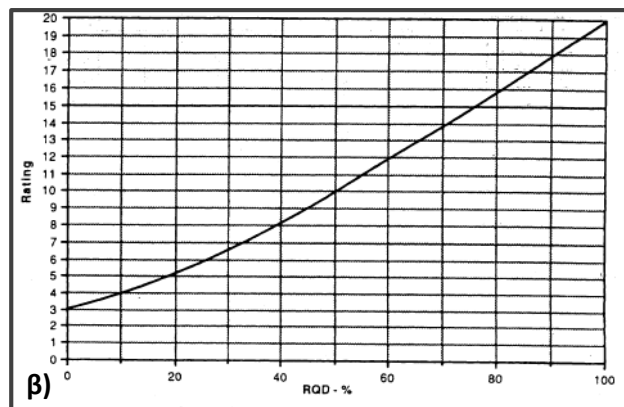
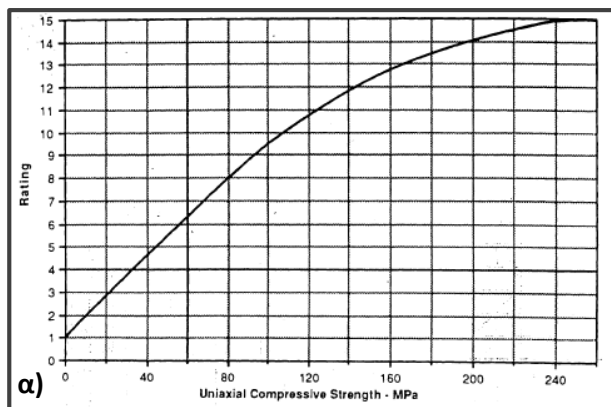
Β. Βαθμολογία ανάλογα με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών						
Προσανατολισμός ασυνεχειών (παράταξη και κλίση)		Πολύ ευνοϊκός	Ευνοϊκός	Μέτριος	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής
Βαθμολογίες	Σήραγγες και μεταλλεία	0	-2	-5	-10	-12
	Θεμελίωσεις	0	-2	-7	-15	-25
	Πρανή	0	-5	-25	-50	-60

Πίνακας 2.8 Κατηγορίες βραχώμαζας σύμφωνα με το άθροισμα των παραμέτρων του RMR (Bieniawski, 1989).

Γ. Κατηγορίες βραχώμαζας σύμφωνα με το άθροισμα των παραμέτρων του RMR					
Βαθμολογία	100-81	80-61	41-60	21-40	<20
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Περιγραφή	Πολύ καλή βραχώμαζα	Καλή βραχώμαζα	Μέτρια βραχώμαζα	Πτωχή βραχώμαζα	Πολύ πτωχή βραχώμαζα

Πίνακας 2.9 Ερμηνεία των κατηγοριών βραχώμαζας (Bieniawski, 1989).

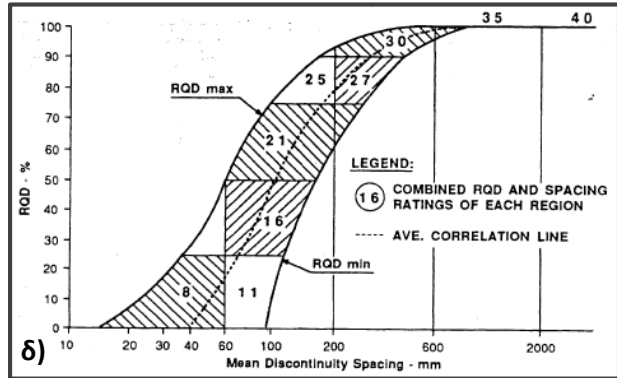
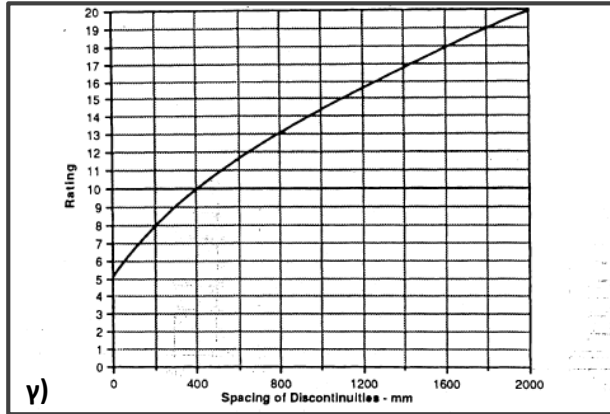
Δ. Ερμηνεία των κατηγοριών βραχώμαζας					
Κατηγορία	I	II	III	IV	V
Μέσος χρόνος αυτοϋποστήριξης	20 έτη για 15m διάμετρο	1 έτος για 10m διάμετρο	1 εβδομάδα για 5m διάμετρο	10 ώρες για 2,5m διάμετρο	30 λεπτά για 1m διάμετρο
Συνοχή βραχώμαζας (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Γωνία τριβής βραχώμαζας (deg)	>45	35-45	25-35	15-25	<15



Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 27



Σχήμα 2.10 α) Διάγραμμα για τον υπολογισμό της βαθμολογίας της αντοχής του άρρηκτου βράχου, β) Διάγραμμα για τον υπολογισμό της βαθμολογίας του RQD γ), Διάγραμμα για τον υπολογισμό της βαθμολογίας της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών, για τρεις οικογένειες ασυνεχειών, δ) Διάγραμμα για το συσχετισμό μεταξύ του RQD και της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών σε περίπτωση που λείπει μία από τις δύο τιμές (Bieniawski, 1989).

Πίνακας 2.10 Οδηγίες υπολογισμού της παραμέτρου «Κατάσταση ασυνεχειών» (Bieniawski, 1989).

Παράμετρος	Βαθμολογία				
Μήκος ασυνέχειας	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Βαθμολογία	6	4	2	1	0
Αποχωρισμός (άνοιγμα)	Κλειστές	<0,1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm
Βαθμολογία	6	5	4	1	0
Τραχύτητα	Πολύ τραχείς	Τραχείς	Ελαφρά τραχείς	Λείες	Ολισθαίνουσες
Βαθμολογία	6	5	3	1	0
Υλικό πλήρωσης (gouge)	Χωρίς υλικό	<5mm Σκληρό υλικό πλήρωσης	>5mm Σκληρό υλικό πλήρωσης	<5mm Μαλακό υλικό πλήρωσης	>5mm Μαλακό υλικό πλήρωσης
Βαθμολογία	6	4	2	2	0
Αποσάθρωση	Υγιές	Ελαφρά αποσαθρωμένο	Μέτρια αποσαθρωμένο	Έντονα αποσαθρωμένο	Αποσυντεθημένο
Βαθμολογία	6	5	3	1	0

Πίνακας 2.11 Επιρροή του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην κατασκευή υπόγειων έργων (Bieniawski, 1989).

Παράταξη κάθετα στον άξονα της σήραγγας				Παράταξη παράλληλα στον άξονα της σήραγγας		Ανεξάρτητα από την παράταξη
Προχώρηση σύμφωνα με την κλίση		Προχώρηση αντίθετα με την κλίση				
45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	0°-20°
Πολύ ευνοϊκή	Ευνοϊκή	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ δυσμενής	Μέτρια	Δυσμενής

Διατριβή Ειδικεύσεως Ε. Ι. Βουγιούκα

Πίνακας 2.12 Οδηγός για την επιλογή της προσωρινής υποστήριξης σε σήραγγα (Bieniawski, 1989).

Κατηγορία βραχώμαζας	RMR	Εκσκαφή	Υποστήριξη			
			Κοχλίες (Φ200, πλήρως ενεματωμένα)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Μεταλλικά πλαίσια	
I	Πολύ καλή	81-100	Ολομέτωπη 3m προχώρηση	Δεν απαιτείται γενικά υποστήριξη, με εξαίρεση μεμονωμένες κοχλιώσεις		
II	Καλή	61-80	Ολομέτωπη 1-1,5m προχώρηση Ολοκλήρωση υποστήριξης 20m από το μέτωπο	Τοπικά, στην οροφή κοχλίες μήκους 3m ανά 2,5m και περιστασιακά πλέγμα	50mm στην οροφή όπου απαιτείται	-
III	Μέτρια	41-60	Εκσκαφή μετώπου-βαθμίδας με απόσταση 1,5-3,0m μεταξύ τους Έναρξη υποστηρίξεως ύστερα από κάθε ανατίναξη. Ολοκλήρωση υποστήριξη 10m από το μέτωπο	Συστηματική, κοχλίες μήκους 4m ανά 1,5-2,0m στην οροφή και στις παρειές και πλέγμα στην οροφή	50-100mm στην οροφή και 30mm στις παρειές	-
IV	Πτωχή	21-40	Προχώρηση πρώτα του μετώπου κατά 1,0-1,5m. Εγκατάσταση υποστηρίξης συγχρόνως με την εκσκαφή - 10m από το μέτωπο	Συστηματική κοχλίωση με κοχλίες μήκους 4-5m ανά 1,0-1,5m στην οροφή και πλέγμα, στις παρειές	100-150mm στην οροφή και 100mm στις παρειές	Ελαφριά ως μέσα πλαίσια ανά 1.5m, όπου απαιτείται
V	Πολύ πτωχή	0-20	Πολλαπλά τμήματα προχώρησης. Προχώρηση στο μέτωπο 0,5-1,5m. Εγκατάσταση υποστηρίξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όσο το δυνατό συντομότερα μετά την έκρηξη	Συστηματική κοχλίες μήκους 5-6m ανά 1,0-1,5m με πλέγμα στην οροφή και τις παρειές, Bolt invert	150-200mm στην οροφή και 150mm στις παρειές και 50mm στο μέτωπο	Μέσα ως βαριά πλαίσια ανά 0,75m με γαρνιτούρα και δοκούς προπορείας αν απαιτείται. Ανάστροφο τόξο

### 2.3.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του RMR

Το σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης RMR έχει τύχει ευρείας εφαρμογής σε ποικίλα τεχνικά έργα, όπως πρανή, θεμελιώσεις, μεταλλεία και κυρίως σήραγγες.

#### Πλεονεκτήματα:

- Το RMR είναι πολύ απλό στη χρήση και οι απαιτούμενες παράμετροι μπορούν εύκολα να μετρηθούν είτε σε πυρήνες γεωτρήσεων είτε κατά την χαρτογράφηση μετώπων σηράγγων (Bieniawski (1989), Milne (2009)).
- Μπορεί να εφαρμοστεί και να προσαρμοστεί σε ποικίλα τεχνικά έργα (Bieniawski, 1989).

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

**Μειονεκτήματα:**

- Η διαδικασία υπολογισμού του RMR δε συμπεριλαμβάνει το καθεστώς των επί τόπου τάσεων καθιστώντας αμφίβολη τη χρήση του συστήματος ως μέθοδος σχεδιασμού (Milne, 2009).
- Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων όπου συνήθως η βραχώμαζα είναι καλής ποιότητας ( $RMR > 40$ ), με ασυνέχειες χωρίς υλικό πληρώσεως ή τοιχώματα μη αποσαθρωμένα. Για βραχώμαζες πτωχής ποιότητας ( $RMR < 40$ ) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη καθώς δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών. Συνεπώς περιπτώσεις διογκώσεων πετρώματος / υλικού πληρώσεως ασυνεχειών ή παραμόρφωσης από σύνθλιψη αποκλείονται (Μαρίνος, 1993).
- Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι ο μικρός αριθμός περιστατικών που ταξινομήθηκαν στην κατηγορία V (10 περιστατικά από τα 351 - εκ των οποίων αναφέρονται σε 8σρήαγγες). Πολύ περισσότερο ισχύει η παρατήρηση αυτή αν λάβει κανείς υπ' όψη ότι οι βραχώμαζες των 8 ως άνω περιστατικών σρήαγγων κατηγορίας V, αναφέρονται σε γρανίτες και λατυποπαγή μόνο. Δεν πρόκειται δηλαδή περί τυπικών χαμηλής ποιότητας πετρωμάτων (Μαρίνος (1993), Μαρίνος (2007)).
- Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης κατά RMR τείνουν να είναι συντηρητικά με αποτέλεσμα πολλές φορές την υπερδιαστασιολόγηση της υποστήριξης των τεχνικών έργων. Αυτό θα μπορούσε να εξαλειφθεί με την γεωτεχνική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας κατά την κατασκευή της σήραγγας και την αναπροσαρμογή της ταξινόμησης με βάση τα νέα δεδομένα (Bieniawski, 1989).
- Για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχώμαζας στην επίλυση του κριτηρίου Hoek-Brown μέσω του RMR, λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς δύο φορές η αντοχή του συμπαγούς πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη: μία φορά στον δείκτη R1 και μία στον τύπο του κριτηρίου, με αποτέλεσμα να εξαγάγουμε «αισιόδοξα» συμπεράσματα για βραχώμαζες με μεγάλο  $\sigma_{ci}$  και «απαισιόδοξα» συμπεράσματα για βραχώμαζες με μικρό  $\sigma_{ci}$ .

### 2.3.2 Δείκτης ποιότητας Q

Το σύστημα ταξινόμησης Q αναπτύχθηκε κατά το 1971-1974 (Barton et al. 1974) δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1974 από τους N. Barton, R. Lien και J. Lunde του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI) με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σρήαγγων που διανοίγονται με συμβατικές μεθόδους (NATM). Το 1993 παρουσιάστηκε μία εκτενής αναθεώρηση του συστήματος με βάση 1050 παραδείγματα από υπόγεια έργα, κυρίως στη Νορβηγία (Grimstad & Barton, 1993), ενώ προτάθηκαν προσθήκες στα μέτρα υποστήριξης αλλά και συσχετίσεις του δείκτη Q με την ταχύτητα P-κυμάτων, το μέτρο ελαστικότητας E, την πίεση υποστήριξης, την παραμόρφωση της σήραγγας, την τιμή Lugeon, τη συνοχή και τη γωνία τριβής. Αργότερα, συμπεριλήφθηκε ως βασικός παράγοντας στη «Νορβηγική μέθοδο διάνοιξης σρήαγγων» (NMT), η οποία αποτελεί μία απάντηση ή μία προσθήκη στη νέα Αυστριακή μέθοδο διάνοιξης σρήαγγων (NATM).

Η βάση της φιλοσοφίας του Q δεν διαφέρει πολύ από αυτή του RMR, αφού στηρίζεται στην ανάγκη για περιγραφή πολλών παραμέτρων της βραχώμαζας για τον χαρακτηρισμό της, αλλά δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα σε παραμέτρους όπως η τραχύτητα των ασυνεχειών, τα χαρακτηριστικά αντοχής (τριβή) του υλικού πλήρωσης τους και το γεωστατικό φορτίο.

### 2.3.2.1 Μεθοδολογία

Το σύστημα ταξινόμησης Q βασίζεται στην ποσοτική εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας με βάση έξι παραμέτρους:

- Δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας, RQD.
- Δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών, Jn.
- Βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών, Jr.
- Βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών, Ja.
- Συντελεστής επιρροής του υπογείου νερού, Jw.
- Συντελεστής απομείωσης τάσης, SRF.

Οι παράμετροι οργανώνονται σε λόγους. Έτσι:

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

Όπου:

- RQD / Jn, το μέσο μέγεθος των τεμαχίων της βραχώμαζας
- Jr / Ja, η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών
- Jw / SRF, οι ενεργές τάσεις.

Στον Πίνακα 2.13 παρουσιάζονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτίμηση του Q καθώς και οι αντίστοιχες βαθμολογίες.

Πίνακας 2.13 Παράμετροι, εύρος τιμών και βαθμολογίες με βάση το δείκτη ποιότητας βραχώμαζας Q (Barton, et al., 1974).

1. RQD (Συντελεστής Ποιότητας Πετρώματος)		RQD
A	Πολύ πτωχή	>27 διακλάσεις ανα m <sup>3</sup>
B	Πτωχή	20-27 διακλάσεις ανα m <sup>3</sup>
C	Μέτρια	13-19 διακλάσεις ανα m <sup>3</sup>
D	Καλή	8-12 διακλάσεις ανα m <sup>3</sup>
E	Εξαιρετική	0-7 διακλάσεις ανα m <sup>3</sup>
Σημείωση: i) Όπου το RQD≤10, η τιμή RQD=10 χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η τιμή του Q ii) Διαστήματα RQD ανά 5 μονάδες π.χ. 100,95,90 κλπ. είναι επαρκώς ακριβή		
2. Αριθμός Οικογενειών Ασυνχειών		Jn
A	Συμπαγές, καθόλου ή λίγες διακλάσεις	0.5
B	Μια οικογένεια διακλάσεων	2
C	Μία οικογένεια διακλάσεων και τυχαίες διακλάσεις	3
D	Δύο οικογένειες διακλάσεων	4
E	Δύο οικογένειες διακλάσεων και τυχαίες διακλάσεις	6
F	Τρεις οικογένειες διακλάσεων	9
G	Τρεις οικογένειες διακλάσεων και τυχαίες διακλάσεις	12
H	Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες διακλάσεων και τυχαίες ισχυρά διακλασμένο "sugar cube" κλπ.	15
J	Κατακερατωμένο πέτρωμα, σαν έδαφος	20
Σημείωση: i) Για διασταυρώσεις σφράγγων χρησιμοποιείται 3xJn ii) Για τα στόμια χρησιμοποιείται 2xJn		
3. Τραχύτητα Ασυνχειών		Jr
a) Τοιχώματα συνεχών σε επαφή και		
b) Τοιχώματα συνεχών σε επαφή με παρουσία 10cm διατμητικής κίνησης		
A	Ασυνχείς διακλάσεις	4
B	Τραχύες ή αμώμαλες, κυματοειδείς	3
C	Ομαλές κυματοειδείς	2
D	Λείες, κυματοειδείς	1.5
E	Τραχύες, ανώμαλες	1.5
F	Ομαλές επίπεδες	1
G	Λείες, επίπεδες	0.5
Σημείωση: i) Η περιγραφή αφορά πρώτα της μικρής και έπειτα της ενδιάμεσης κλίμακας δομές, με αυτήν την σειρά.		
c) Τοιχώματα ασυνχειών χωρίς επαφή κατά την διάτμηση		
H	Ζώνη που περιλαμβάνει αργιλικά ορυκτά αρκετά πυκνά ώστε να εμποδίσουν την επαφή στα τοιχώματα των ασυνχειών κατά την διάτμηση	1
Σημείωση: ii) Πρόσθεσε 1 εάν το μέσο διάστημα των σχετικών οικογενειών διακλάσεων είναι μεγαλύτερο από 3m (εξαρτάται από το μέγεθος των υπόγειων ανοιγμάτων) iii) Jr=0.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίπεδες λείες επιφάνειες διακλάσεων που έχουν γραμμώσεις ολίσθησης, με την προϋπόθεση ότι η γραμμωση έχει τη διεύθυνση της ολίσθησης		
4. Βαθμός Εξαλλείωσης Ασυνχειών		Ja
a) Τοιχώματα σε επαφή (χωρίς υλικό πλήρωσης, μόνο επικαλύψεις)		
A	Πλήρης επουλώση, με σκληρό, αδιάτρητο υλικό πλήρωσης πχ. Χαλαζιάς, επίδισο	0.75
B	Μη εξαλλοιωμένα τοιχώματα, μόνο τοπικός απογραμμιτισμός	1
C	Ελαφρώς εξαλλοιωμένα τοιχώματα. Επικάλυψη με ορυκτά που δεν μαλακώνουν, αμώδη υλικά που δεν αποσθρώνονται σε αργιλικά	2
D	Επικάλυψη από ιλιώδεις ή αμώδεις αργίλους. Λεπτόκοκκα αργιλικά τεμάχια (δεν μαλακώνουν)	3
E	Επικάλυψη από μαλακά ή χαμηλής γωνίας τριβής αργιλικά ορυκτά, πχ. Καολίνη, μαρμαρυγές. Επίσης χλωρίτης, τάλκης, γύψος, γραφίτης κλπ. και μικρές ποσότητες διογκούμενη αργίλου	4
b) Τοιχώματα σε επαφή πριν από διάτμηση 10cm (λεπτή στρώση υλικού πλήρωσης)		
F	Αμώδες υλικό, από θρυμματισμένο πέτρωμα, χωρίς αργιλικά	4
G	Ισχυρά προστεραιοποιημένο, σκληρό (που δεν μαλακώνει) αργιλικό υλικό πλήρωσης (συνεχές, αλλά <5mm)	6
H	Μέτρια έως ελαφρά προστεραιοποιημένο, σκληρό (που δεν μαλακώνει) αργιλικό υλικό πλήρωσης (συνεχές, αλλά <5mm)	8
J	Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πχ. Μοντμοριλονίτης (συνεχής αλλά <5mm). Η τιμή του Ja εξαρτάται από το ποσοστό των αργιλικών	8-12
γ) Χωρίς επαφή τοιχωμάτων κατά τη διάτμηση (παχιά στρώση υλικού πλήρωσης)		
K	Ζώνες από θρυμματισμένο ή κεραματοποιημένο πέτρωμα. Ισχυρά προστεραιοποιημένο	6
L	Ζώνες από αργιλικά, θρυμματισμένο ή κεραματοποιημένο βράχο. Μέτρια έως ελαφρά προστεραιοποιημένο ή υλικό πλήρωσης που μαλακώνει	8
M	Ζώνες από αργιλικά, θρυμματισμένο ή κεραματοποιημένο βράχο. Διογκούμενη άργιλος. Η τιμή του Ja εξαρτάται από το ποσοστό των αργιλικών	8-12
N	Παχιές, συνεχείς αργιλικές ζώνες. Ισχυρά προστεραιοποιημένο υλικό	10
O	Παχιές, συνεχείς αργιλικές ζώνες. Μέτρια έως ελαφρώς προστεραιοποιημένο υλικό	13
p	Παχιές, συνεχείς ζώνες με άργιλο. Διογκούμενη άργιλος. Η τιμή του Ja εξαρτάται από το ποσοστό των αργιλικών	13-20
5. Συντελεστής Απομείωσης Υδάτος		Jw
A	Ξηρές εσκαφές ή μικρή εισροή (υγρό ή μερικές σταγόνες)	1
B	Μέτρια εισροή, περιστασιακή απόπλυση των υλικών πλοίρωσης των διακλάσεων (πολλές σταγόνες/βροχή)	0.66
C	Εισροή μεγάλης πίεσης σε συνεκτικό βράχο με μη πλοιωμένες ασυνέχειες	0.5
D	Μεγάλη εισροή ή μεγάλη πίεση, σημαντική απόπλυση των υλικών πλοίρωσης των ασυνχειών	0.33
E	Εξαιρετικά μεγάλη εισροή ή πίεση του νερού που μειώνονται με το χρόνο. Προκαλεί απόπλυση υλικού και ισως κατάρρευση	0.2-0.1
F	Εξαιρετικά μεγάλη εισροή ή πίεση του νερού που συνεχίζονται χωρίς κάποια σημαντική διαφορά. Προκαλεί απόπλυση υλικού και ισως κατάρρευση	0.1-0.05
6. Παράγοντες Απομείωσης Τάσεων		SRF
a) Ασθενείς ζώνες που τέμνουν το υπόγειο άνοιγμα και μπορούν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας		
A	Πολλαπλές ασθενείς ζώνες που εκτείνονται σε μικρό μήκος και περιλαμβάνουν αργιλικά υλικά ή χημικώς εξαλλοιωμένα ορυκτά, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (οποιοδήποτε βάθος), ή μεγάλο μήκος μη συνεκτικού (ασθενούς) πετρώματος (οποιοδήποτε βάθος). Για συγκρίσεις βλ. 6L και 6M	10
B	Πολλαπλές ζώνες διάτμησης που εκτείνονται σε μικρό μήκος σε συνεκτικό	7.5
C	Μία ασθενής ζώνη με ή χωρίς αργιλικά ή χημικώς εξαλλοιωμένο πέτρωμα (βάθος ≤50m)	5
D	Χαλαρές, ανοιχτές διακλάσεις, ισχυρά κεραματοποιημένο πέτρωμα ή "κυβάρια ζάχαρης" κλπ (οποιοδήποτε βάθος)	5
E	Μία ασθενής ζώνη με ή χωρίς αργιλικά ή χημικώς εξαλλοιωμένο πέτρωμα (βάθος >50m)	2.5
Σημείωση: i) Απομειώστε τις τιμές του SRF κατά 25-50% αν οι ασθενείς ζώνες μόνο επηρεάζουν αλλά δεν τέμνουν το υπόγειο άνοιγμα		
b) Συνεκτικό, κυρίως συμπαγές πέτρωμα, προβλήματα τάσεων		
F	Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές διακλάσεις	2.5
G	Μέσες τάσεις, ευνοϊκή κατάσταση τάσεων	1
H	Υψηλές τάσεις, πολύ κλειστές δομές. Συχνά εννοούν την ευστάθεια. 1σως είναι μη ευνοϊκές στην ευστάθεια εξαρτώμενες από τον προσανατολισμό των τάσεων σε σύγκριση με το jointing/ επιφάνειες αδυναμίας*.	0.5-2
J	Μέτρο spalling και/ ή slabbing μετά από > 1 ώρα σε συμπαγές πέτρωμα	5-50
K	Spalling ή σπάσιμο βράχου μετά από λίγα λεπτά σε συμπαγές πέτρωμα	50-200
L	Ισχυρά σπασίματα βράχων και μέτρια δυναμική παραμόρφωση σε συμπαγές πέτρωμα	200-400
Σημείωση: ii) Για ισχυρούς ανισότροπο παρθένο πεδίο τάσεων: όταν 5<σ1/σ3<10, μειώνει το σc σε 0.75 σc. Όταν σ1/σ3>10, μειώνει το σc σε 0.5 σc, όπου σc=αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, σ1 και σ3 είναι η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση και σc= μέγιστη εφαιπόμενη τάση (υπολογισμένη από την ελαστική θεωρία) iii) Όταν το ύψος της διατομής είναι μικρότερο από το πλάτος Προτείνεται αύξηση του SRF από τα 2.5 στα 5 (βλέπε F)		
c) Συγκλίνον πέτρωμα: πλαστική παραμόρφωση σε μη συνεκτικά πετρώματα υπο την επίδραση υψηλών πιέσεων		
M	Ηπια πίεση συγκλίνοντος πετρώματος	5-10
N	Ισχυρή πίεση συγκλίνοντος πετρώματος	10-20
Σημείωση: iv) Ο προσδιορισμός της κατάστασης του αποκλίνοντος πετρώματος θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με την σχετική βιβλιογραφία (π.χ. Singh et al., 1992 και Bhasi n and Grimsta d, 1996)		
d) Διογκόμενα πετρώματα: η διαδικασία της χημικής διογκώσεως εξαρτάται από την παρουσία του νερού		
O	Ηπια πίεση διογκόμενου πετρώματος	5-10
P	Υψηλές πιέσεις διογκόμενου πετρώματος	10-15

\* Σε περιοχές διασταύρωσης σφράγγων η τιμή του Jn τριπλασιάζεται, ενώ σε περιοχές στομίων διπλασιάζεται



Με βάση την τιμή του δείκτη Q η βραχώμαζα κατατάσσεται σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες.

Πίνακας 2.14 Ταξινόμηση ποιότητας βραχώμαζας κατά το σύστημα Q (Barton, et al., 1974).

Q	Κλάση	Χαρακτηρισμός
>400	Ia	Εξαιρετικά καλή
100-400	Ib	Πάρα πολύ καλή
40-100	II	Πολύ καλή
10-40	IIIa	Καλή
4-10	IIIb	Μέτρια
1-4	IVa	Πτωχή
0,1-1	IVb	Πολύ πτωχή
0,01-0,1	Va	Πάρα πολύ πτωχή
<0,01	Vb	Εξαιρετικά πτωχή

Με βάση τις έξι παραμέτρους που παρατέθηκαν παραπάνω καθώς και την εξίσωση που συνδέει αυτές μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του Q με σκοπό την περιγραφή της ποιότητας της βραχώμαζας. Με βάση την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από ποικίλα τεχνικά έργα κατέστη δυνατός ο συσχετισμός της τιμής του Q, και των μέτρων υποστήριξης. Ο συσχετισμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για το σχεδιασμό της υποστήριξης σε υπόγεια έργα.

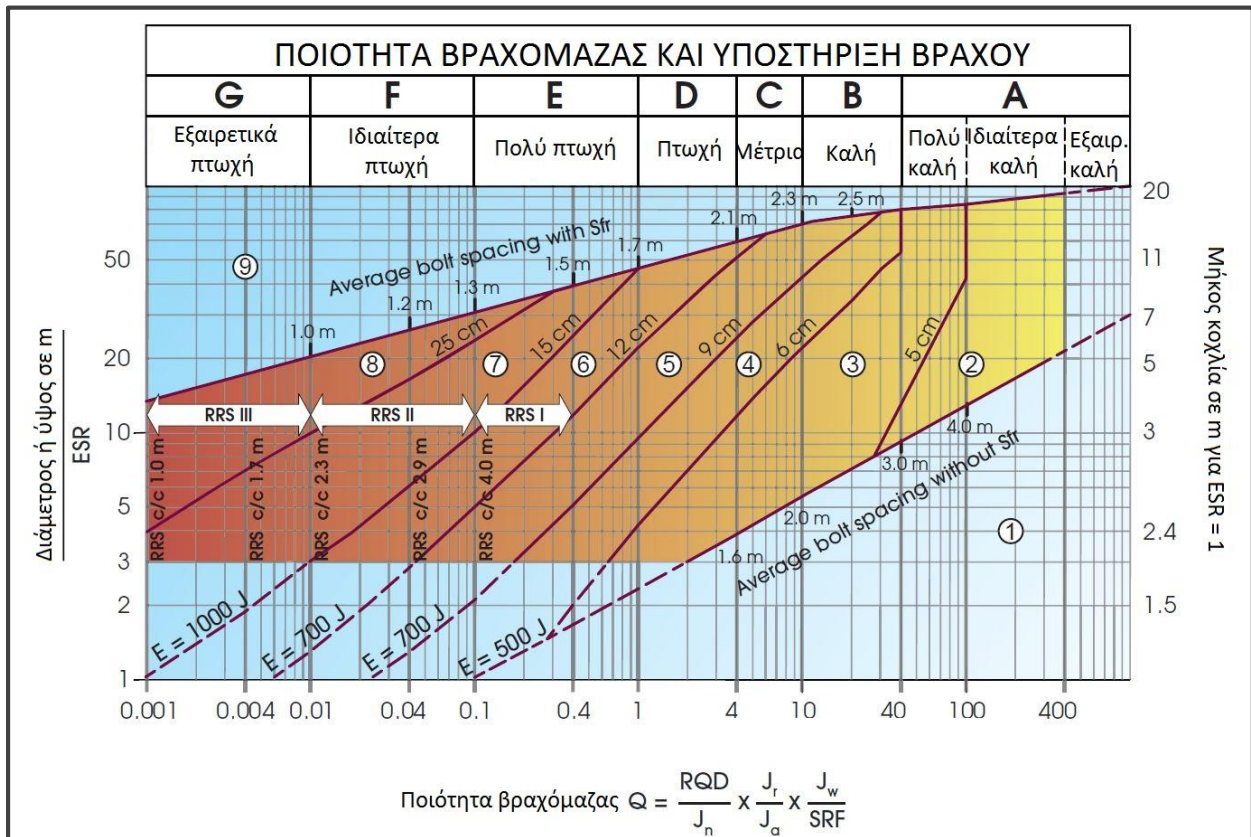
Στην περίπτωση των υποστηρίξεων σε σήραγγες, εκτός από την τιμή του Q, είναι επιπλέον απαραίτητοι δύο παράγοντες που σχετίζονται με την ασφάλεια και με τις διαστάσεις του υπόγειου ανοίγματος αντίστοιχα. Προσδιορίστηκε επομένως μία πρόσθετη παράμετρος, η Ισοδύναμη διάσταση (Equivalent Dimension, De), που ορίζεται ως ο λόγος του ανοίγματος της σήραγγας (διάμετρος ή ύψος, σε μέτρα) προς τον παράγοντα υποστήριξης εκσκαφής (Excavation Support Ratio, ESR):

$$\frac{\text{Διάμετρος ή Ύψος σε m}}{ESR} = \text{Ισοδύναμη Διάσταση}$$

Στον Πίνακα 2.15 παρουσιάζονται οι τιμές της παραμέτρου ESR ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του υπόγειου έργου ενώ στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι κατηγορίες υποστήριξης με βάση το δείκτη Q και την παράμετρο De.

Πίνακας 2.15 Τιμές της παραμέτρου ESR (Barton, et al., 1974), (NGI, 2013).

Τύπος εκσκαφής	ESR
A	3-5
B	2,5 2,0
C	1,6
D	1,3
E	1,0
F	0,8
G	0,5



Σχήμα 2.11 Κατηγορίες υποστήριξης με βάση το δείκτη Q και την παράμετρο De (Grimstad & Barton, 1993).

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Όπου:

1. Δεν απαιτείται υποστήριξη ή αραιές ηλώσεις.
2. Αραιές ηλώσεις.
3. Συστηματικές ηλώσεις και 5-6cm ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
4. 6-9 cm ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις
5. 9-12 cm ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις.
6. 12-15 cm ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις
7. >15 cm ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις
8. Επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα
9. Ειδική εκτίμηση

Η απόσταση μεταξύ των ηλώσεων συνδέεται με ήλους  $\Phi 20\text{mm}$

Όπου E η απορρόφηση ενέργειας από το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Οι περιοχές με διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν περιοχές χωρίς εμπειρικά δεδομένα.

### 2.3.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Q

**Πλεονεκτήματα:**

- Αποτελεί ποσοτικό και όχι ποιοτικό σύστημα ταξινόμησης (Bieniawski, 1989).
- Το σύστημα προτάθηκε με βάση δεδομένα από την κατασκευή 212 σηράγγων στην Σκανδιναβία (Bieniawski, 1989) ενώ στην αναθεωρημένη του έκδοση το 1993 προστέθηκαν 1050 επιπλέον παραδείγματα.
- Λαμβάνει υπόψη τις περιπτώσεις που η αστάθεια της εκσκαφής της σήραγγας προκαλείται από χαλάρωση της βραχώμαζας, διογκώσεις πετρώματος / υλικού πληρώσης ασυνεχειών, ή θραύσεις.
- Δίνει έμφαση στην τραχύτητα και στο βαθμό μεταβολής των επιφανειών των ασυνεχειών, κάτι που δεν τονίζεται ιδιαίτερα στη μέθοδο RMR.
- Στις συστάσεις για υποστήριξη λαμβάνει υπόψη τις πρόσφατες εξελίξεις στα συστήματα υποστήριξης, όπως το ενισχυμένο με ίνες εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, και μία αναγνώριση των κινδύνων των διαφορετικών εφαρμογών (Grimstad & Barton, 1993).

**Μειονεκτήματα:**

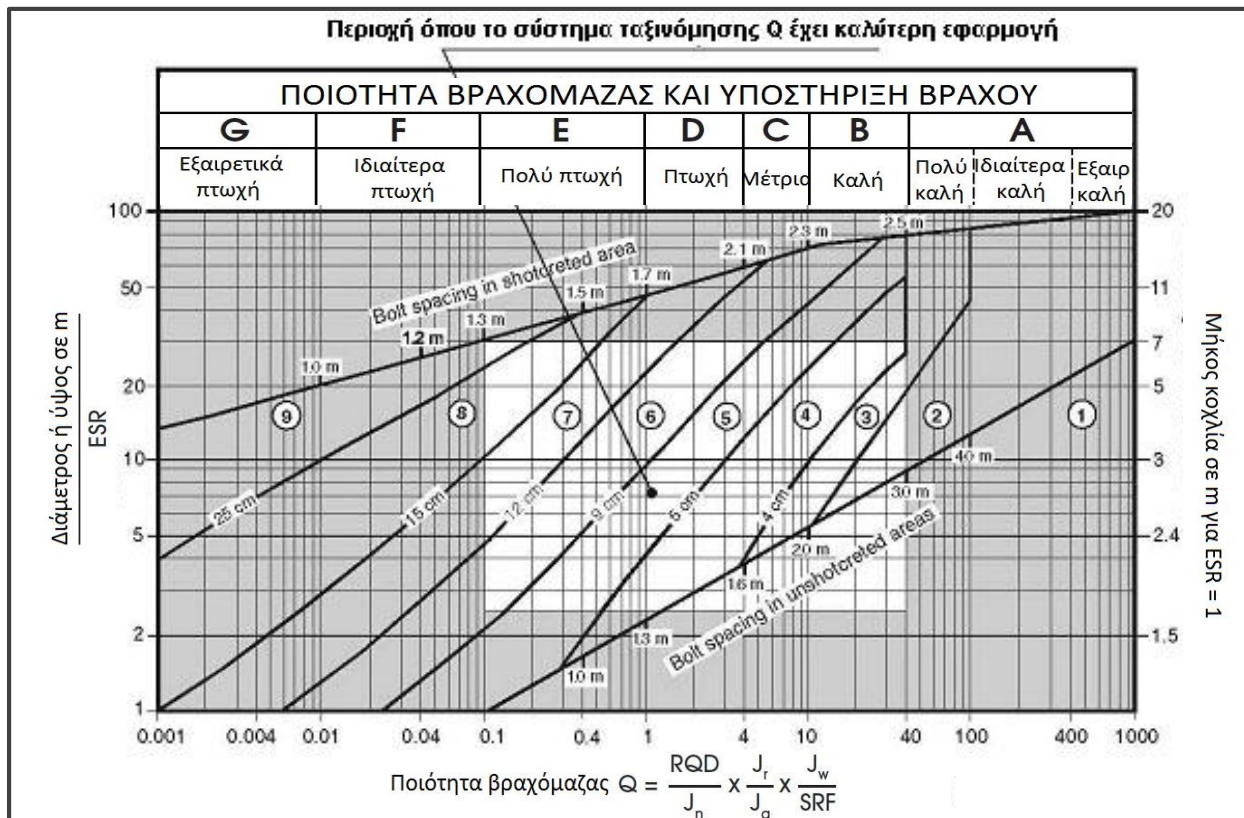
- Το Q αναπτύχθηκε κυρίως με βάση εμπειρίες από σήραγγες σε σκληρά και τεμαχώδη πετρώματα. Συνεπώς για την εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης σε πτωχής ποιότητας βραχώμαζα το Q θα πρέπει να συνδυάζεται και με άλλα συστήματα ταξινόμησης.
- Τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης με βάση την ταξινόμηση Q είναι συχνά συντηρητικά. Αυτό οφείλεται στην ευρεία χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε καλής ποιότητας πετρώματα τα τελευταία χρόνια καθώς και την εμπειρική προέλευση του συστήματος, όσον αφορά στα μέτρα υποστήριξης

**Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα**

**Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας**

**Σελίδα 35**

- Παρά το γεγονός ότι το Q μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση στην επιφάνεια αλλά και σε μέτωπα σηράγγων καθώς και στην περιγραφή πυρήνων γεωτρήσεων, οι ορθότερες τιμές προκύπτουν από τη χαρτογράφηση μετώπων. Ειδικότερα κατά την περιγραφή πυρήνων γεωτρήσεων ο αριθμός των οικογενειών ασυνεχειών μπορεί να υποεκτιμηθεί, ενώ η εκτίμηση των  $J_w$  και SRF είναι συνήθως αδύνατη (NGI, 2013).
- Αν και ο δείκτης Q λαμβάνει τιμές από 0.001 έως 1000 και καλύπτει 6 τάξεις μεγέθους, το σύστημα Q δουλεύει καλύτερα για τιμές από 0.1 έως 40, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12 (Palmstrom & Broch, 2006).
- Αν και στις κατηγορίες του Q συμπεριλαμβάνονται πολλές ασθενείς ζώνες, οι περιπτώσεις με παραμορφώσιμα (πτωχά) πετρώματα, όπως φυλλίτες, σχιστολιθοί κλπ., δεν καλύπτονται επαρκώς. Επιπλέον, δεν περιλαμβάνεται το πλάτος των ζωνών με ασθενή υλικά εξισώνοντας έτσι ζώνες αρκετών μέτρων με μικρότερες ζώνες πάχους δεκάδων εκατοστών ή λίγων μέτρων (Palmstrom & Broch, 2006).
- Ο δείκτης Q μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση των ιδιοτήτων μιας βραχώμαζας για την επίλυση κριτηρίων αστοχίας, κατ' αναλογία με τον δείκτη RMR, χρησιμοποιώντας τους 2 πρώτους λόγους. Μία τέτοια εφαρμογή φαίνεται να είναι πάντως περιορισμένη σε χρήση.



Σχήμα 2.12 Όρια εφαρμογής του συστήματος Q (Palmstrom & Broch, 2006).

### 2.3.3 Γεωλογικός δείκτης αντοχής - GSI

Το RMR όπως και το Q είναι δύο συστήματα ταξινόμησης της βραχώμαζας που αναπτύχθηκαν με σκοπό την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας με βάση ποιοτικές γεωλογικές περιγραφές (Unkown, 2008) για τον προσδιορισμό των απαραίτητων μέτρων υποστήριξης ενός υπόγειου έργου. Το σύστημα GSI δε δημιουργήθηκε για να αντικαταστήσει τα παραπάνω συστήματα καθώς δεν παρέχει πληροφορίες για το σχεδιασμό μέτρων υποστήριξης ενός υπόγειου έργου. Αντίθετα, η αποκλειστική του λειτουργία εστιάζεται στην εκτίμηση των ιδιοτήτων της βραχώμαζας και την ποσοτικοποίηση αυτών.

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής-GSI εισήχθη από τους Hoek, Wood and Shah (1992) και πήρε τη σημερινή του μορφή το 1998 (Hoek, et al., 1998). Αποτελεί ένα δείκτη γεωτεχνικής ταξινόμησης αλλά και αριθμητικής έκφρασης της απομείωσης των σταθερών του υλικού ανάλογα με τη ρωγμάτωση της βραχώμαζας και την ποιότητα των ασυνεχειών της. Αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την επίλυση του κριτηρίου θραύσης Hoek-Brown, με σκοπό τον προσδιορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων για το σχεδιασμό τεχνικών έργων.

#### 2.3.3.1 Μεθοδολογία

Το GSI βασίζεται στην οπτική παρατήρηση της βραχώμαζας, σε επιφανειακές εμφανίσεις, εκσκαφές, μέτωπα σηράγγων ή πυρήνες γεωτρήσεων και συναξιολόγηση δυο παραμέτρων:

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

Ο υπολογισμός της τιμής του GSI γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα 2.13, με βάση τον οποίο γίνεται κατηγοριοποίηση της δομής της βραχώμαζας σε έξι κατηγορίες και της επιφάνειας των ασυνεχειών σε πέντε. Προκύπτει έτσι μία τιμή του GSI της βραχώμαζας η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με απόκλιση  $\pm 5$  μονάδες.

Το GSI, εφαρμόζεται σε ισότροπες βραχώμαζες με επαρκή αριθμό «τυχαίως» προσανατολισμένων ασυνεχειών και απουσία προτιμητέων διευθύνσεων αστοχίας. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί με παραδεκτή ανοχή και σε ανισότροπα μέσα αν η θραύση δεν ελέγχεται από την ανισοτροπία. Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα είναι έντονα διακλασμένη και η εμμονή των ασυνεχειών είναι διαταραγμένη, η βραχώμαζα μπορεί να συμπεριφέρεται ιστροπικά και άρα να καταστεί δυνατή η χρήση του δείκτη. Το δίλημμα ισότροπη ή όχι πρακτικά δεν τίθεται στις βραχώμαζες με δομή σαν αυτή της έκτης (τελευταίας) σειράς του διαγράμματος GSI επειδή εκεί η διαφορά της αντοχής μεταξύ θεμελιώδους μάζας και ασυνέχειας είναι μικρή.

Σε ετερογενείς και συχνά ασθενείς σχηματισμούς όμως είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος αφού είναι δύσκολο να βρεθεί κατάλληλο άρρηκτο τέμαχος για τον εργαστηριακό έλεγχο. Για τον λόγο αυτό αντί της δοκιμής της

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

μονοαξονικής θλίψης προτείνεται ο έλεγχος της σημειακής φόρτισης (Point Load Test). Παρόλα αυτά η δοκιμή αυτή δεν δίνει αποτελέσματα σε πολύ ασθενή πετρώματα όπως οι χλωριτωμένοι γνεύσιοι ή οι εξαλλοιωμένοι πηγματίτες. Τα τελευταία προσδιορίζονται με ποιοτική περιγραφή ώστε να προσδιοριστεί έμμεσα η μονοαξονική τους αντοχή ( $\sigma_{ci}$ ).

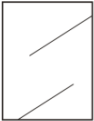
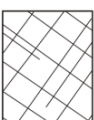


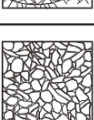
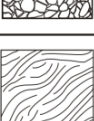
### 2.3.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του GSI

#### Πλεονεκτήματα:

- Το GSI παρέχει ταχύτητα εφαρμογής και ευκολία στη χρήση.
- Η ταξινόμηση GSI επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των πολλαπλών ιδιοτήτων των πετρωμάτων ενισχύοντας τη γεωλογική λογική και μειώνοντας την αβεβαιότητα της μηχανικής θεώρησης (Μαρίνος, 2007).
- Με τη χρήση του GSI διατηρείται ο ποιοτικός χαρακτήρας των γεωλογικών στοιχείων που επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης των μεταβλητών, οι οποίες συνθέτουν μία βραχώμαζα, και συνεπώς εξηγεί σαφέστερα τη συμπεριφορά της.
- Σε αντίθεση με τα συστήματα RMR και Q το GSI δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικά πτωχής ποιότητας βραχώμαζες, με RMR<40, αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (<20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

#### Μειονεκτήματα:

- Το GSI δε θα πρέπει να εφαρμόζεται σε βραχώμαζες στις οποίες υπάρχει ένας σαφώς καθορισμένος κυρίαρχος δομικός προσανατολισμός ο οποίος μπορεί να επηρεάσει την εκδήλωση αστοχίας καθώς βασίζεται στην υπόθεση ότι η βραχώμαζα συμπεριφέρεται ως ισότροπο υλικό, δηλαδή η συμπεριφορά της είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση των εφαρμοζόμενων φορτίσεων (Μαρίνος, 2007).
- Η έλλειψη παραμέτρων στο GSI που μπορούν να ποσοτικοποιηθούν, όπως π.χ. το RQD, αποτελεί πρόβλημα για τους μηχανικούς και παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει (Tzamos & Sofianos, (2007), Hoek, et al. (2013)) να ποσοτικοποιηθεί η διαδικασία GSI, αλλά οι περισσότερες από αυτές αποτελούν μία επανεφεύρεση της προσέγγισης που βασίζεται στο RQD και είναι αποτελεσματικές μόνο για όσες βραχώδεις μάζες συνιστούν ουσιαστικά τακτοποιημένες συγκεντρώσεις σκληρών τεμαχίων βράχου.
- Ο ορισμός καθεμιάς από τις παραμέτρους είναι αρκετά υποκειμενικός καθώς βασίζεται σε σκαριφήματα χωρίς κλίμακα και προφορικές, μη ποσοτικές, περιγραφές (Tzamos & Sofianos, 2007).
- Ένα μεγάλο εύρος τιμών GSI δίνεται για τον προσδιορισμό της ποιότητας της βραχώμαζας.
- Το GSI δεν παρέχει επαναληψιμότητα των ταξινομήσεων με μεγάλη ακρίβεια (Milne, 2009).

<p><b>ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)</b> (E. Hoek, Π. Μαρινός, 2000)</p> <p>Βασίζονται στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχώμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καρπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατημημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.</p>	<b>ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b>				
<b>ΔΟΜΗ</b>	<b>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> →				
 <p><b>ΑΡΡΗΚΤΗ</b> Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A	N/A
 <p><b>ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ</b> Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	80	70	60		
 <p><b>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ</b> Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>		50			
 <p><b>ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>		40	30		
 <p><b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων</p>			20		
 <p><b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατημημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)</p>	N/A	N/A			10

Σχήμα 2.13 Ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά το σύστημα GSI (Marinos & Hoek, 2000)

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 39



### 2.3.4 Επιλογή κατάλληλου συστήματος ταξινόμησης

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος ταξινόμησης αποτελεί κριτήριο ιδιάζουσας σημασίας για την εύρυθμη, ασφαλή και οικονομική κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Ιδιαίτερα στα μεταλλευτικά έργα, όπου λόγω της αυξημένης ανάγκης για ταχύτερες και οικονομικότερες λύσεις οι ταξινομήσεις βραχώμαζας αποτελούν την κατ' εξοχήν επιλογή για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης των υπόγειων έργων.

Ένα σύστημα ταξινόμησης θα πρέπει να είναι πρακτικό και αρκετά ισχυρό ώστε να μπορεί να παρέχει οικονομικό και ασφαλή σχεδιασμό. Κανένα από τα συστήματα ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν μπορεί να καλύψει τις παραπάνω προϋποθέσεις, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν ως μέθοδοι επίβλεψης με σκοπό την ανάπτυξη ενός τοπικού συστήματος, προσαρμοσμένο στις συνθήκες του εκάστοτε έργου (Stille & Palmstrom, 2003).

Στις παραπάνω παραγράφους παρατέθηκαν τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα τριών από τα επικρατέστερα συστήματα ταξινόμησης, όπως αυτά προκύπτουν από τις βιβλιογραφικές αναφορές αλλά και από την εφαρμογή τους στο πεδίο.

Για την επιλογή του καταλληλότερου όμως συστήματος ταξινόμησης, εκτός από τα πλεονεκτήματα που παρέχει θα πρέπει να εξεταστούν επιπλέον και οι επί τόπου συνθήκες και ιδιαιτερότητες του έργου. Συγκεκριμένα στο μεταλλείο Ολυμπιάδας:

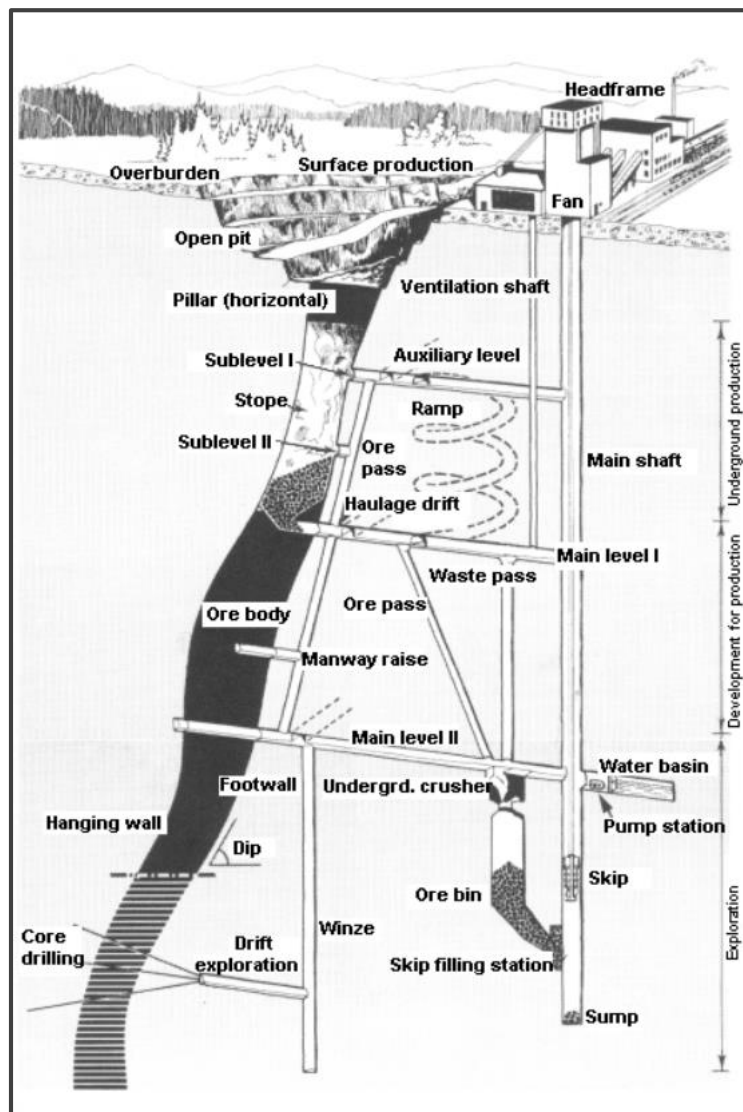
- Οι βραχώμαζες παρουσιάζουν μέτρια έως καλή ποιότητα ( $30 < \text{RMR} < 70$ ) με μικρές μόνο ζώνες πτωχής ποιότητας.
- Παρουσιάζονται μέσες συνθήκες τάσεων.
- Τα πετρώματα σχεδόν στο σύνολο τους παρουσιάζουν ανισότροπη συμπεριφορά με ευστάθεια που ορίζεται από τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και ιδιαίτερα της φολίδωσης. Εξαιρεση αποτελούν περιοχές έντονης εξαλλοίωσης ή τεκτονικής καταπόνησης.
- Το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων, τόσο από χαρτογραφήσεις μετώπων όσο και από περιγραφή πυρήνων γεωτρήσεων έχει διεξαχθεί με το σύστημα RMR. Συνεπώς, εκτός από το πλήθος τους, τα δεδομένα του RMR παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία αλλά και συνοχή λόγω της μεγαλύτερης εξοικείωσης του προσωπικού με το σύστημα αυτό.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των αναλύσεων το σύστημα Bieniawski RMR'89.

### 3 Μέθοδοι κατασκευής και υποστήριξης υπόγειων μεταλλευτικών έργων

#### 3.1 Γενικά

Η απόληψη ορυκτών υλών από το υπέδαφος απαιτεί την ανάπτυξη φυσικών δίοδων προς τα μεταλλοφόρα σώματα, την απελευθέρωση της μεταλλοφορίας από τα γειτονικά πετρώματα και τη μεταφορά αυτής στην επιφάνεια. Για τη διεξαγωγή της διαδικασίας αυτής είναι απαραίτητη η κατασκευή προσπελαστικών έργων αλλά και έργων ανάπτυξης.



Σχήμα 3.1 Τυπική διάταξη της ανάπτυξης ενός υπόγειου μεταλλείου (Pakalnis , 2015).

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 41

Η κατασκευή προσπελαστικών έργων (ελικοειδή κεκλιμένα-ramps, φρέατα-shafts, κεκλιμένα-declines) αποτελεί το πρώτο βασικό στάδιο για την έναρξη λειτουργίας ενός μεταλλείου, καθώς αυτά επιτρέπουν την προσέγγιση του κοιτάσματος. Η ολοκλήρωση αυτού του σταδίου σηματοδοτεί την έναρξη της επόμενης φάσης η οποία περιλαμβάνει τα έργα ανάπτυξης (διευθυντικές στοές -haulages, στοές-stopes, εσωτερικά φρέατα-winzes), με στόχο τη διάκριση του κοιτάσματος σε ορόφους και υποορόφους εκμετάλλευσης ώστε να εφαρμόζεται χωρίς προβλήματα η μεταλλευτική μέθοδος και κατ' επέκταση η διαδικασία παραγωγής του μεταλλείου. Τα έργα ανάπτυξης συνθέτουν ένα πολύπλοκο δίκτυο το οποίο συνδέεται με τα βασικά προσπελαστικά έργα συνιστώντας τον σκελετό του μεταλλείου.

Η κατασκευή των παραπάνω έργων εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως:

- **Φυσικές ιδιότητες του κοιτάσματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων:** καθορίζουν τις διαστάσεις των υπόγειων ανοιγμάτων που μπορούν να παραμείνουν ανυποστήρικτα και κατ' επέκταση τον τύπο υποστήριξης της υπόγειας εκμετάλλευσης (φυσική υποστήριξη, τεχνητή υποστήριξη ή ανυποστήρικτη εξόρυξη).
- **Διαστάσεις του κοιτάσματος:** καθορίζουν τις διαστάσεις των στοών απόληψης του μεταλλεύματος.
- **Προσανατολισμός του μεταλλοφόρου σώματος και ιδιαίτερα η κλίση του:** επηρεάζει το ποσοστό συμμετοχής της βαρύτητας στη μεταλλευτική διαδικασία.
- **Πυκνότητα μεταλλοφορίας:** επηρεάζει σημαντικά την επιλογή μαζικής ή επιλεκτικής εκμετάλλευσης.
- **Τεκτονικά στοιχεία:** κύρια ρήγματα, φλέβες ή κερματισμός που μπορεί να επηρεάσει τη θέση και τις διαστάσεις των στοών και των στύλων.
- **Βάθος κοιτάσματος:** η αύξηση του βάθους επιφέρει αύξηση των ασκούμενων τάσεων και συνεπώς αύξηση του κόστους εξόρυξης.
- **Εγγύτητα σε άλλα μεταλλευτικά έργα:** επηρεάζει την επιλογή της μεταλλευτικής μεθόδου, την αλληλουχία των εκσκαφών, τη θέση των εισόδων, κ.α.
- **Επιδράσεις στην επιφάνεια του εδάφους:** θα πρέπει να γίνουν εκτιμήσεις σε σχέση με:
  - τυχόν γειτνίαση με κατοικημένες περιοχές ή υδατικές συγκεντρώσεις (πχ. λίμνες) για την αποφυγή καθιζήσεων,
  - τις απαιτήσεις για εγγειοβελτιωτικά έργα,
  - τη διάθεση των τελμάτων και των καταλοίπων της μεταλλευτικής δραστηριότητας,
  - τον έλεγχο της επιφανειακής αποστράγγισης.

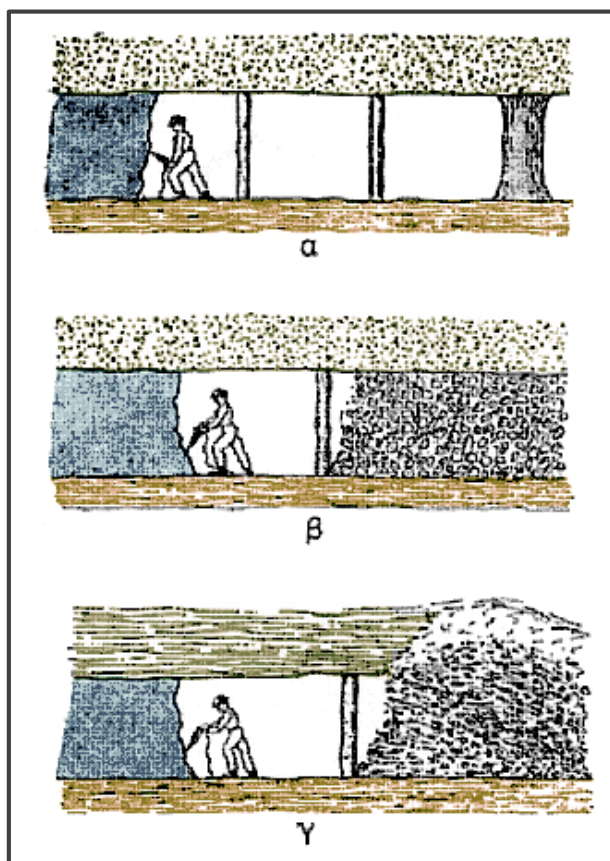
Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το κλίμα και η τοπογραφία της περιοχής.

- **Εργατικό δυναμικό και προμήθειες:** η εμπειρία του γηγενούς εργατικού δυναμικού καθώς και η διαθεσιμότητα σε υλικά όπως ξυλεία, τσιμέντο κ.λπ. καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιλογή της μεθόδου εκμετάλλευσης.
  - **Διαθέσιμο κεφάλαιο**
  - **Φυσική τοποθεσία:** η τοποθεσία, η δικαιοδοσία και η ιδιοκτησία του κοιτάσματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, όπως επίσης και η γειτνίαση με άλλα κοιτάσματα.



### 3.2 Βασικές μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης. Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου

Μόλις ένα μεταλλοφόρο σώμα έχει οροθετηθεί και έχει εξακριβωθεί η δυνατότητα οικονομικής εκμετάλλευσης του θα πρέπει να επιλεγθεί η κατάλληλη μέθοδος εκμετάλλευσης. Σ' αυτό το στάδιο η επιλογή είναι προκαταρκτική και συνεπώς θα πρέπει να διατηρείται ευελιξία σε περίπτωση που απαιτηθεί αλλαγή της μεθόδου.



Σχήμα 3.2 Βασικές μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης α) με κενά μέτωπα, β) με γομούμενα μέτωπα, γ) με κατακρημνιζόμενα μέτωπα (από Μπενάρδος, n.d.).

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Με κενά μέτωπα (open stopes):** στις οποίες ο χώρος που απομένει μετά την απόληψη του μεταλλεύματος διατηρείται κενός, με φυσική υποστήριξη, δηλαδή η υποστήριξη παρέχεται κυρίως από το πέτρωμα.
- **Με γομούμενα μέτωπα (filling stopes):** στις οποίες ο χώρος του κοιτάσματος που εκμεταλλεύεται πληρώνεται στη συνέχεια με τεχνητό τρόπο, συνήθως από στείρα υλικά (λιθογόμωση).

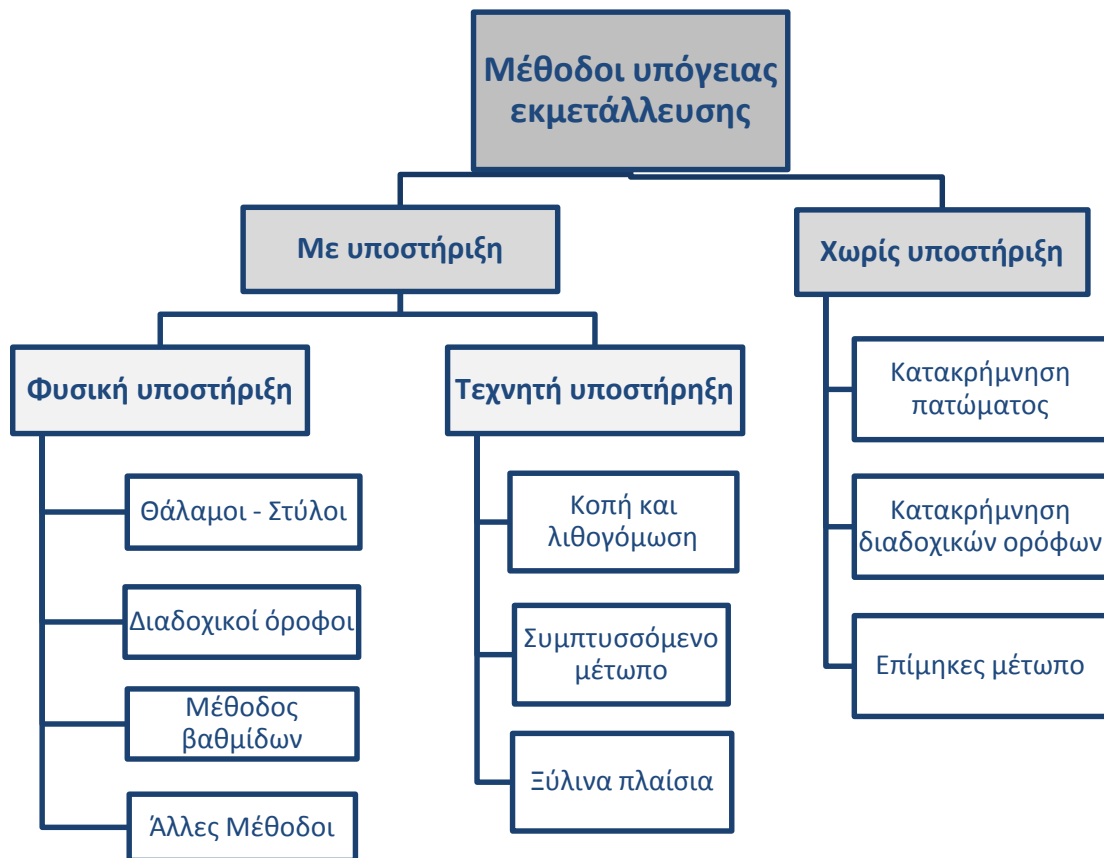
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 43

- **Με κατακρημνιζόμενα μέτωπα (caving stopes):** στις οποίες ο χώρος που έχει πραγματοποιηθεί η απόσπαση του μεταλλεύματος πληρώνεται με υλικά μέσω της κατακρήμνισης της οροφής του κοιτάσματος.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των βασικότερων από τις μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης μεταλλείων ενώ στον Πίνακα 3.1. παρατίθενται κάποια από τα βασικά κριτήρια επιλογής της βέλτιστης μεθόδου υπόγειας εκμετάλλευσης.



Σχήμα 3.3 Ταξινόμηση των βασικότερων από τις μεθόδους υπόγειας εκμετάλλευσης μεταλλείων (Μπενάρδος, n.d.).

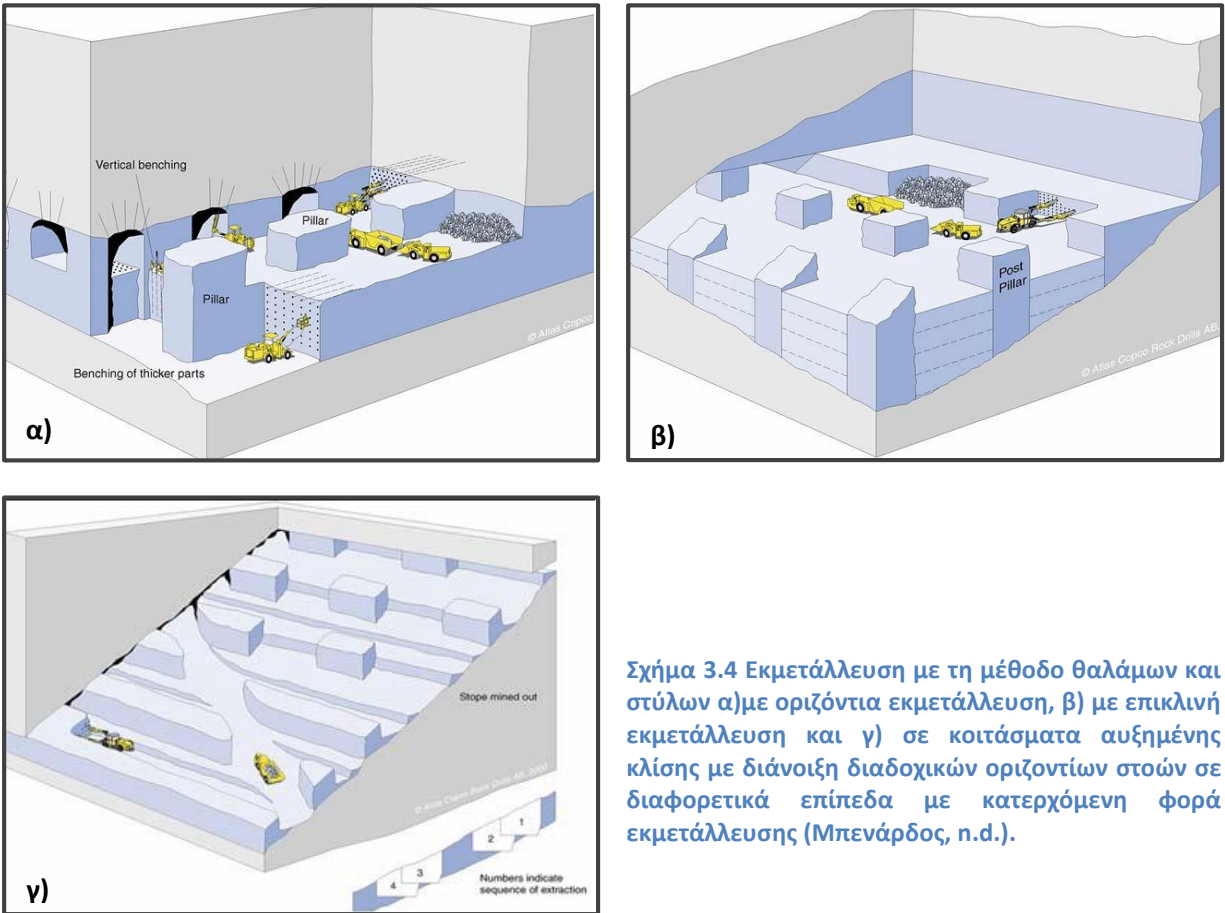
Πίνακας 3.1 Κριτήρια επιλογής μεταλλευτικής μεθόδου (Μπενάρδος, n.d.).

Γεωμετρία κοιτάσματος			Μηχανική αντοχή		Μέθοδος εκμετάλλευσης	
Σχήμα	Κλίση	Πάχος	Μεταλλεύματος	Πετρώματος		
Στρωματοειδές	Μικρή	Μικρό	Μεγάλη	Μεγάλη	Θάλαμοι και στύλοι	
			Μικρή	Μικρή	Επίμηκες μέτωπο	
		Μεγάλο	Μεγάλη	Μεγάλη	Θάλαμοι και στύλοι	
	Μεγάλη	Μικρό	Μικρό	Μεγάλη	Μεγάλη	Συμπτυσσόμενο μέτωπο
				Μεγάλη	Μικρή	Διαδοχικοί υποόροφοι με κενά μέτωπα
			Μεγάλη	Μικρή	Κοπή και λιθογόμωση	
			Μεγάλη	Μικρή	Ξύλινα πλαίσια	
			Μεγάλη	Μεγάλη	Συμπτυσσόμενο μέτωπο	
			Μεγάλη	Μεγάλη	Διαδοχικοί υποόροφοι με κενά μέτωπα	
		Μεγάλο	Μικρό	Μεγάλη	Μικρή	Κοπή και λιθογόμωση
				Μεγάλη	Μικρή	Κατακρήμνιση οροφής
			Μικρή	Μεγάλη	Ξύλινα πλαίσια	
			Μικρή	Μεγάλη	Κατακρήμνιση οροφής	
			Μικρή	Μεγάλη	Κατακρήμνιση πατώματος	
			Μικρή	Μεγάλη	Ξύλινα πλαίσια	
Σωρός	Μεγάλη	Μεγάλο	Μεγάλη	Μεγάλη	Κατακρήμνιση οροφής	
			Μεγάλη	Μεγάλη	Κατακρήμνιση πατώματος	
		Μικρή	Μικρή	Μικρή	Ξύλινα πλαίσια	

### 3.2.1 Μέθοδος θαλάμων και στύλων (room and pillar)

Η μέθοδος θαλάμων και στύλων εφαρμόζεται σε σχετικά επίπεδα μεταλλοφόρα σώματα (κλίση <math><30^\circ</math>) με ικανοποιητική ποιότητα βραχώμαζας και αποτελεί τη μόνη αποτελεσματική μέθοδο εκμετάλλευσης επίπεδων κοιτασμάτων μικρού πάχους. Η υποστήριξη των στοών γίνεται μέσω φυσικών στύλων που αποτελούνται από τμήματα του μεταλλεύματος ή της στείρας περιβάλλουσας βραχώμαζας και οι οποίοι παραμένουν επί τόπου μετά την απόληψη της μεταλλοφορίας. Οι διαστάσεις των στοών και των στύλων εξαρτώνται από την ποιότητα της βραχώμαζας και του μεταλλεύματος καθώς και το πάχος του κοιτάσματος.

Υπάρχουν τρεις τύποι εκμετάλλευσης με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων: οριζόντια, επικλινή και βαθμιδωτή εκμετάλλευση.



Σχήμα 3.4 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων α) με οριζόντια εκμετάλλευση, β) με επικλινή εκμετάλλευση και γ) σε κοιτάσματα αυξημένης κλίσης με διάνοιξη διαδοχικών οριζοντίων στοών σε διαφορετικά επίπεδα με κατερχόμενη φορά εκμετάλλευσης (Μπενάρδος, n.d.).

#### Πλεονεκτήματα:

- Μέση έως υψηλή παραγωγικότητα ανά εργαζόμενο.
- Μέσο κόστος εκμετάλλευσης.
- Μέσος έως υψηλός ρυθμός παραγωγής.
- Υψηλός βαθμός μηχανοποίησης με δυνατότητα χρήσης μεγάλων μηχανημάτων.
- Ευέλικτη μέθοδος, εργασίες μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε διάφορα επίπεδα.
- Δεν απαιτούνται εξειδικευμένοι εργάτες.
- Μέτρια έως καλή αποληψιμότητα χωρίς την εξόρυξη των στύλων (75% κατά μέσο όρο), χαμηλή αραίωση (10-20%).

#### Μειονεκτήματα:

- Χαμηλό επίπεδο ασφάλειας εργαζομένων
- Απαιτείται συνεχής επίβλεψη και συντήρηση σε περίπτωση που το μέταλλευμα ή η περιβάλλουσα βραχώμαζα δεν είναι συμπαγή. Οι ασκούμενες τάσεις στους θαλάμους και τους στύλους αυξάνονται όσο αυξάνεται το βάθος.

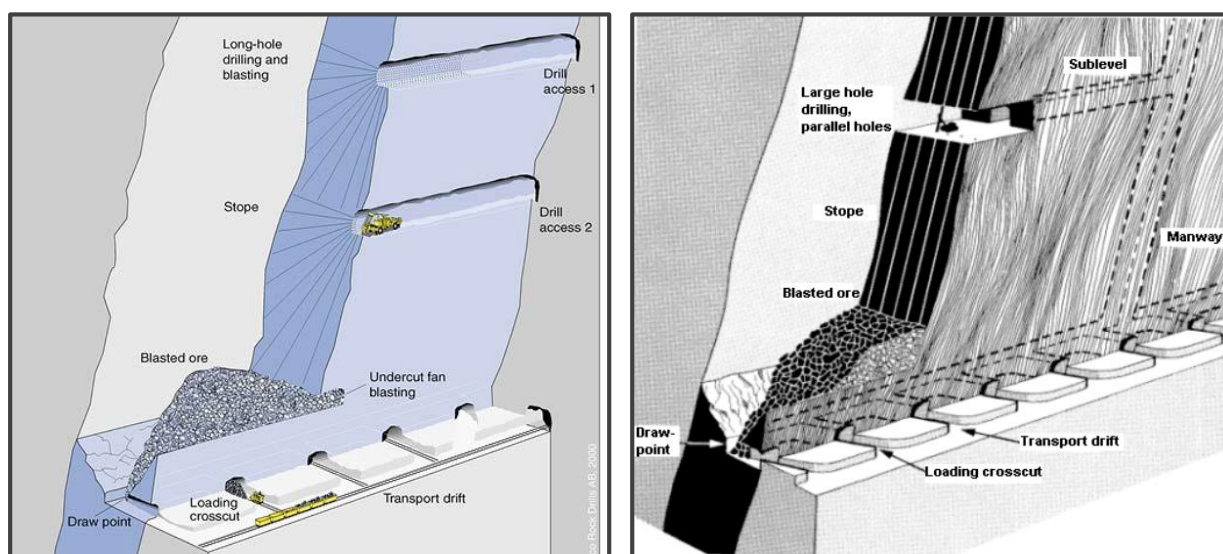
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Μεγάλες κεφαλαιουχικές δαπάνες απαιτούνται λόγω του υψηλού βαθμού μηχανοποίησης.
- Απώλειες μεταλλεύματος (10-50%) λόγω των στύλων.
- Δυσκολίες στον αερισμό και την αραίωση των ρύπων λόγω των χαμηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται σε ευρείς διατομές.

### 3.2.2 Μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κενά μέτωπα (sublevel stoping)

Η μέθοδος εφαρμόζεται σχεδόν αποκλειστικά σε κατακόρυφα ή παρακατακόρυφα κοιτάσματα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το μέταλλευμα εξορύσσεται από επίπεδα σε προκαθορισμένα κατακόρυφα διαστήματα μέσω της προς τα πάνω διάτρησης και απελευθέρωσης πλακών μεταλλεύματος οι οποίες καταπίπτουν μέσα στον κενό χώρο. Από εκεί το μέταλλευμα αποκομίζεται με τη βαρύτητα προς την υποκείμενη στοά βάσεως του πατώματος για να ακολουθήσει η φόρτωση και μεταφορά του. Μετά την απόληψη του μεταλλεύματος η στοά παραμένει κενή. Μεταξύ των στοών παραμένουν στύλοι της μεταλλοφορίας, είτε σε κατακόρυφη είτε σε οριζόντια διάταξη, λειτουργώντας ως υποστήριξη. Οι στύλοι αυτοί δύναται να εκμεταλλευτούν στα τελευταία στάδια της εξόρυξης.

Για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η γνώση της γεωλογίας, των ορίων της μεταλλοφορίας και της αραίωσης του μεταλλεύματος καθώς επίσης και η επαρκής αντοχή των πετρωμάτων και του μεταλλεύματος.



Σχήμα 3.5 Μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κενά μέτωπα α) με την όρυξη ακτινικών διατρημάτων, β) με την όρυξη παράλληλων διατρημάτων (από Hans Hamrin, Atlas Corco 1980).

#### Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή παραγωγικότητα.
- Χαμηλό κόστος.

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Ευκολία αερισμού.
- Ικανοποιητική ασφάλεια.
- Υψηλή απόληψη (περίπου 90%).
- Αποδοτικότητα, λόγω της ανεξαρτησίας μεταξύ των δραστηριοτήτων διάτρησης, ανατίναξης και φόρτωσης.

**Μειονεκτήματα:**

- Απαιτείται ευθεία / γραμμική διάταξη της στοάς και των ορίων της μεταλλοφορίας.
- Αδυναμία εκτέλεσης διαλογής ή εκλεκτικής εκμετάλλευσης.
- Απαίτηση για πολλά έργα ανάπτυξης.
- Παραφυάδες μεταλλεύματος ή σοβαρές διακυμάνσεις της κλίσης μπορεί να δημιουργήσουν απώλειες ή προσμίξεις.

**3.2.3 Μέθοδος υποχωρόντος μετώπου κατακόρυφου κρατήρα (Vertical crater retreat - VCR)**

Η μέθοδος αποτελεί μία παραλλαγή της μεθόδου διαδοχικών υποορόφων με κενά μέτωπα χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα ένα σφαιρικό κρατήρα για τη θραύση του μεταλλεύματος. Ουσιαστικά πρόκειται για νέα τεχνική ανατίναξης και όχι νέα τεχνική εκμετάλλευσης, κατά την οποία η ανατίναξη διεξάγεται στο κατώτερο τμήμα κατακόρυφων οπών πραγματοποιώντας οριζόντιες κοπές και συνεχίζοντας προς τα πάνω. Το μέταλλευμα φορτώνεται από τη στοά μεταφοράς ή φόρτωσης που έχει κατασκευαστεί κατά μήκος του κοιτάσματος, στο επίπεδο φόρτωσης του κάθε πατώματος.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαραίτητο είναι να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- το μέταλλευμα θα πρέπει να είναι μεγάλου σχετικά πάχους,
- τα περιβάλλοντα πετρώματα να είναι επαρκώς σκληρά και ανθεκτικά και
- το κοίτασμα να έχει μεγάλη κλίση.

**Πλεονεκτήματα:**

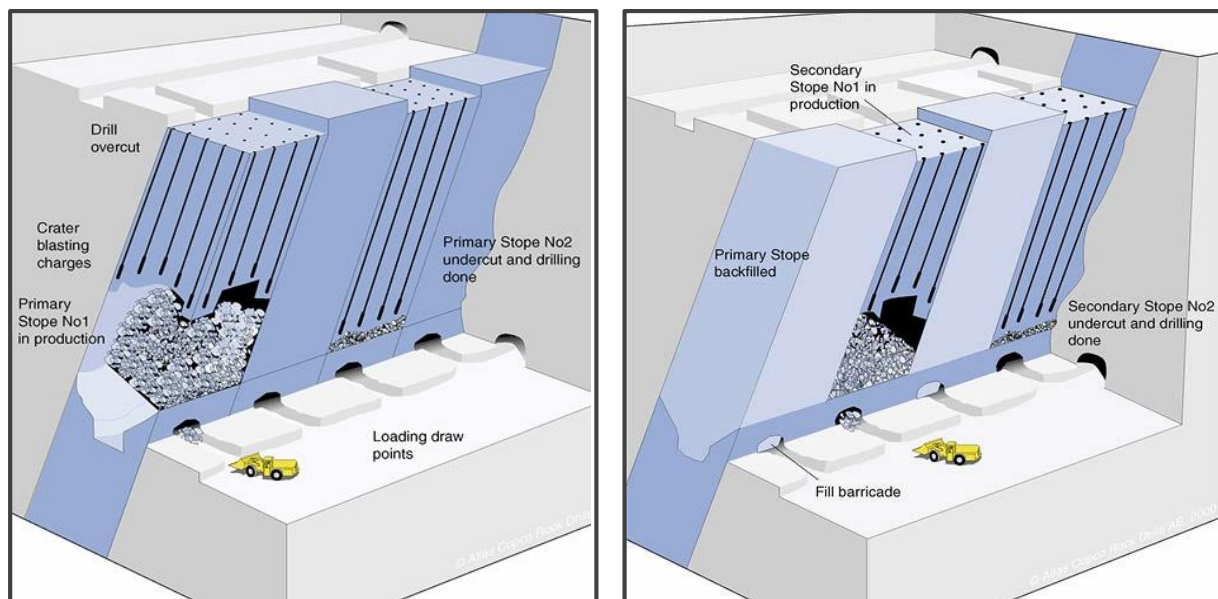
- Υψηλή αποληψιμότητα.
- Εύκολη μηχανοποίηση με αποτέλεσμα την υψηλή παραγωγικότητα (>32 t/εργάτη/βάρδια).
- Προσφέρει καλή ενίσχυση των τοιχωμάτων μέσω των τεχνικών σύμπτυξης.
- Αποτελεί μία ασφαλή μέθοδο εξόρυξης καθώς οι εργαζόμενοι δουλεύουν σε πλήρως υποστηριγμένες και επαρκώς αεριζόμενες στοές.

**Μειονεκτήματα:**

- Υψηλό κόστος κεφαλαίου.



- Δύσκολος έλεγχος εδάφους.
- Μέτρα υποστήριξης.



Σχήμα 3.6 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο υποχωρούντος μετώπου κατακόρυφου κρατήρα (Μπενάρδος, n.d.).

### 3.2.4 Μέθοδος κοπής και λιθογόμωσης (cut and fill)

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε κοιτάσματα υψηλής αξίας, πάχους συνήθως 1-10m, με μέταλλευμα υψηλής έως μέτριας αντοχής και ελάχιστης κλίσης 45°, ώστε να είναι δυνατή η κάθοδος του μεταλλεύματος μέσα από τα φρέατα απαγωγής. Η σύσταση του μεταλλεύματος δεν επηρεάζει τη εφαρμοσιμότητα της μεθόδου καθώς μπορούν να διαχωριστούν εύκολα παρεμβολές στείρων ή διαφορετικής ποιότητας μεταλλεύματος. Η ασάφεια μεταξύ μεταλλεύματος και παρυφών αντιμετωπίζεται επίσης με ευχέρεια, όμως η παρουσία παραφυάδων δύναται να δημιουργήσει δυσκολίες.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το μέταλλευμα εξορύσσεται από κάτω προς τα πάνω, κατά πλάκες ύψους 2m περίπου. Μετά την απομάκρυνση του θραυσμένου μεταλλεύματος λαμβάνει χώρα λιθογόμωση του δημιουργούμενου κενού. Η προχώρηση των μετώπων ακολουθείται από εναλλαγή εξόρυξης και λιθογόμωσης, με σκοπό την διατήρηση σταθερού του ύψους του ελεύθερου χώρου του μετώπου.

#### Πλεονεκτήματα:

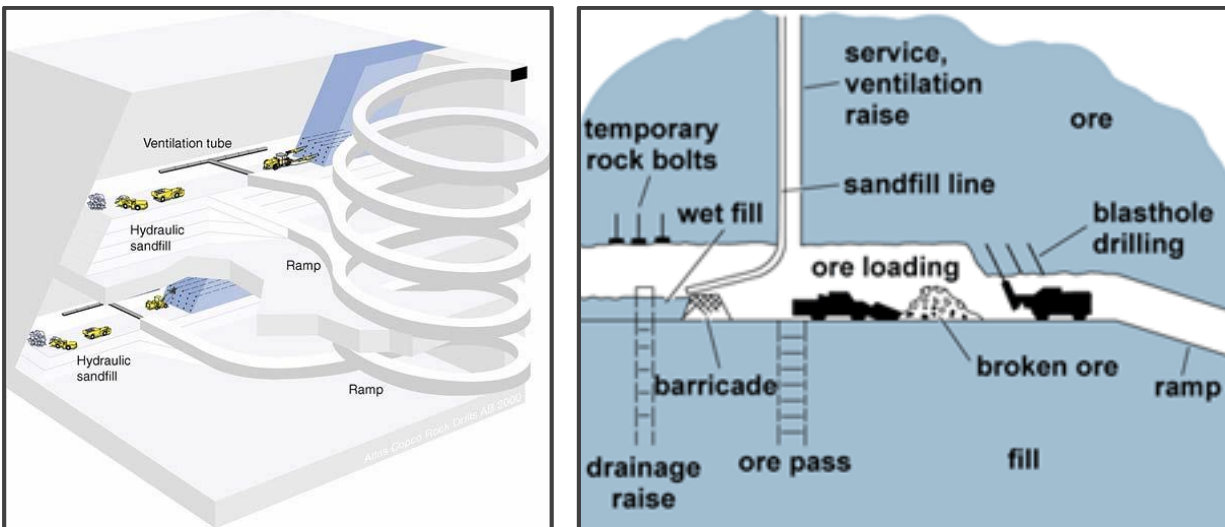
- Υψηλός βαθμός αποληψιμότητας (>90-95%).
- Μέση παραγωγικότητα (9-18 t/εργάτη/βάρδια).
- Μέσος ρυθμός παραγωγής.
- Ελάχιστη μετακίνηση εδάφους (καθιζήσεις).

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Έλεγχος αραίωσης (5-10%) λόγω της δυνατότητας εκλεκτικής εξόρυξης.
- Καλές συνθήκες ασφάλειας.
- Κατάλληλη μέθοδος για εκμετάλλευση απρόβλεπτων και πτωχής ποιότητας σχηματισμών.
- Δυνατότητα χρήσης των τελμάτων ως υλικό λιθογόμωσης αποφεύγοντας την επιφανειακή απόθεση τους.

#### Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος εκμετάλλευσης λόγω του σταδίου της λιθογόμωσης και της δημιουργίας των κεκλιμένων για τη μεταφορά του μεταλλεύματος.
- Υψηλό κόστος διαχείρισης τελμάτων.
- Απαίτηση σε εργατικό δυναμικό.
- Δυσκολίες αερισμού.
- Έλλειψη σταθερότητας του παραγωγικού κύκλου τόσο λόγω των εναλλαγών εκμετάλλευσης και λιθογόμωσης όσο και του σταδίου ανάπτυξης των κεκλιμένων εντός της λιθογόμωσης.



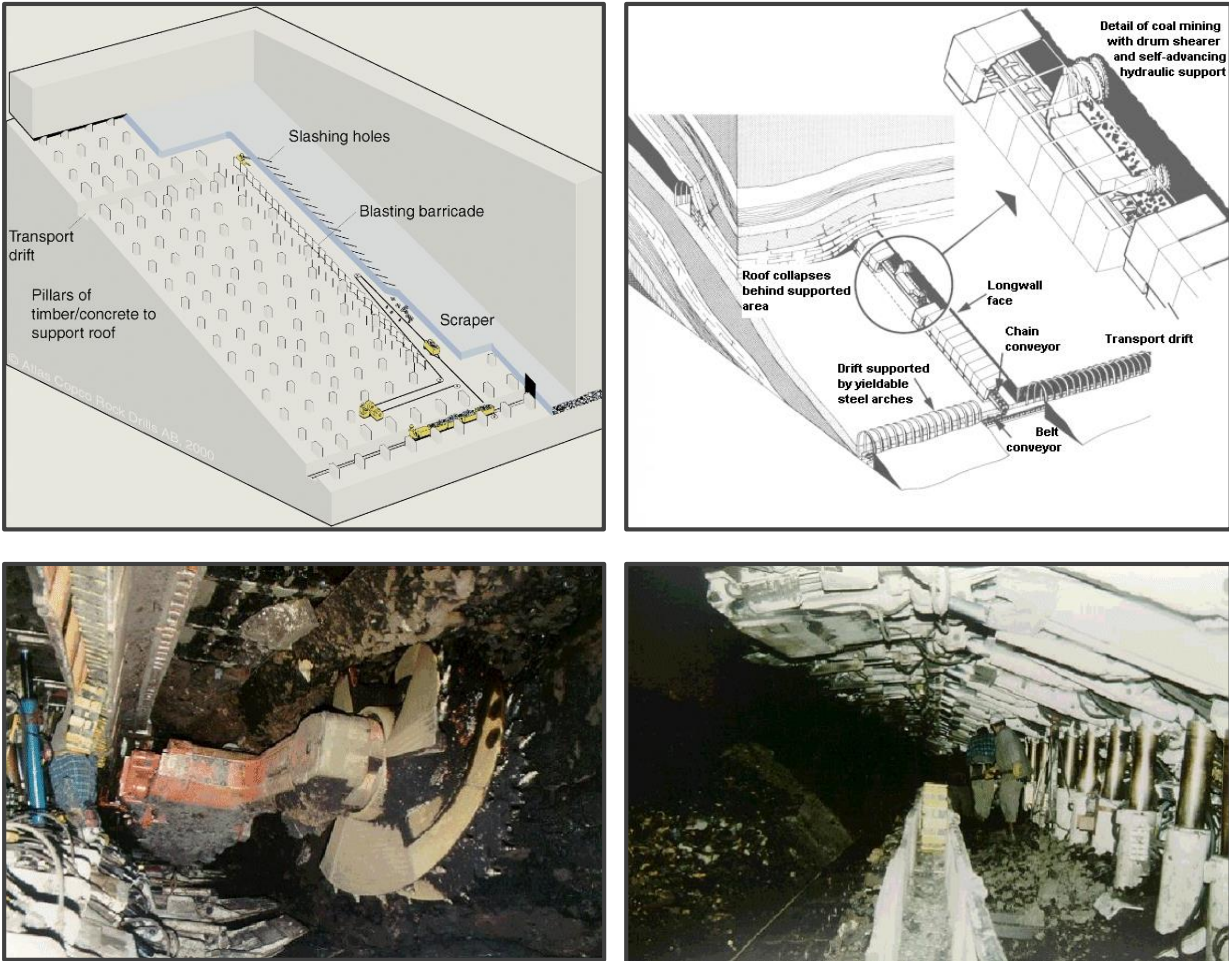
Σχήμα 3.7 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο κοπής και λιθογόμωσης (Μπενάρδος, n.d.).

#### 3.2.5 Μέθοδος επιμήκους ευθύγραμμου μετώπου (longwall)

Πρόκειται για μία μέθοδο κατακρήμνισης με μηχανική εξόρυξη. Εφαρμόζεται σε οριζόντια έως ελαφρά κεκλιμένα, πλακώδη και μικρού σχετικά πάχους κοιτάσματα άνθρακα. Η οροφή του κοιτάσματος πρέπει να είναι πτωχής σχετικά ποιότητας ώστε να επιτρέπει την κατακρήμνιση μετά την εξόρυξη, ενώ η στρώση θα πρέπει να έχει καλές μηχανικές ιδιότητες ώστε να επιτρέπει την ασφαλή θεμελίωση της υποστήριξης της οροφής.



Η εξόρυξη γίνεται σε λωρίδες παράλληλες προς την επιφάνεια προσβολής του μετώπου, με απόξεση του μεταλλεύματος με κατάλληλο δίσκο. Ο δίσκος μετακινείται παράλληλα προς το μέτωπο της όρυξης ενώ το μέταλλευμα που πέφτει απομακρύνεται με ταινιοδόρομο. Η οροφή υποστηρίζεται υδραυλικά, είτε, παλαιότερα, με σύστημα ρυθμιζόμενων υποστηλωμάτων και αρθρωτών δοκών είτε, σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες μεθόδους, με μεταλλικές ασπίδες αποτελούμενες από δύο παράλληλα πλαίσια τοποθετημένα επί της στρώσης, που συνδέονται με υδραυλικό σύστημα βηματισμού. Η υποστήριξη μετακινείται αυτόματα προς τα μπρος καθώς προχωρά το μέτωπο ενώ μετά τη μετακίνηση της η οροφή, στον εξοφλημένο χώρο, κατακρημνίζεται.



Σχήμα 3.8 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο επιμήκους ευθύγραμμου μετώπου (Pakalnis , 2015).

#### Πλεονεκτήματα:

- Περιορισμένη προπαρασκευή.
- Μέγιστη παραγωγικότητα, συνεχής παραγωγή και περιορισμένη χειρωνακτική εργασία.
- Αρκετά χαμηλό κόστος εκμετάλλευσης.

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Δυνατότητα για απόλυτα μηχανοποιημένη και αυτοματοποιημένη εξόρυξη.
- Περιορισμένη μόνο ανάγκη για εργατικό δυναμικό.
- Αρκετά μεγάλη αποληψιμότητα (70-90%) και μικρή αραίωση (10-20%). Θεωρητικά μπορεί να εξορυχθεί σχεδόν το 100% του κοιτάσματος.
- Ευκολία αερισμού, επίβλεψης και μεταφοράς.
- Πολύ καλές συνθήκες υγιεινής και ασφάλειας (με εξαίρεση τη σκόνη).

**Μειονεκτήματα:**

- Οι κατακρημνίσεις, και κατ' επέκταση οι επιφανειακές καθιζήσεις, καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις και μπορούν να φτάσουν έως και το 80% του ύψους της εξόρυξης. Μπορούν όμως να είναι ελεγχόμενες.
- Άκαμπτη και ανελαστική μέθοδος. Δεν υπάρχει επιλεκτικότητα, εκτός από τη δυνατότητα αλλαγής του ύψους των ανοιγμάτων.
- Ο ρυθμός προχώρησης πρέπει να παραμένει σταθερός ώστε να αποφευχθούν αστοχίες της οροφής.
- Υψηλό κεφαλαιουχικό κόστος.
- Η μονομέτωπη εξόρυξη ενέχει το πρόβλημα της διακοπής της παραγωγής σε περίπτωση αβαρίας.
- Σκόνη, Εκροή μεθανίου (εκρηκτική κατάσταση).
- Πιθανότητα αυτανάφλεξης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και του υψηλού ποσοστού υγρασίας στις κατακρημνιζόμενες περιοχές.

**3.2.6 Μέθοδος διαδοχικών υποορόφων με κατακρήμνιση οροφής (sublevel caving)**

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μεγάλου πάχους και μεγάλης κλίσης κοιτάσματα με μετάλλευμα μέτριας σκληρότητας και μέσης περιεκτικότητας που δεν απαιτούν εκλεκτική εκμετάλλευση. Η περιβάλλουσα βραχώμαζα πρέπει να είναι καλής ποιότητας και με δυνατότητα εύκολης κατακρήμνισης καθώς η επέμβαση για την υποβοήθηση της κατακρήμνισης με εκρηκτική ύλη είναι πολύ δύσκολη και αντιοικονομική.

Η εξόρυξη πραγματοποιείται μέσα σε διαδοχικούς ορόφους, το ύψος των οποίων αποτελεί συνάρτηση του μήκους των διατηρημάτων, εκ των άνω προς τα κάτω. Στοές διανοίγονται μέχρι τα όρια του κοιτάσματος, το κατώτερο τμήμα αποσπάται με χρήση εκρηκτικών υλών, ενώ το ανώτερο κατακρημνίζεται. Αυτή η κατακρήμνιση ακολουθείται παράλληλα από την κατακρήμνιση της υπερκείμενης του ορόφου στείρας περιβάλλουσας βραχώμαζας, με την οποία πληρούνται τελικώς τα κενά που δημιουργούνται.

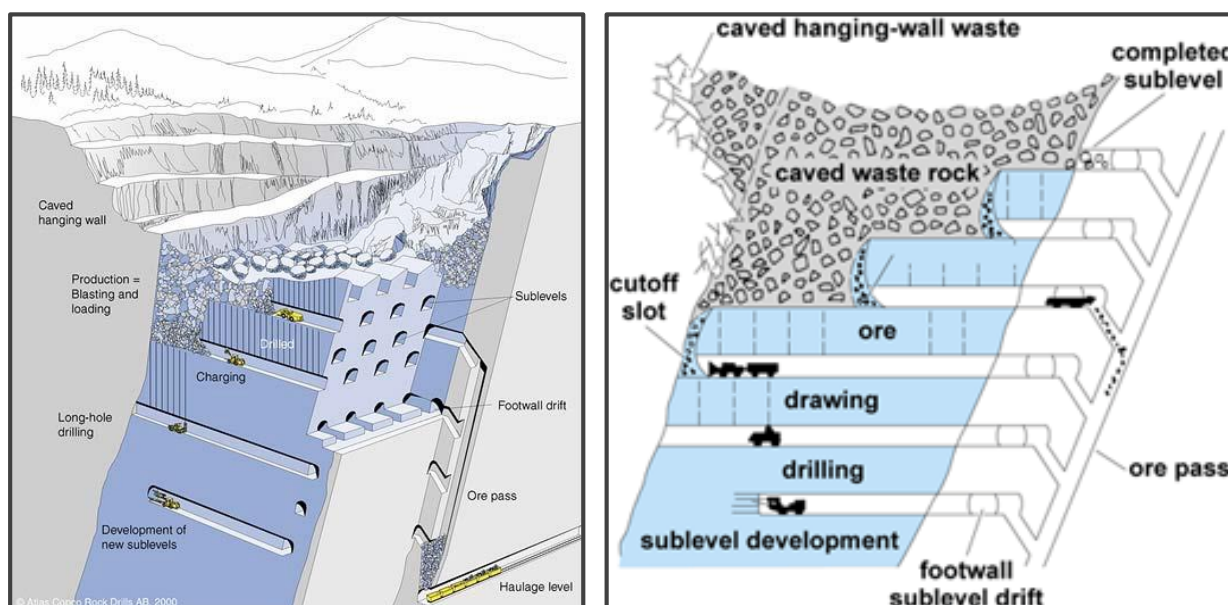
**Πλεονεκτήματα:**

- Αρκετά υψηλή παραγωγικότητα (18-36 t/εργάτη/βάρδια).

- Αρκετά υψηλή αποληψιμότητα (80-90%).
- Κατάλληλη μέθοδος για πλήρη εκμηχάνιση.
- Καλές συνθήκες υγιεινής και ασφάλειας.
- Προσαρμόσιμη, ευέλικτη και επιλεκτική μέθοδος χωρίς ανάγκη για πυλώνες.

#### Μειονεκτήματα:

- Μέσο έως υψηλό κόστος εκμετάλλευσης.
- Μέση έως υψηλή αραίωση (10-35%).
- Επιφανειακές καθιζήσεις λόγω των κατακρημνήσεων.
- Υψηλό κόστος ανάπτυξης.



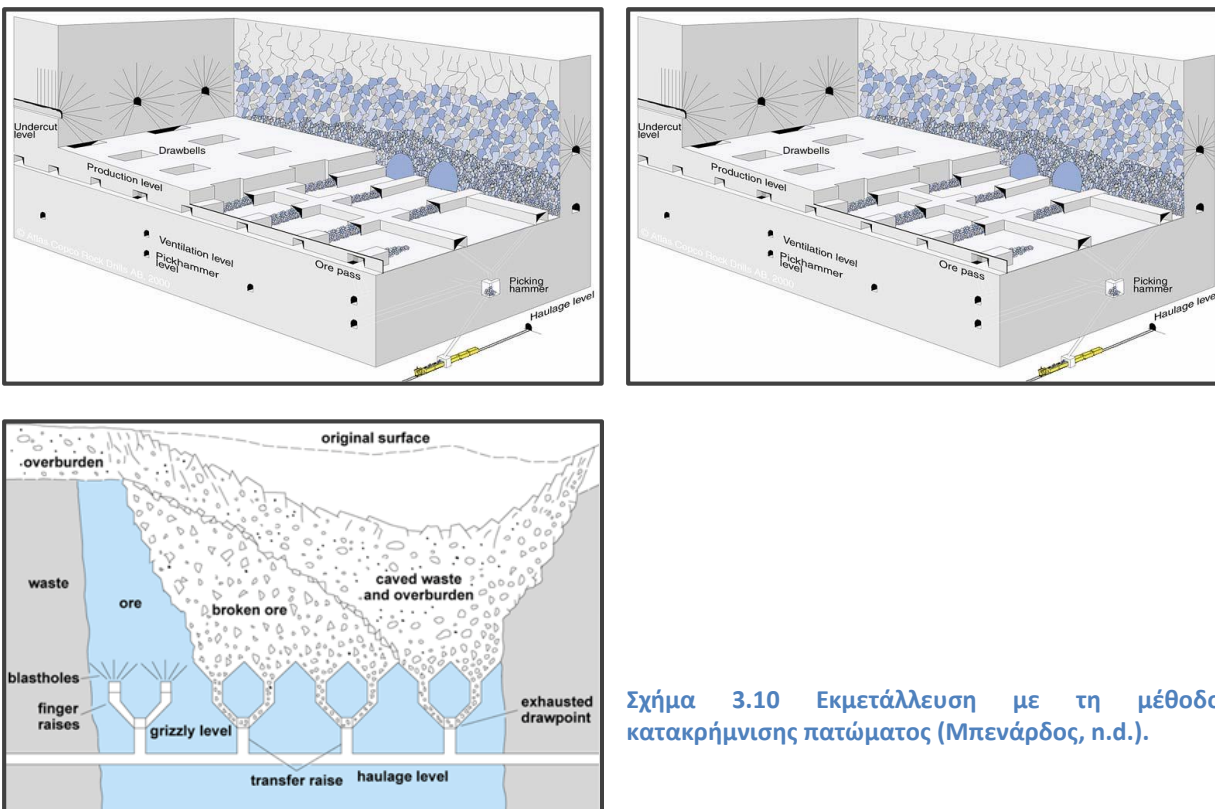
Σχήμα 3.9 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο διαδοχικών υποορόφων με κατακρήμνιση οροφής (Pakalnis , 2015).

### 3.2.7 Μέθοδος κατακρήμνισης πατώματος (block caving)

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε κοιτάσματα με μεγάλη οριζόντια ανάπτυξη, ώστε να μην περιορίζεται η κατακρήμνιση, και σημαντικό πάχος (>25m) ώστε να μην υπάρχει μεγάλη αραίωση/πρόσμιξη του μεταλλεύματος αλλά και να δικαιολογείται το μεγάλο κόστος. Το μετάλλευμα θα πρέπει να είναι συνεκτικό, ώστε να επιτρέπει την κατασκευή της υποσκαφής κατά το ξεκίνημα, εύθραυστο, ώστε να κατακρημνίζεται εύκολα χωρίς υπερμεγέθεις όγκους αλλά και να μην απαιτεί διαλογή ή εκλεκτική εξόρυξη. Τα υπερκείμενα πετρώματα πρέπει να κατακρημνίζονται εύκολα, δίνοντας μεγάλα τεμάχια, τα οποία, καθώς ακολουθούν την κάθοδο του μεταλλεύματος, να το συμπιέζουν προκαλώντας τον κατακερματισμό του.

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Η μέθοδος της εκμετάλλευσης με την κατακρήμιση πατώματος παρουσιάζεται σαν φυσική εξέλιξη της μεθόδου των διαδοχικών ορόφων. Στη συγκεκριμένη μέθοδο το ύψος του ορόφου αυξάνει υπέρμετρα καλύπτοντας ολόκληρο το ύψος του πατώματος, που μπορεί να φθάνει 130 και πλέον μέτρα. Μεγάλα τμήματα του κοιτάσματος υποσκάπτονται κοντά στη βάση (undercut). Η οροφή της εκσκαφής αφήνεται να κατακρημισθεί, το κενό γεμίζει από το θραυσμένο υλικό, οπότε και λαμβάνει χώρα η αποκόμιση του μεταλλεύματος μέχρι να παρουσιαστούν τα στείρα.



Σχήμα 3.10 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο κατακρήμισης πατώματος (Μπενάρδος, n.d.).

#### Πλεονεκτήματα:

- Αρκετά υψηλή παραγωγικότητα (14-36 t/εργάτη/βάρδια).
- Πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής.
- Υψηλή αποληψιμότητα (90-100%), αλλά ταυτόχρονα και πιθανότητα υψηλής αραίωσης (10-20%).
- Η θραύση του πετρώματος πραγματοποιείται αποκλειστικά από την κατακρήμιση χωρίς να απαιτείται επιπλέον διάτρηση και χρήση εκρηκτικών.
- Μέθοδος κατάλληλη για βαρυντικό διαχωρισμό ή για πλήρως μηχανοποιημένη διαχείριση των υλικών.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



- Ο αερισμός συνήθως είναι πολύ ικανοποιητικός παρέχοντας καλές συνθήκες υγιεινής και ασφάλειας.

**Μειονεκτήματα:**

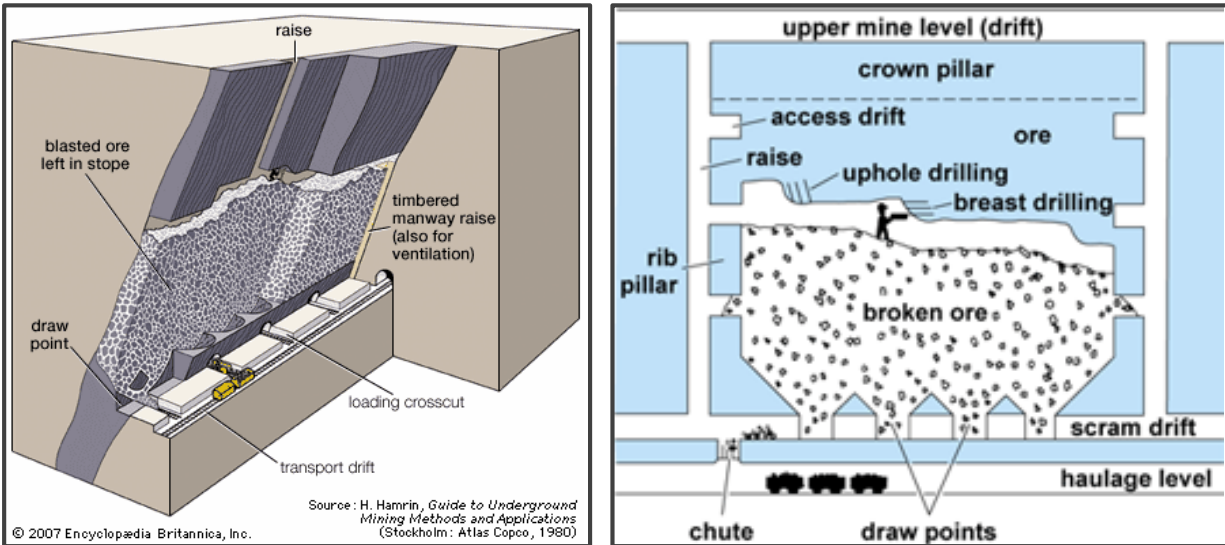
- Επιφανειακές καθιζήσεις με ολοκληρωτική καταστροφή της επιφάνειας του εδάφους.
- Ο διαχωρισμός είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία της μεθόδου.
- Εκτεταμένη, δαπανηρή και με χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξη του μεταλλείου.
- Μη ευέλικτη μέθοδος.
- Κίνδυνος αυτανάφλεξης (ιδιαίτερα αν τα σουλφίδια είναι σε ποσοστό >45%) σε περίπτωση καθυστέρησης του διαχωρισμού κατά την κατακρήμνιση.

**3.2.8 Μέθοδος συμπτυσσόμενου μετώπου (Shrinkage stoping)**

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε κοιτάσματα μεγάλης κλίσης (>50°) με πάχος 1-10m και περιβάλλουσα βραχώμαζα καλών γενικά μηχανικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, απαραίτητη είναι η ομαλότητα της οροφής, και ιδιαίτερα της στρώσης, καθώς οποιαδήποτε γεωμετρική ανωμαλία δυσχεραίνει τη ροή του θραυσμένου μεταλλεύματος, όπως και σαφής διαχωρισμός μεταλλεύματος και παρυφών ώστε να επιτευχθεί ομοιογενής μεταλλοφορία και να ελαχιστοποιηθεί, κατά το δυνατόν, η αραίωση του μεταλλεύματος. Τέλος, το μετάλλευμα θα πρέπει να μην υπόκειται σε συσσωμάτωση, οξείδωση και αυτανάφλεξη λόγω του αυξημένου χρόνου παραμονής του στο μέτωπο εργασίας.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το μετάλλευμα θραύεται σε οριζόντιες πλάκες, ξεκινώντας από κάτω προς τα πάνω. Μετά την εξόρυξή του παραμένει στο χώρο σχηματίζοντας ένα δάπεδο εργασίας και λειτουργώντας ως υποστήριξη των παρυφών του μετώπου. Από τα φρέατα αποκομιδής λαμβάνεται μόνο το επίπλησμα, το οποίο αποτελεί περίπου το 30-40% του μεταλλεύματος, ενώ το υπόλοιπο (60-70%) παραμένει στο χώρο και αφαιρείται μετά το τέλος της εξόρυξης.

Η μέθοδος συμπτυσσόμενου μετώπου αποτελούσε κοινή πρακτική πριν τη δεκαετία του 1980, οπότε και η συμμετοχή μηχανημάτων βαρέως τύπου στη μεταλλευτική ήταν περιορισμένη. Πλέον η μέθοδος χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε απομονωμένες περιοχές για την εκμετάλλευση μικρού πάχους ζωνών όπου η χρήση μηχανημάτων δεν είναι εφικτή, ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται το μικρότερο δυνατό κόστος επένδυσης.



Σχήμα 3.11 Εκμετάλλευση με τη μέθοδο συμπτυσσόμενου μετώπου (Μπενάρδος, n.d.).

#### Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος κεφαλαιουχικών επενδύσεων.
- Περιορισμένα έργα προπαρασκευής.
- Μεγάλη ταχύτητα προχώρησης του μετώπου.
- Εξαιρετικά περιορισμένη υποστήριξη.
- Μεγάλη παραγωγή ανά μονάδα επιφανείας.
- Εκμετάλλευση της βαρύτητας τόσο για την εξόρυξη όσο και για την εξαγωγή και μεταφορά του μεταλλεύματος.
- Καλός αερισμός.
- Αρκετά καλή αποληψιμότητα (75-85%) και χαμηλή αραίωση (<10%).

#### Μειονεκτήματα:

- Χαμηλή έως μέση παραγωγικότητα (5-9t/εργάτη/βάρδια).
- Μέτριο έως αρκετά υψηλό κόστος εκμετάλλευσης.
- Αδυναμία εκλεκτικής εκμετάλλευσης ή διαχωρισμού των στείρων που παρεμβάλλονται.
- Ακαμψία που δεν επιτρέπει την αντιμετώπιση των ανωμαλιών του κοιτάσματος ή την εκμετάλλευση παραφυάδων.
- Δύσκολη προσπέλαση του προσωπικού και των υλικών στο χώρο του μετώπου.
- Κίνδυνοι πρόσμιξης στείρων ή απώλειας μεταλλεύματος.
- Ακίνητοποίηση του μεγαλύτερου μέρους (>60%) του μεταλλεύματος που εξορύσσεται.

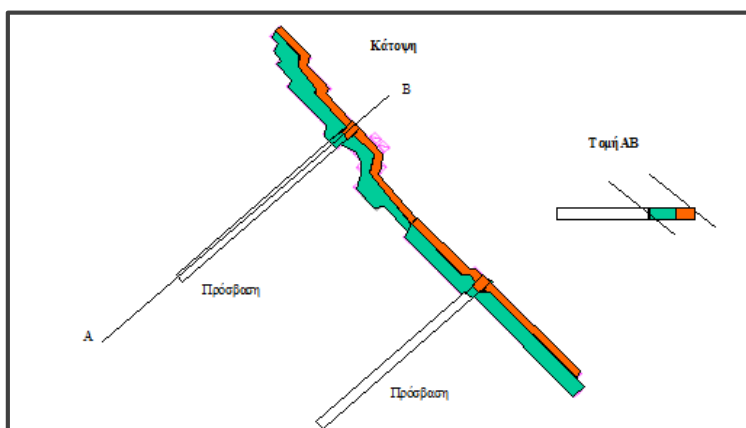
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

### 3.3 Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εκμετάλλευσης

Το μεταλλείο Ολυμπιάδας είναι αργούν επί δεκαπέντε (15) χρόνια και έχει ήδη δομημένη παραγωγική διαδικασία εκμετάλλευσης, αυτή των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων. Συνεπώς η επιλογή της μεθόδου εκμετάλλευσης βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στις ήδη υπάρχουσες υποδομές, μετά την αποκατάσταση και τον εκσυγχρονισμό αυτών, και οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν από την εταιρία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. για την εκμετάλλευση είναι ίδιες ή παρόμοιες με εκείνες που ιστορικά αποδείχθηκαν κατάλληλες για το εν λόγω κοιτάσμα.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Ελληνικός Χρυσός (2011) η μέθοδος εκμετάλλευσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι ένας συνδυασμός διαμήκους και εγκάρσιας κοπής και λιθογόμωσης, με ανερχόμενη φορά ενώ όπου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος το επιτρέπουν, θα αναπτυχθεί η μέθοδος της διπλής κοπής και λιθογόμωσης.

- Μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων με διαμήκη προσανατολισμό:** Σε περιοχές του κοιτάσματος με πάχος μικρότερο ή ίσο των 10m η στοά παραγωγής θα αναπτύσσεται κατά μήκος της μεταλλοφορίας, δηλαδή θα αναπτύσσεται στη στρώση της μεταλλοφορίας αποφεύγοντας την επαφή με την οροφή. Μετά την εξόρυξή της και ανάλογα με το πλάτος του κοιτάσματος και τις συνθήκες του περιβάλλοντος πετρώματος, το μετάλλευμα πλησίον της περιοχής της οροφής είτε θα ληφθεί με πλευρική διεύρυνση κατά την οπισθοχώρηση ή θα λιθογομωθεί η στοά και θα ξεκινήσει εξόρυξη δεύτερης στοάς κοντά στην οροφή της μεταλλοφορίας.



Σχήμα 3.12 Διαμήκης εκμετάλλευση στις στενές περιοχές του κοιτάσματος (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

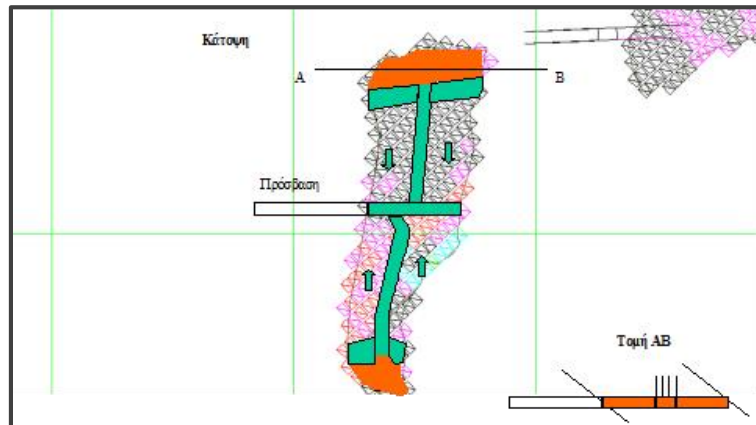
- Μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων με εγκάρσιο προσανατολισμό:** Η μέθοδος αυτή σχεδιάζεται σε τμήματα της μεταλλοφορίας που έχουν πάχος μεγαλύτερο των 10m. Σε αυτήν την περίπτωση η πρώτη στοά εξορύσσεται κατά μήκος του κέντρου του ορόφου από όπου ανοίγονται εγκάρσιες στοές προς την οροφή και την στρώση της μεταλλοφορίας, οι οποίες στη συνέχεια οπισθοχωρούν από τα άκρα του κοιτάσματος προς το κέντρο. Μετά την

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 57

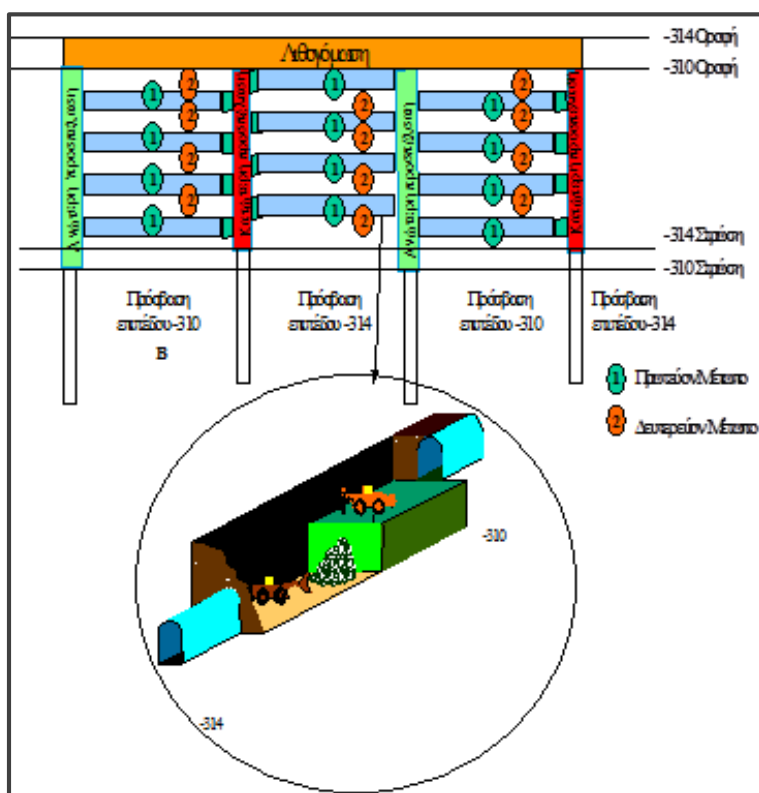
ολοκλήρωση της ανάπτυξης των στοών ξεκινά η κύρια φάση διάνοιξης των στοών. Οι παρειές των στοών διευρύνονται έως 3m από κάθε πλευρά, όπου αυτό είναι δυνατό. Υποστήριξη (μεταλλικοί ράβδοι ή /και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή /και συρματόσχοινα) εφαρμόζεται ανάλογα με την ποιότητα της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η οπισθοχώρηση συνεχίζεται έως το σημείο που έχει σχεδιαστεί η κατασκευή του φράγματος λιθογόμωσης.



Σχήμα 3.13 Εγκάρσια εκμετάλλευση σε μεγάλα τμήματα του κοιτάσματος (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

- **Μέθοδος διπλών κοπών και λιθογομώνσεων:** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε τμήματα του κοιτάσματος με μεγάλο πλάτος, με κύριο χαρακτηριστικό το ότι η ανώτερη πρόσβαση των στοών αυτών εξορύσσεται με πρωτεύουσα και δευτερεύουσα σειρά, με μέγιστο άνοιγμα 8m και χρήση συρματόσχοινου, ενώ το υπόλοιπο κατώτερο τμήμα υφίσταται διάτρηση και ανατίναξη σαν βαθμίδα με υψηλή παραγωγικότητα. Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης των στοών ξεκινά η κύρια φάση διάνοιξης των βαθμίδων. Οι παρειές των στοών διευρύνονται, όπου αυτό είναι δυνατόν, έως τα 3m από κάθε πλευρά ξεκινώντας από το τέλος της κύριας στοάς προσπέλασης. Το άνοιγμα αυτό δεν πρέπει να ξεπερνάει σε πλάτος τα 10m και η διαδικασία συνεχίζεται ως το σημείο κατασκευής του φράγματος λιθογόμωσης. Η αποκομιδή του μεταλλεύματος γίνεται με χρήση φορτωτών που το μεταφέρουν είτε σε λούκια μεταλλεύματος ή φορτώνεται κατευθείαν σε φορτηγά και εν συνεχεία η εξορυχθείσα περιοχή λιθογομώνεται κατάλληλα.



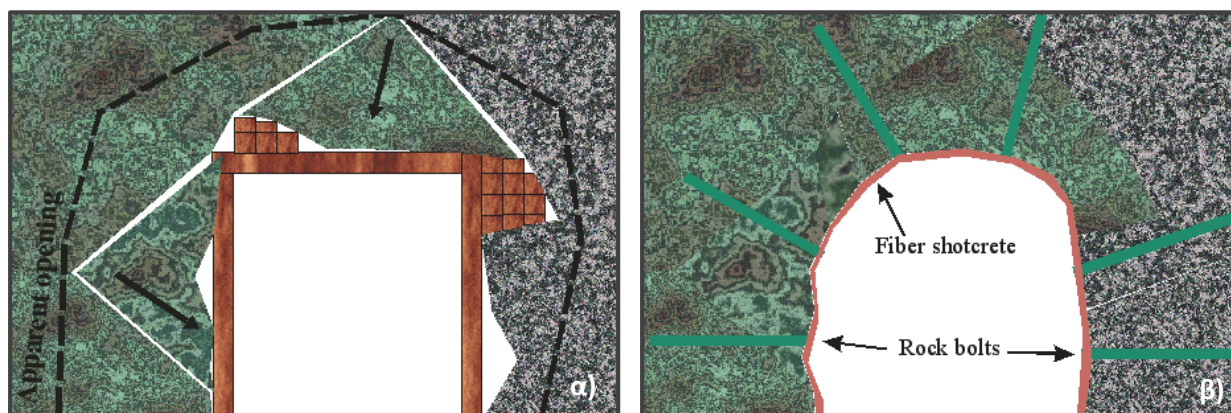


Σχήμα 3.14 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου των διπλών κοπών και λιθογομώσεων (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

### 3.4 Μέτρα υποστήριξης μεταλλευτικών έργων

Η υποστήριξη των υπόγειων μεταλλευτικών έργων μπορεί να διακριθεί σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Τα μέτρα που σχετίζονται με την ίδια τη δομή της βραχώμαζας. Αυτά ενεργοποιούνται με την καλή οργάνωση του σχεδιασμού εξόρυξης, καθώς και την αναγνώριση και εκμετάλλευση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της βραχώμαζας που μπορούν να βοηθήσουν στην αυτοϋποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος.
- Τα τεχνητά στοιχεία υποστήριξης, τα οποία μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε:
  - Παθητικά, τα μέτρα υποστήριξης δηλαδή που προϋποθέτουν την μετακίνηση της βραχώμαζας προκειμένου να λειτουργήσουν, και
  - Ενεργητικά, τα μέτρα υποστήριξης δηλαδή που με την εγκατάστασή τους ασκούν στη βραχώμαζα ένα προκαθορισμένο φορτίο, χωρίς να είναι απαραίτητη η αστοχία της.



Σχήμα 3.15 Τεχνητά μέτρα υποστήριξης υπόγειων στοών α) παθητικά μέτρα – ξύλινα πλαίσια, β) ενεργητικά μέτρα – εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και προεντεταμμένα αγκύρια (Mathis, 2001).

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα δοθεί έμφαση στα τεχνητά μέτρα άμεσης υποστήριξης της βραχώμαζας χωρίς όμως αυτό να υποβαθμίζει την σημασία των έμφυτων χαρακτηριστικών της βραχώμαζας που ενισχύουν την ικανότητα αυτοϋποστήριξης της.

### 3.4.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Ο όρος χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που συνίστανται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10 mm) τα οποία εφαρμόζονται με εκτόξευση (με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μίγμα όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Το υγρό μίγμα χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες. Κατά την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται:

- Αδρανή (διάσταση κόκκου έως 10mm)
- Παιπάλη πυριτίου
- Επιταχυντής πήξεως
- Νερό

Η παιπάλη πυριτίου είναι μια λεπτόκοκκη ποζουλάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του. Επιπλέον με την προσθήκη της ποζουλάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχώμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρέχει στη διατομή της σήραγγας την απαιτούμενη διατμητική αντοχή για την αποφυγή αστοχιών. Όμως η συνεισφορά του σε εφελκυστική αντοχή και κατ' επέκταση στην ικανότητα ανάληψης καμπτικής ροπής από τη διατομή είναι μικρή. Η αντοχή και η πλαστιμότητα του

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

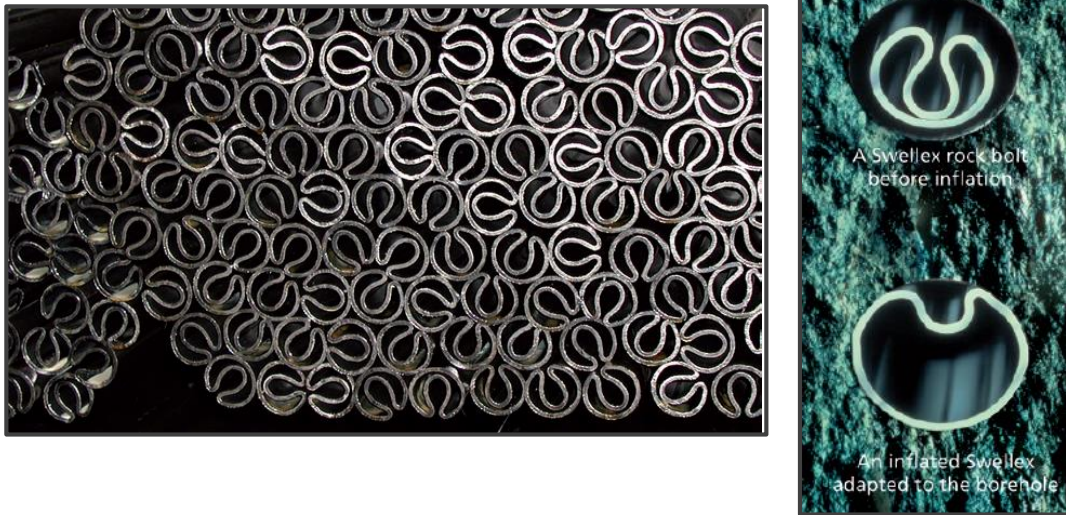
εκτοξευόμενου σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη μεταλλικών ινών οι οποίες δρουν ως σπλισμός. Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως σπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τείνει να αντικαταστήσει την όπλιση με μεταλλικά πλέγματα και πλεονεκτεί για τους εξής λόγους:

- Δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα.
- Δεν υπόκειται σε ηλεκτρολυτική διάβρωση επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα.
- Η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη απ' ότι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχόμαζας είναι αρκετά ανώμαλη.

### 3.4.2 Αγκύρια βράχου και συρματόσχοινα

Τα αγκύρια βράχου και τα συρματόσχοινα αποτελούν βράχου διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

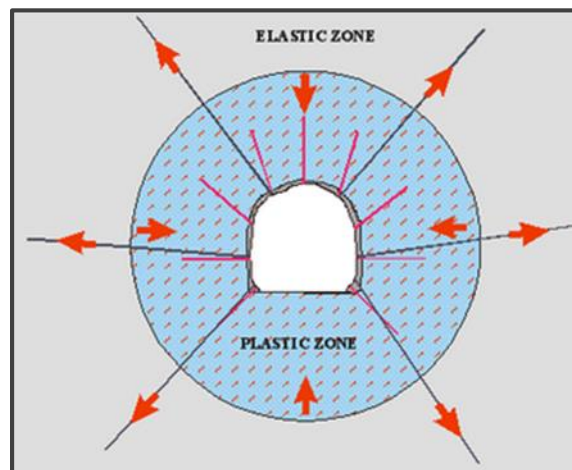
- Τα προεντεταμένα αγκύρια και τα συρματόσχοινα, τα οποία αποτελούνται από χαλύβδινους τένοντες και βασίζονται στην ενεργητική φόρτιση της βραχόμαζας λόγω της προέντασης.
- Τα παθητικά αγκύρια και συρματόσχοινα, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη φόρτίσή τους λόγω της παραμόρφωσης της βραχόμαζας. Τα παθητικά αγκύρια διακρίνονται επιπλέον σε:
  - Αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης. Πρόκειται κυρίως για ηλώσεις βράχου, αποτελούμενες από μια χαλύβδινη ράβδο (τυπικά ράβδο σπλισμού StIV διαμέτρου 20-25mm) ή συρματόσχοινα τα οποία τοποθετούνται εντός οπής στη βραχόμαζα (διαμέτρου 38-50mm) πληρωμένης με ένεμα (τσιμεντένεμα ή ένεμα συνθετικής ρητίνης). Οι ηλώσεις αυτές είναι συνήθως προσωρινές (δηλαδή έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής) μπορούν όμως να λειτουργήσουν και ως μόνιμες με κατάλληλη προστασία από τη διάβρωση.
  - Αγκύρια πρόσφυσης άκρου. Τα αγκύρια πρόσφυσης άκρου είναι συνήθως τύπου διαστελόμενης κεφαλής. Πρόκειται για ηλώσεις χωρίς ενεμάτωση που αποτελούνται από κοίλη μεταλλική διατομή και αποκτούν συνεχή πρόσφυση με τη βραχόμαζα με εισπίεση νερού στο εσωτερικό της διατομής που προκαλεί τη διόγκωσή της. Λόγω έλλειψης προστασίας από τη διάβρωση αλλά και λόγω της λεπτότοιχης διατομής τους τα αγκύρια αυτά έχουν μικρή διάρκεια ζωής. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι αναλαμβάνουν φορτία πολύ γρήγορα επειδή δεν απαιτούν την πήξη του ενέματος για την επίτευξη πρόσφυσης με την περιβάλλουσα βραχόμαζα. Υπάρχουν δύο τύποι ευρέως χρησιμοποιούμενων αγκυριών πρόσφυσης άκρου:
    - Οι ηλώσεις τύπου Swellex και
    - Οι ηλώσεις τύπου Split-Set.



Εικόνα 3.1 Αγκύρια πρόσφυσης άκρου τύπου swellex και τρόπος λειτουργίας τους ([www.minovausa.com](http://www.minovausa.com)).

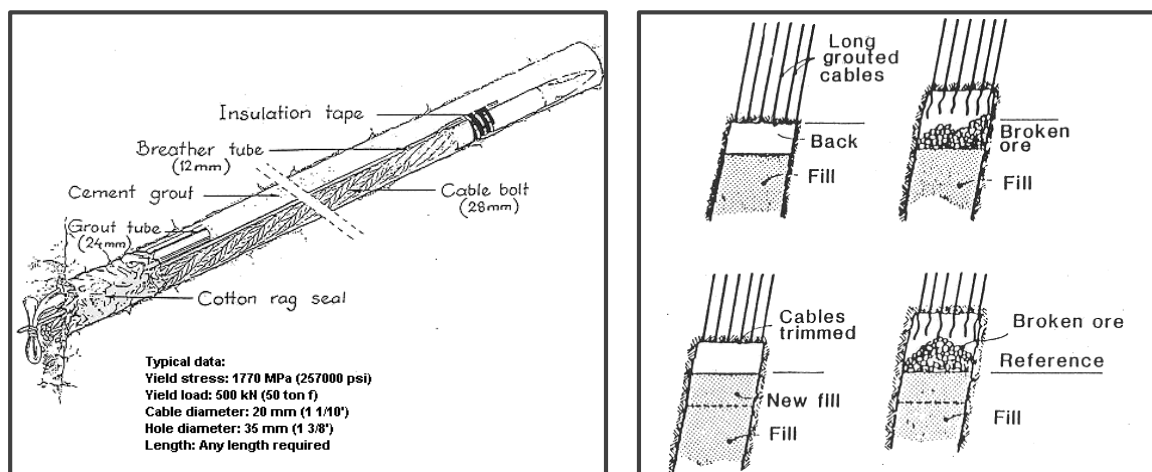
### 3.4.3 Συρματόσχοινα

Πρόκειται για συρματόσχοινα αποτελούμενα από περιστρεμμένες ίνες χάλυβα που λειτουργούν με όμοιο τρόπο όπως τα αγκύρια. Τοποθετούνται εντός σπηής πληρωμένης με τσιμεντένεμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε με προένταση είτε χωρίς. Σημαντικά πλεονεκτήματα των συρματόσχοινων είναι το μεγάλο μήκος τους έναντι των αγκυρίων, η εύκολη τοποθέτηση τους ακόμη και σε στοές μικρής διαμέτρου, το χαμηλό κόστος, η δυνατότητα ανάληψης μεγάλων φορτίων καθώς και η υψηλή αντοχή τους στη διάβρωση ενώ ως μειονέκτημα μπορεί να σημειωθεί η ανάγκη παρέλευση αρκετών ημερών από την τοποθέτηση του ενέματος μέχρι την προένταση τους.



Σχήμα 3.16 Συμβολή των συρματόσχοινων στην υποστήριξη διατομής κατά την διάνοιξη στοών σε πλαστικές συνθήκες (Mathis, 2001).



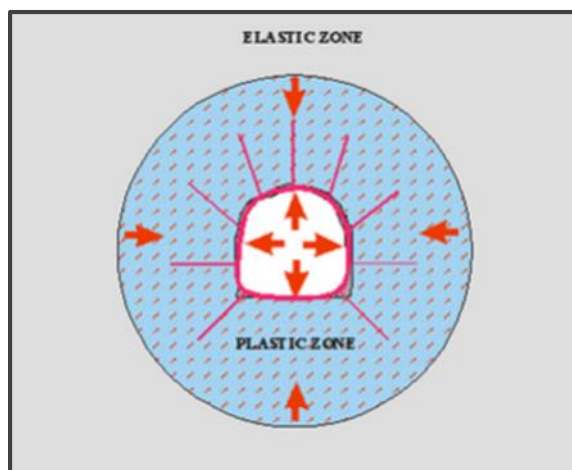


Σχήμα 3.17 Συρματόσχοινα και τρόπος χρήσης αυτών στη μεταλλευτική (Pakalnis, 2005).

### 3.4.4 Χαλύβδινες νευρώσεις – μεταλλικά πλαίσια

Τα μεταλλικά πλαίσια λειτουργούν κυρίως ως σπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για την αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητάς του αλλά και για τη βελτίωση της δυνατότητας ανάληψης φορτίων. Τα πλαίσια τοποθετούνται κατά τη διατομή της σήραγγας και είναι των εξής τύπων:

- Τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB100-160.
- Δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) που αποτελούνται από ράβδους σπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος.
- Ξύλινα πλαίσια



Σχήμα 3.18 Λειτουργία πλαισίων σε πλαστικές συνθήκες (Mathis, 2001).

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 63

Τα μεταλλικά πλαίσια είναι πολύ ανθεκτικά στις παραμορφώσεις και προσφέρουν πολύ καλή υποστήριξη σε πτωχής ποιότητας πετρώματα. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος τους και η δύσκολη τοποθέτησή τους.



Εικόνα 3.2 Χαλύβδινα πλαίσια α) πλαίσια διατομής διπλού ταυ (HEB) κατά την εφαρμογή τους στο μέτωπο -100 του μεταλλείου Ολυμπιάδας, β) δικτυωτά πλαίσια (lattice girder) και (HEB).

### 3.4.5 Λοιπά μέτρα υποστήριξης

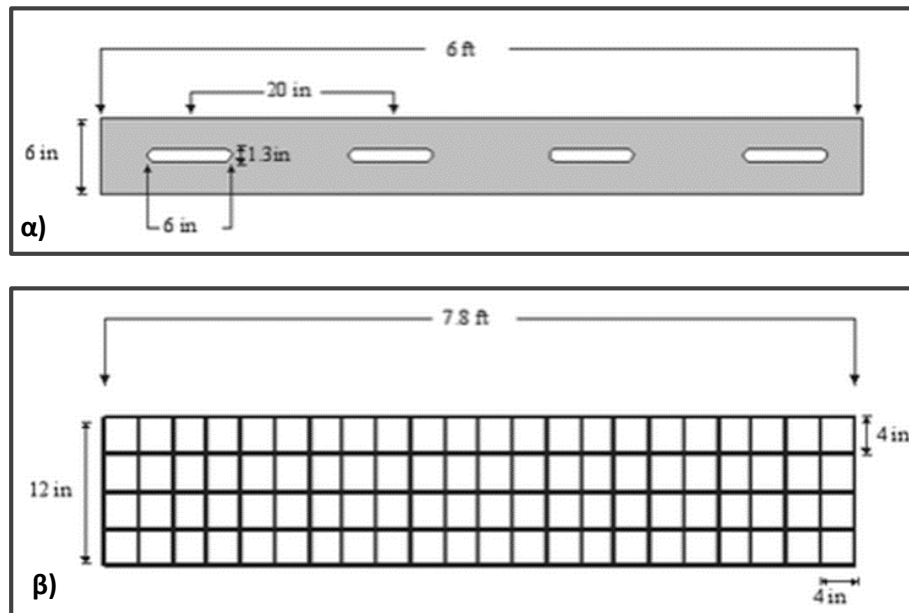
#### 3.4.5.1 Μεταλλικό πλέγμα

Το μεταλλικό πλέγμα χρησιμοποιείται με σκοπό να υποστηρίξει και να αποτρέψει την πτώση μικρών και χαλαρών τεμαχών βράχου. Αποτελεί οικονομική και ταχεία μέθοδο υποστήριξης που παρέχει εύκολη διασφάλιση της σωστής ποσότητας σπλισμού ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Δεν μπορεί όμως να φέρει μεγάλα φορτία ενώ μπορεί εύκολα να υποστεί φθορές από εκτοξευόμενα τεμάχια βράχου κατά τη διάρκεια των εκρήξεων. Επιπλέον, λόγω της ελαστικότητας του προκαλεί φαινόμενα αναπήδησης του σκυροδέματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών πίσω από τα πλέγματα και την τοπική απομείωση της φέρουσας ικανότητας της προσωρινής υποστήριξης.

Το μεταλλικό πλέγμα τείνει να αντικατασταθεί από τη χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος.

#### 3.4.5.2 Μεταλλικοί «σύνδεσμοι» (straps)

Οι μεταλλικοί «σύνδεσμοι» (straps) αποτελούν βασικό στοιχείο της υποστήριξης σε περιπτώσεις κερματισμένου βράχου. Χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μεταφορά του εφαρμοζόμενου φορτίου στα τεμάχια της βραχώμαζας που βρίσκονται ανάμεσα στα τοποθετημένα αγκύρια. Απαραίτητος για την αποτελεσματική λειτουργία των «μεταλλικών συνδέσμων» είναι ο ορθός προσανατολισμός τους ούτως ώστε να συγκρατούνται τα ελεύθερα τεμάχια. Επιπλέον, τοποθετούμενα κάθετα στον άξονα της στοάς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Σχήμα 3.19 Μεταλλικοί «σύνδεσμοι» (straps) για εφαρμογή α) χωρίς εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, β) με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Mathis, 2001).



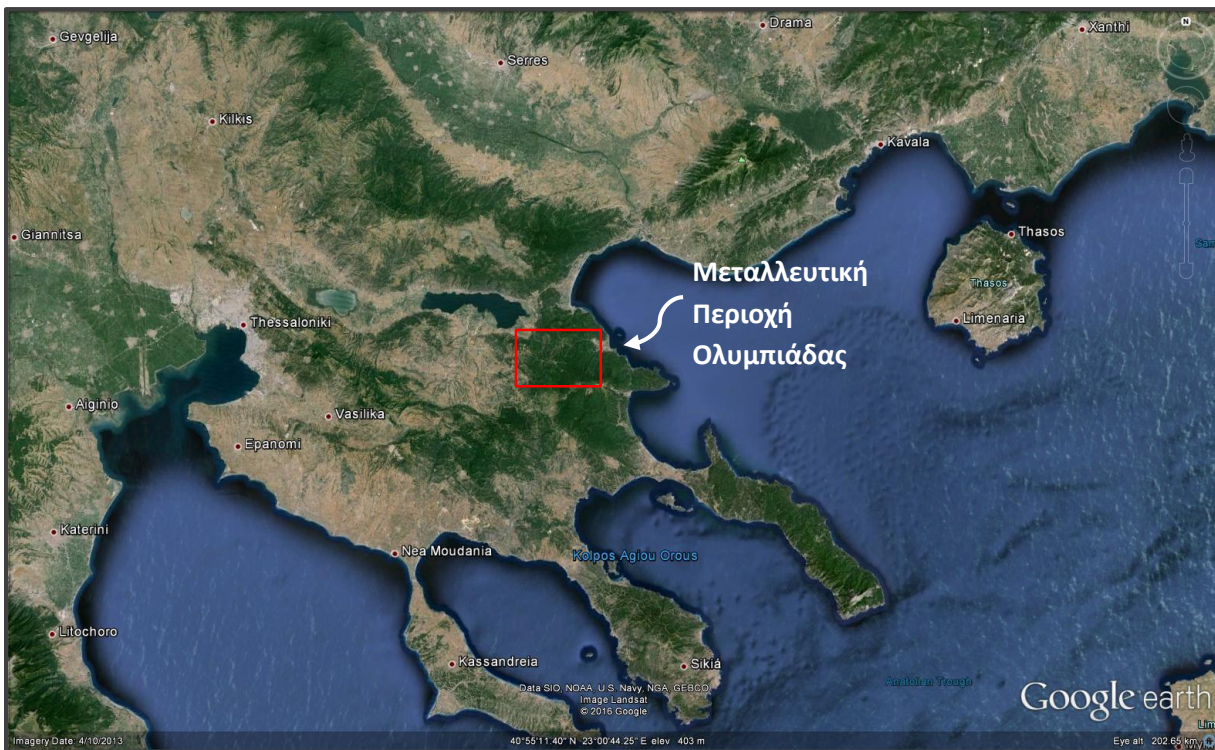
Εικόνα 3.3 Εφαρμογή των μεταλλικών των μεταλλικών «συνδέμων» (straps) στο επίπεδο -173 του μεταλλείου Ολυμπιάδας.



## 4 Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας

### 4.1 Γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής του Μεταλλείου Ολυμπιάδας

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη μεταλλευτική περιοχή της Ολυμπιάδας, στο ΒΑ τμήμα της Χαλκιδικής και ανήκει γεωτεκτονικά στη Σερβομακεδονική μάζα.



Εικόνα 4.1 Δορυφορική εικόνα όπου απεικονίζεται η μεταλλευτική περιοχή της Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική.

#### 4.1.1 Γεωγραφική θέση Μεταλλείου Ολυμπιάδας

Το μεταλλείο Ολυμπιάδας τοποθετείται στα ΒΑ του Δήμου Αριστοτέλη που υπάγεται στο Νομό Χαλκιδικής.

Η έκταση του Νομού Χαλκιδικής, με πρωτεύουσα τον Πολύγυρο, σύμφωνα με τα στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας, καλύπτει έκταση 2.918 km<sup>2</sup>. Η πληθυσμιακή πυκνότητα του νομού είναι 35,9 κάτοικοι / km<sup>2</sup> ενώ συνολικά ο πληθυσμός της Χαλκιδικής, με βάση την απογραφή του 2001, ανέρχεται σε 104.894 κατοίκους.

Ο Δήμος Αριστοτέλη τοποθετείται στα ανατολικά του Νομού Χαλκιδικής καλύπτοντας το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της ορεινής δασικής ενότητας Χολομώντα – Στρατονικού. Η έκταση του δήμου

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



ανέρχεται σε 740 km<sup>2</sup> ενώ ο πληθυσμός του υπολογίζεται σήμερα σε περίπου 20.000 κατοίκους (18.861 σύμφωνα με τα στοιχεία της απογραφής του 2001).

Το έδαφος της χερσονήσου της Χαλκιδικής ποικίλει από ορεινό και δυσπρόσιτο, π.χ. χερσόνησος του Άθω, έως λοφώδες με δάση και άφθονα νερά. Το κλίμα της περιοχής είναι γενικά μεσογειακό, με ήπιους χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια. Αυτό οφείλεται στην ευεργετική επίδραση της θάλασσας που την περιβάλλει. Το ύψος των βροχοπτώσεων κυμαίνεται από 600mm έως 800 mm, αλλά στις υψηλότερες κορυφές της χερσονήσου ξεπερνά τα 1000mm.



Εικόνα 4.2 Δορυφορική εικόνα της εγγύτερης περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

#### 4.1.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή των Μεταλλευτικών Εγκαταστάσεων Ολυμπιάδας χαρακτηρίζεται από την παρουσία του ήπιου ορεινού όγκου του όρους Στρατωνικού, με ανάπτυξη από Δ προς Α.

Η πεδινή περιοχή Ολυμπιάδας αναπτύσσεται σε υψόμετρο 0 - 20 m, καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις και περιβάλλεται από την ημιορεινή ζώνη. Η ημιορεινή ζώνη καταλαμβάνει τις ΒΑ παρυφές του Στρατωνικού όρους και χαρακτηρίζεται από έντονες κλίσεις. Περιορισμένο τμήμα της έχει ορεινό χαρακτήρα, με το μέγιστο υψόμετρο, 920 m, να εντοπίζεται εντός των ορίων της λεκάνης απορροής του ρέματος Μπαχτσίνα. Δύο ακόμη λεκάνες απορροής εντοπίζονται στην περιοχή, η λεκάνη Μαυρόλακκα και η λεκάνη Πετρόλακκα (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Η περιοχή γύρω από το μεταλλείο της Ολυμπιάδας χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβολή του ανάγλυφου. Συγκεκριμένα, ενώ στα ΒΑ του μεταλλείου εκτείνεται η πεδινή περιοχή του Μαυρόλακκα με αλλουβιακές αποθέσεις χωρίς βλάστηση, η οποία και καταλήγει στη θάλασσα, στα ΝΔ του μεταλλείου υψώνονται οι απότομες πλαγιές του Στρατονικού Όρους με πυκνή δασοκάλυψη (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

Όσον αφορά στην ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου η ευρύτερη περιοχή μελέτης τοποθετείται εντός της υδρολογικής λεκάνης του Μαυρόλακκα με γενική διεύθυνση Δ-Α και έκταση 42.4km<sup>2</sup>. Η μεταλλευτική δραστηριότητα παλιότερων χρονικών περιόδων είχε σαν αποτέλεσμα την εκτροπή του ανάντη τμήματος του Ξηρόλακκα περίπου 3km πριν τις εκβολές προς τον Μαυρόλακκα νοτιότερα. Η ανατολική πλευρά της λεκάνης είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου εντός της πεδιάδας της Ολυμπιάδας, ενώ η δυτική είναι ημιορεινή. Ο Μαυρόλακκας είναι το μόνο υδατόρεμα της περιοχής Ολυμπιάδας με μόνιμη ροή όλο το χρόνο, από το υψόμετρο +600m περίπου και κατάντη μέχρι την ακτή, τους υγρούς μήνες, και με σημείο ξήρανσης 50-150m δυτικά της εθνικής οδού κατά την ξηρή περίοδο. Από πλευράς κάλυψης της λεκάνης του Μαυρόλακκα διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας (93%) κατέχουν δασικές και θαμνώδεις εκτάσεις ενώ μικρό τμήμα της (6%) καλύπτεται από πεδινές εκτάσεις (καλλιέργειες και αγροί) (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

Πλησίον της περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας βρίσκεται ο υδροκρίτης της λεκάνης Μπαχτσίνα - Μπασδέκη. Η λεκάνη αυτή βρίσκεται νότια της λεκάνης του Μαυρόλακκα με γενική διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και ακολουθεί ρήγματα με αντίστοιχες διευθύνσεις κάτω από τις μισογάγκειες Μπασδέκης Λάκκος και Μπαχτσίνας Λάκκος. Ο άνω ρους του Μπασδέκη Λάκκου τροφοδοτείται από μικρό-υδατορέματα και έχει επηρεαστεί υδρολογικά από την παλαιά λειτουργία του μεταλλείου Ολυμπιάδας, πάνω από το οποίο η απορροή σχεδόν μηδενίζεται την ξηρή περίοδο, λόγω αυξημένων κατεισδύσεων (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

### 4.1.3 Γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων της Ολυμπιάδας τοποθετείται στην Σερβομακεδονική Μάζα της Ελληνικής Ενδοχώρας και ειδικότερα στην ενότητα Κερδουλλίων. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η θέση της Σερβομακεδονικής Μάζας στον Ελληνικό χώρο.

#### 4.1.3.1 Η Σερβομακεδονική Μάζα

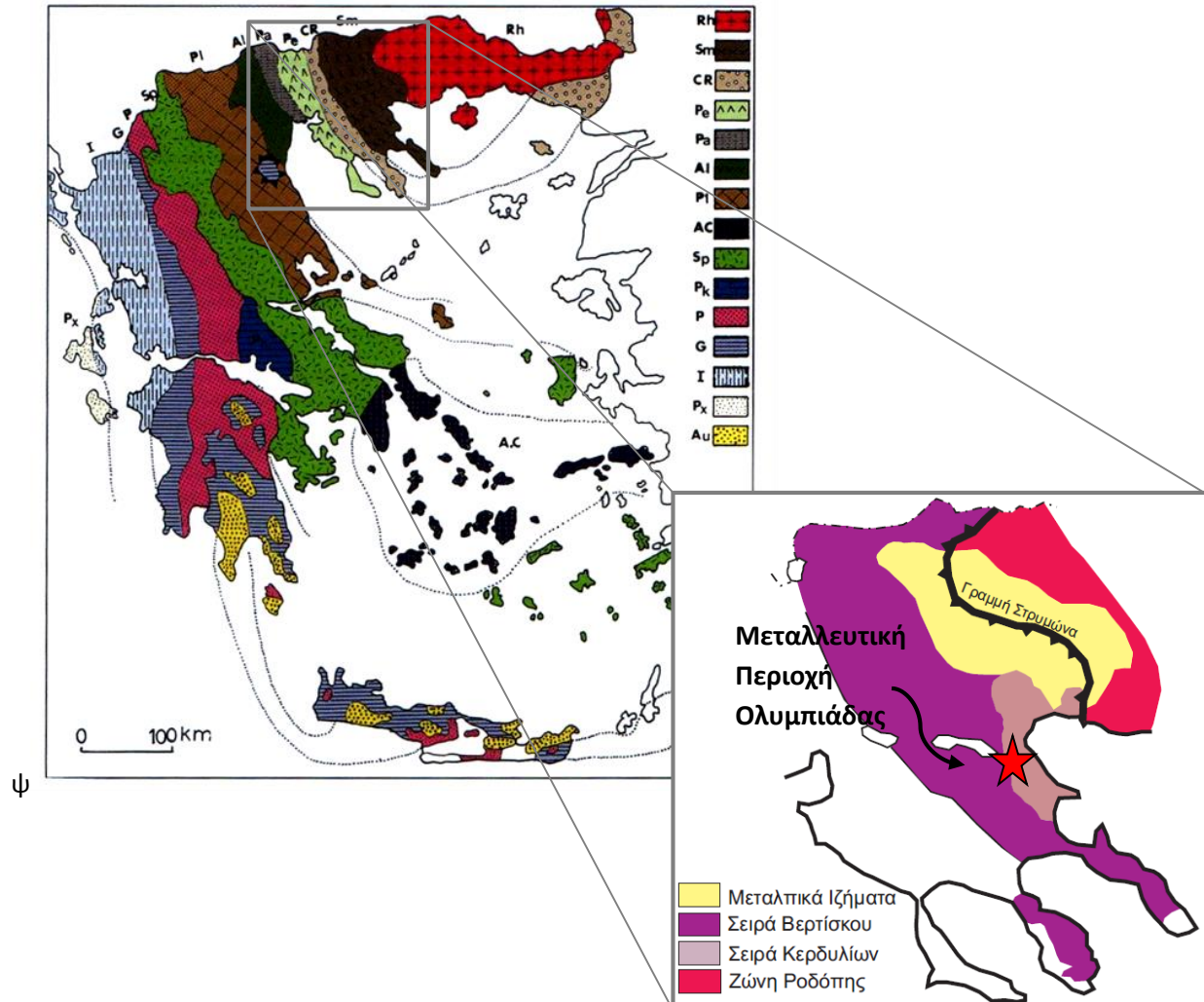
##### 4.1.3.1.1 Λιθοστρωματογραφία

Η μεταλλογενετική περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής, στην οποία εντάσσεται η ευρύτερη περιοχή των Μεταλλευτικών Εγκαταστάσεων Ολυμπιάδας, δομείται γεωλογικά κατά κύριο λόγο από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της Σερβομακεδονικής Μάζας, τα οποία διαπερνώνται από ποικίλες Μεσοζωικές και Καινοζωικές πυριγενείς διεισδύσεις.

Η Σερβομακεδονική μάζα είναι μία σύνθετη γεωτεκτονική ενότητα η οποία εκτείνεται από το Βελιγράδι έως τη χερσόνησο της Χαλκιδικής ως μία επιμήκης λωρίδα με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ. Στον Ελληνικό χώρο η

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Σερβομακεδονική μάζα εκτείνεται ανατολικά από το τεκτονικό όριο του Στρυμόνα έως δυτικά στο σημείο επαφής με τα πετρώματα της Περιροδοπικής (Kockel & Walther (1965), Merciel (1966), Kockel & Walther, (1968)) ενώ από Βορρά προς Νότο εκτείνεται από τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα έως το Βόρειο Αιγαίο πέλαγος (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών όπου σημειώνεται η θέση της περιοχής μελέτης (τροποποιημένο από Μουντράκης, 2010).

Το κρυσταλλοσχιστώδες της Σερβομακεδονικής Μάζας υποδιαιρείται σε δύο επιμέρους λιθοστρωματογραφικές - τεκτονικές ενότητες, την κατώτερη Ενότητα Κερδυλλίων, ανατολικά και την ανώτερη Ενότητα Βερτίσκου στα δυτικά (Kockel & Walther (1968), Kochel et al. (1971), Kockel et al. (1977)). Η διάκριση των δύο ενότητων στηρίχθηκε σε λιθολογικές διαφορές αλλά κυρίως στη διαφορά του βαθμού μεταμόρφωσης των πετρωμάτων. Η γεωτεκτονική ενότητα του Βερτίσκου αποτελείται από εναλλαγές ενστρώσεων όρθο- και παρα- γνεύσιων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και αμφιβολιτών. Συχνά επίσης παρεμβάλλονται μέσα στα άλλα πετρώματα με τεκτονικές επαφές σερπεντινικά σώματα.

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

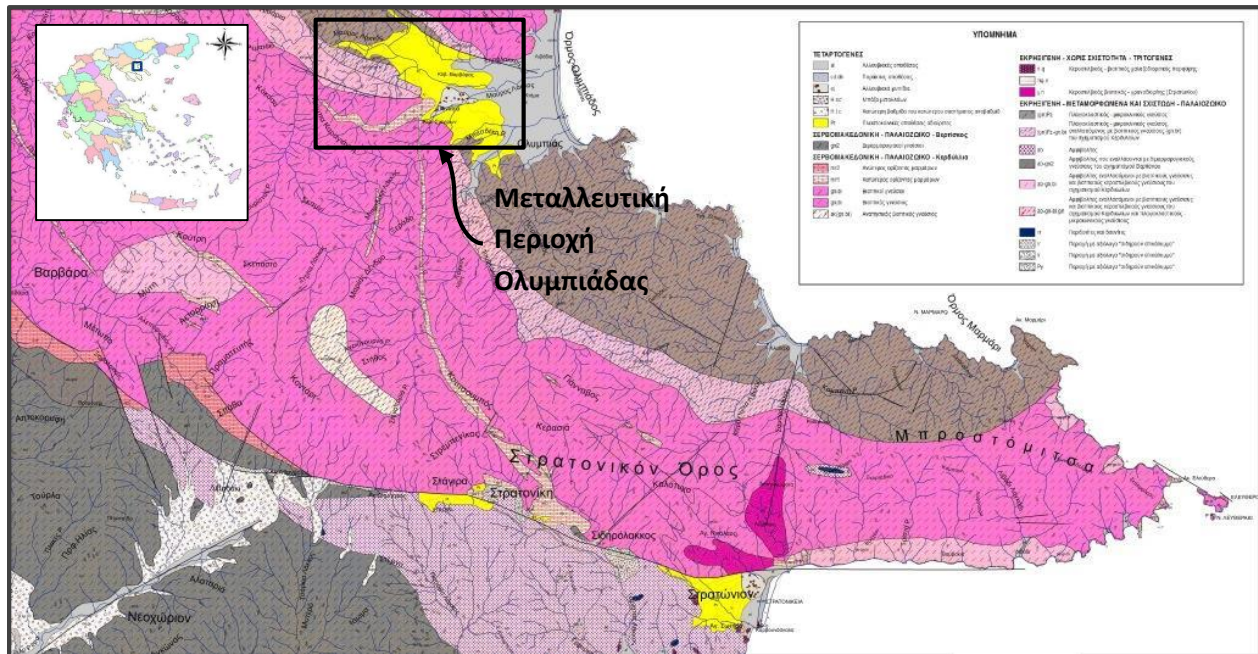
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 69



Αντίστοιχα, η γεωτεκτονική ενότητα των Κερδυλλίων συνίσταται από μαρμαρυγικούς – αμφιβολιτικούς γνεύσιους, αμφιβολίτες και μάρμαρα (Kochel, et al. (1971), Kockel et al. (1977), Μουντράκης (2010)).

Ο γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Μεταλλευτικών Εγκαταστάσεων Ολυμπιάδας δίνεται στο Σχήμα 4.2 (κλίμακας 1: 25.000).



Σχήμα 4.2 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής Μεταλλευτικών Εγκαταστάσεων Ολυμπιάδας (Ελληνικός Χρυσός, 2011).

Οι πυριγενείς διεισδύσεις που διακόπτουν τη συνέχεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής μάζας κατατάσσονται συμβατικά σε τέσσερις φάσεις μαγματισμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3.

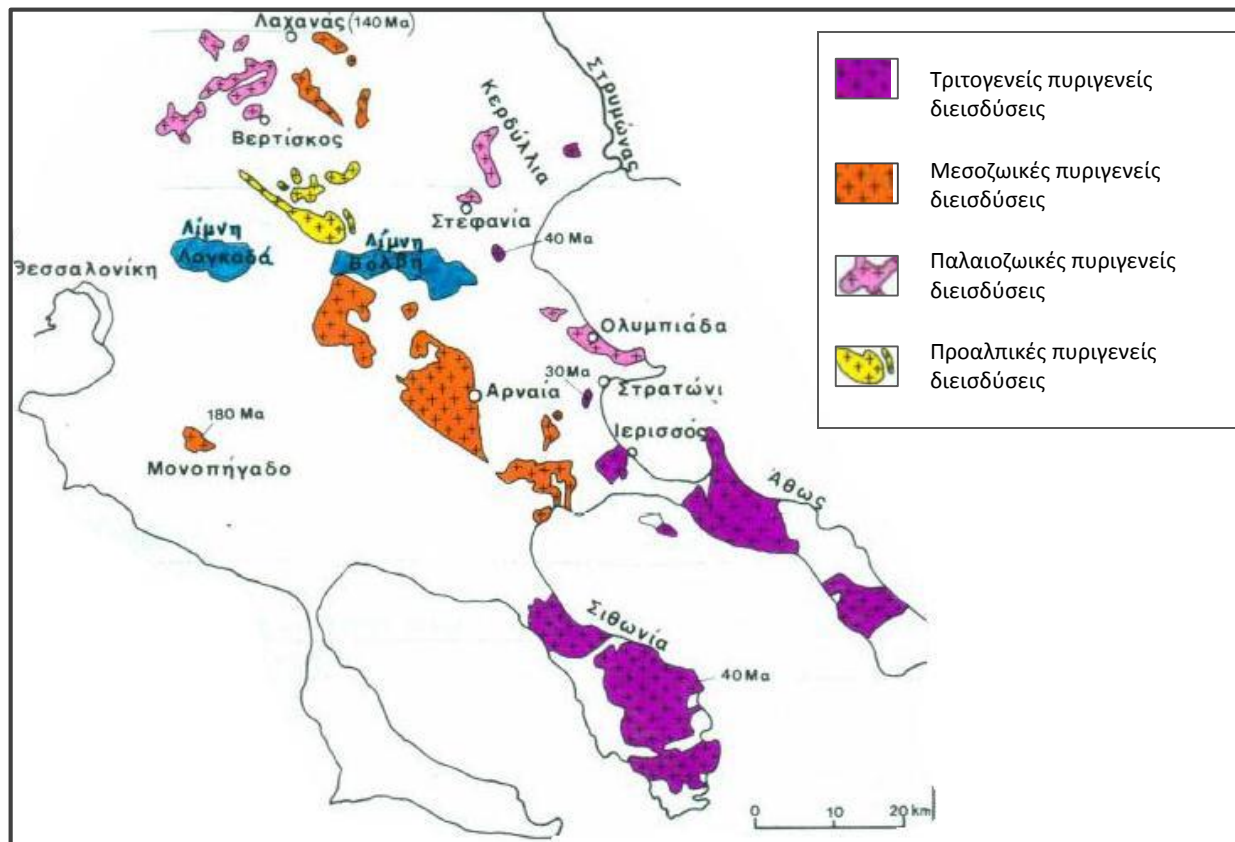
Η πρώτη φάση μαγματισμού προαλπικής ηλικίας και βασικής – υπερβασικής σύστασης (ορθο – αμφιβολίτες, μετα – γάββροι και μετα – διαβάσες) εντοπίζεται κυρίως στο χώρο επαφής των δύο ενοτήτων Βερτίσκου και Κερδυλλίων, βόρεια της λίμνης Βόλβης.

Η δεύτερη φάση μαγματισμού είναι Άνω Παλαιοζωικής ηλικίας και γρανιτικής σύστασης. Συνδέεται με την Ερκύνια ορογένεση και αντιπροσωπεύεται από τους πλαγιοκλαστικούς – μικροκλινικούς γνεύσιους των περιοχών Κερδυλλίων, Ολυμπιάδας και Βερτίσκου, οι οποίοι θεωρούνται ότι είναι παλιοί γρανίτες.

Η τρίτη φάση μαγματισμού Μεσοζωικής ηλικίας και επίσης γρανιτικής σύστασης δημιούργησε τους μεγάλους γρανιτικούς όγκους της Αρναίας (135 – 212 Ma) του Μονοπήγαδου, του Λαχανά, τον χαλαζιακό Διορίτη του Φλαμουρίου στο όρος Βερτίσκος και άλλους. Οι πλουτωνικοί αυτοί όγκοι ανάγονται στη βύθιση του ωκεανού της ζώνης Αξιού και θεωρούνται σύγχρονοι με την κύρια αλπική πτύχωση του

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Ιουρασικού. Ορισμένοι από αυτούς αποδίδονται σε φαινόμενα θερμικής ανάτηξης που συνόδευσαν την αμφιβολιτική μεταμόρφωση, όπως ο γρανίτης της Αρναίας και του Πολυδενδρίου.



Σχήμα 4.3 Σκαρίφημα του ευρύτερου χώρου της Σερβομακεδονικής Μάζας με τις κυριότερες πλουτωνικές εμφανίσεις και τις αντίστοιχες ηλικίες των ραδιοχρονολογήσεων (τροποποιημένο από Μουντράκης, 2010).

Τέλος, η τέταρτη μαγματική φάση, Τριτογενούς ηλικίας (Ηώκαινο - Ολιγόκαινο), μετά – ορογενετική, όξινη που δημιούργησε τον γρανίτη της Ιερισσού, τον γρανίτη της Σιθωνίας, τον γρανίτη της Μονής Γρηγορίου στο Άγιο Όρος, τον γρανοδιορίτη του Στρατωνίου, τους χαλαζιακούς διορίτες Μεγάλης Παναγίας, Στεφάνιας και Στρυμώνα. Με τη φάση αυτή συνδέονται και ορισμένες εμφανίσεις πορφύρων και πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών με πλούσια μεταλλοφορία.

Τέλος στο βόρειο χώρο της Σερβομακεδονικής έχουν εντοπισθεί μερικές μικρές εμφανίσεις (Ποντοκερασιάς, Στρυμονικού κ.λ.π.) ρυολίθων, ανδεδιτών που οφείλονται στην ηφαιστειότητα που εκδηλώθηκε στα τελευταία στάδια (23 – 28 Ma) της Μαγματικής φάσης του Τριτογενούς.

#### 4.1.3.1.2 Τεκτοορογενετική εξέλιξη

Σύμφωνα με τον Δ. Μουντράκη (Μουντράκης, 2010) η Σερβομακεδονική είναι μια μάζα κρυσταλλικών πετρωμάτων, η οποία έχει υποστεί επανειλημμένες τεκτονικές επιδράσεις μέχρι την τελική της διαμόρφωση. Συγκεκριμένα:

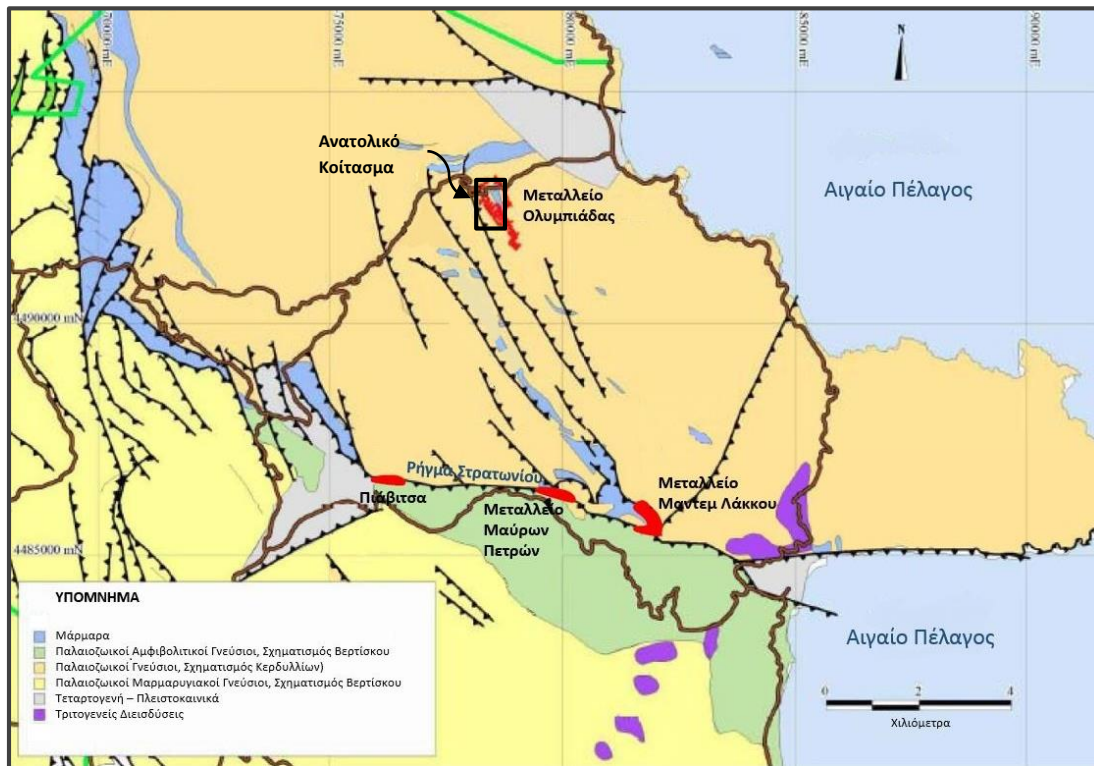
#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Η πρώτη τεκτονική δράση, με μεταμόρφωση και πτύχωση των πετρωμάτων έλαβε χώρα στο προ – Άνω Παλαιοζωικό, εντούτοις από ραδιοχρονολογήσεις προκύπτει ότι η πρώτη ορογενετική περίοδος που έχει αφήσει τα ίχνη της είναι Ερκύνια (300Ma) και δημιούργησε ισοκλινείς πτυχές, συμμεταμορφικές, ως προς την πρώτη κύρια αμφιβολιτική μεταμόρφωση. Οι άξονες των πτυχών έχουν γενική διεύθυνση και βύθιση προς Βορρά. Κατά τη φάση αυτή δημιουργήθηκε και η πρώτη σχιστότητα  $s_1$  των πετρωμάτων.
- Η δεύτερη ορογενετική περίοδος τοποθετείται στο Ιουρασικό ταυτόχρονα με την εξέλιξη της αμφιβολιτικής μεταμόρφωσης, οπότε και έλαβε χώρα και η δεύτερη φάση πτυχώσεων, επίσης συμμεταμορφική, η οποία προκάλεσε ισοκλινείς πτυχές με άξονες ΒΔ – ΝΑ, καθώς και την κύρια σχιστότητα της Σερβομακεδονικής.
- Κατά το Άνω Ιουρασικό – Κάτω Κρητιδικό μία ανάδρομη πρασινοσχιστολιθική φάση μεταμόρφωσης, ως προς την προηγούμενη αμφιβολιτική φάση, συνοδεύεται με κλειστές – υποϊσοκλινείς πτυχές.
- Κατά το Τριτογενές έλαβαν χώρα οι Αλπικές φάσεις πτυχώσεων με λεπιώσεις των στρωμάτων, τοπικές αλλά και μεγάλης έκτασης επωθήσεις, ανοιχτές πτυχές τύπου knick καθώς και μία αναστροφή των στρωμάτων στο Δυτικό περιθώριο της Ζώνης.

## 4.2 Γεωλογικές συνθήκες της εγγύτερης περιοχής του μεταλλείου Ολυμπιάδας

### 4.2.1 Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας

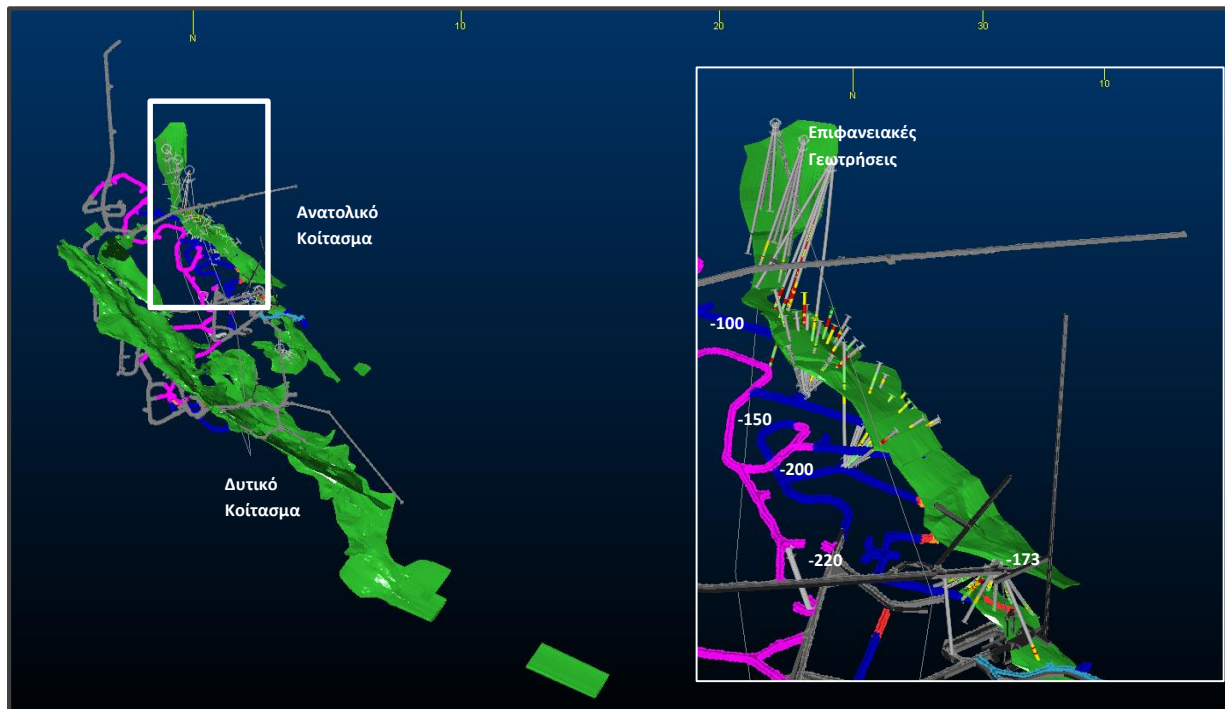
Η Ολυμπιάδα αποτελεί ένα στρωματόμορφο, πολυμεταλλικό (Au-Pb-Zn-Ag) κοίτασμα αντικατάστασης μεικτών θειούχων που φιλοξενείται εντός του κατώτερου ορίζοντα των μαρμάρων καθώς και κατά μήκος της ανώτερης επαφής του με τον υπερκείμενο βιοτιτικό γνεύσιο. Η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, αρσενοπυρίτη, σφαλερίτη και γαληνίτη ενώ τα βεβαιωμένα αποθέματα ανέρχονται σε 11,5 Mt με μέση περιεκτικότητα 9,0 g/t Au, 137,5 g/t Ag, 4,6% Pb και 6,1% Zn. Συνολικά στο κοίτασμα περιέχονται 3,33 εκατ. ουγγιές Au, 50,9 εκατ. ουγγιές Ag, 530.000 t Pb και 700.000 t Zn (Ελληνικός Χρυσός, 2011).



Σχήμα 4.4 Γεωλογική τοποθέτηση μεταλλείου Ολυμπιάδας (Rhys, 2013) κατά (Forward, 2011).

Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας αποτελείται από δύο κύρια μεταλλοφόρα σώματα, το Δυτικό και το Ανατολικό. Το «Δυτικό Κοίτασμα», όπως αποκαλείται, αποτελεί το κυριότερο από τα δύο μεταλλοφόρα σώματα. Εκτείνεται σε πλάτος 250m και βυθίζεται για 1500m προς τα Νοτιοανατολικά με γωνία  $30^{\circ}$  -  $35^{\circ}$ , ενώ η προς τα κάτω συνέχεια του μέλει να διερευνηθεί. Επί πλέον του Δυτικού κοιτάσματος, στο κατώτερο τμήμα του κατώτερου τεμάχους (footwall) εντοπίζεται ένα δεύτερο, μικρότερο, μεταλλοφόρο σώμα, το επονομαζόμενο «Κατώτερο Δυτικό Κοίτασμα» με μήκος περί τα 400m. Το «Ανατολικό Κοίτασμα» χωροθετείται 150m ανατολικά του Δυτικού Κοιτάσματος. Χαρακτηρίζεται από αντικλινική δομή παρουσιάζοντας πάχυνση κατά τον άξονα και απότομες κλίσεις προς τις πλευρές. Βυθίζεται για 600m, με γωνία  $25-30^{\circ}$  προς τα Νοτιοανατολικά.





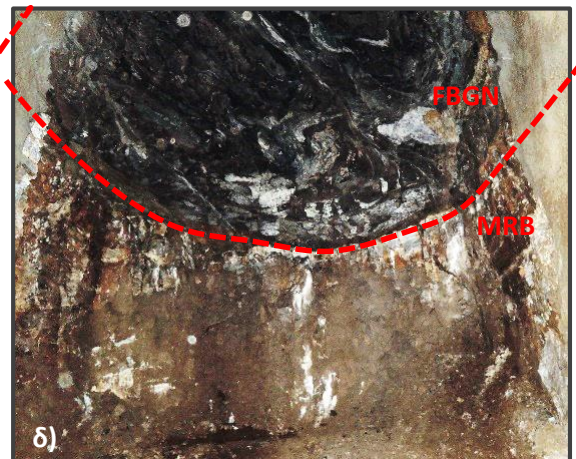
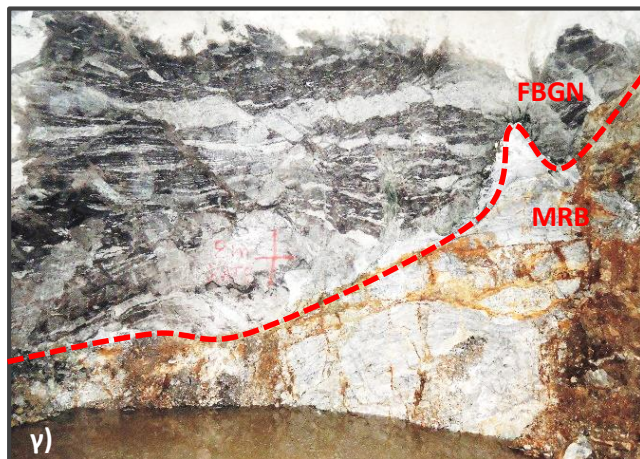
Σχήμα 4.5 Απόσπασμα από το χώρο εργασίας του λογισμικού Datamine Studio 3 όπου απεικονίζεται με μορφή τρισδιάστατου μοντέλου η δομή του κοιτάσματος Ολυμπιάδας, οι υπάρχουσες υποδομές καθώς και τα ίχνη των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

#### 4.2.2 Γεωλογική περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών

Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα η περιοχή του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας τοποθετείται στην Ενότητα Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής Μάζας. Αποτελείται κυρίως από μαρμαρυγιακούς – αμφιβολιτικούς γνεύσιους, αμφιβολίτες και μάρμαρα που διακόπτονται συχνά από πυριγενείς διεισδύσεις. Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά αυτών, όπως παρατηρήθηκαν σε επιφανειακές εμφανίσεις, στα μέτωπα των υπόγειων στοών αλλά και σε πυρήνες γεωτρήσεων δίνονται παρακάτω.

- Μαρμαρυγιακοί γνεύσιοι:** Συχνά αποκαλούμενοι «βιοιτιτικοί γνεύσιοι». Αποτελούν το σχηματισμό με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αναλογία. Πρόκειται για βιοιτιτικούς – χαλαζιακούς – αστριούχους γνευσίους, ζωνώδεις και έντονα πτυχωμένους. Πρόκειται πιθανότατα για μεταϊζηματογενείς σχηματισμούς (Δημητριάδης, 1974), (Kockel, et al., 1977) με παρουσία γρανάτων και υπολειμματικών δομών που προσομοιάζουν συσσωματώματα συλλιμανίτη. Κατά τόπους εμφανίζονται περισσότερο συμπαγείς αντιπροσωπεύοντας πιθανόν πτυχωμένους γρανοδιοριτικούς φακούς (Rhys, 2013). Συχνές είναι οι παρεμβολές λεπτών οριζόντων μαρμάρων, κυρίως κοντά στη μεταλλοφορία, καθώς και πυριγενών διεισδύσεων γρανιτικής ή / και πηγματιτικής σύστασης.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Εικόνα 4.3 Τυπικός βιοτιτικός- χαλαζιακός- αστριούχος γνεύσιος (FBGN) α) πλούσιος σε άστριους και με μικρού πάχους πηγματιτικές διεισδύσεις παράλληλα στη φολίδωση, από γεώτρηση OLDD0008 στα 15,90 – 23,80 m, β) πτωχός σε σαλικά ορυκτά, από τη γεώτρηση OLDD0019 στα 40,20 – 47,80 m, γ) σε επαφή με τα υποκείμενα μάρμαρα (MRB), στο επίπεδο -250 της Κατώτερης Ανατολικής Ράμπας (Lower East Ramp), δ) έντονα πτυχωμένος και διαταραγμένος στην οροφή και το άνω μισό του μετώπου, στο επίπεδο -150 της Ανατολικής Πρόσβασης (East Access), και πάλι σε επαφή με τα υποκείμενα μάρμαρα (MRB).

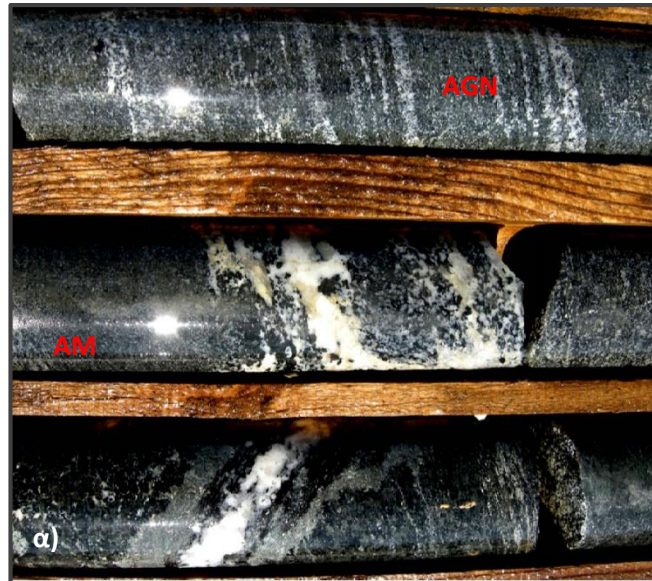
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 75



- **Αμφιβολίτες και αμφιβολιτικοί γνεύσιοι:** Παρουσιάζονται σαν φακοί μέσα στους βιοτιτικούς γνεύσιους. Η προέλευση τους είναι είτε ιζηματογενής (Δημητριάδης, 1974), (Kockel, et al., 1977), είτε μαγματική (Κασώλη - Φουρναράκη, 1981), (Kalogeropoulos, et al., 1989b).



Εικόνα 4.4 Αμφιβολιτική ενότητα άλλοτε με έντονη γνευσιακή υφή (AGN) και άλλοτε συμπαγής (AM) α) από τη γεώτρηση OL-351 στα 319 - 321 m, β) από τη γεώτρηση OLDD0006 στα 11.40 – 13.40 m.

- **Μάρμαρα:** Αποτελούν τα πετρώματα ξενιστές της μεταλλοφορίας. Έχουν πάχος 100 έως 200m, στην περιοχή όπου εντοπίζεται η μεταλλοφορία, και εκλεπτύνονται προς τα Νοτιοδυτικά. Εμφανίζονται κατά τόπους συμπαγή, κρυσταλλικά, μεσόκοκκα ως πολύ λεπτόκοκκα, και λεπτοστρωματώδη. Στα λεπτόκοκκα μάρμαρα απαντώνται συχνά γραφιτικές νιφάδες και φλεβίδια.
- **Πυριγενείς διεισδύσεις:** Πρόκειται για γρανιτικής και πηγματιτικής σύστασης διεισδύσεις με τη μορφή κυρίως φλεβών αλλά και κοιτών, Ηωκαινικής και Ολιγοκαινικής ηλικίας. Εντοπίζονται αρκετές γενεές φλεβών που κυμαίνονται από συν- μεταμορφικές (έντονα πτυχωμένες δομές με μορφές “boudinage” αποτελούμενες από λεπτές (1-5cm) ενστρώσεις στη γνευσιακή ακολουθία αλλά και μεγάλου πάχους πηγματιτικές διεισδύσεις με πάχος έως και 20m) έως μετά-

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

μεταμορφικές (γρανιτικές και πηγματιτικές φλέβες και κοίτες, που συχνά σχετίζονται με τη μεταλλοφορία).



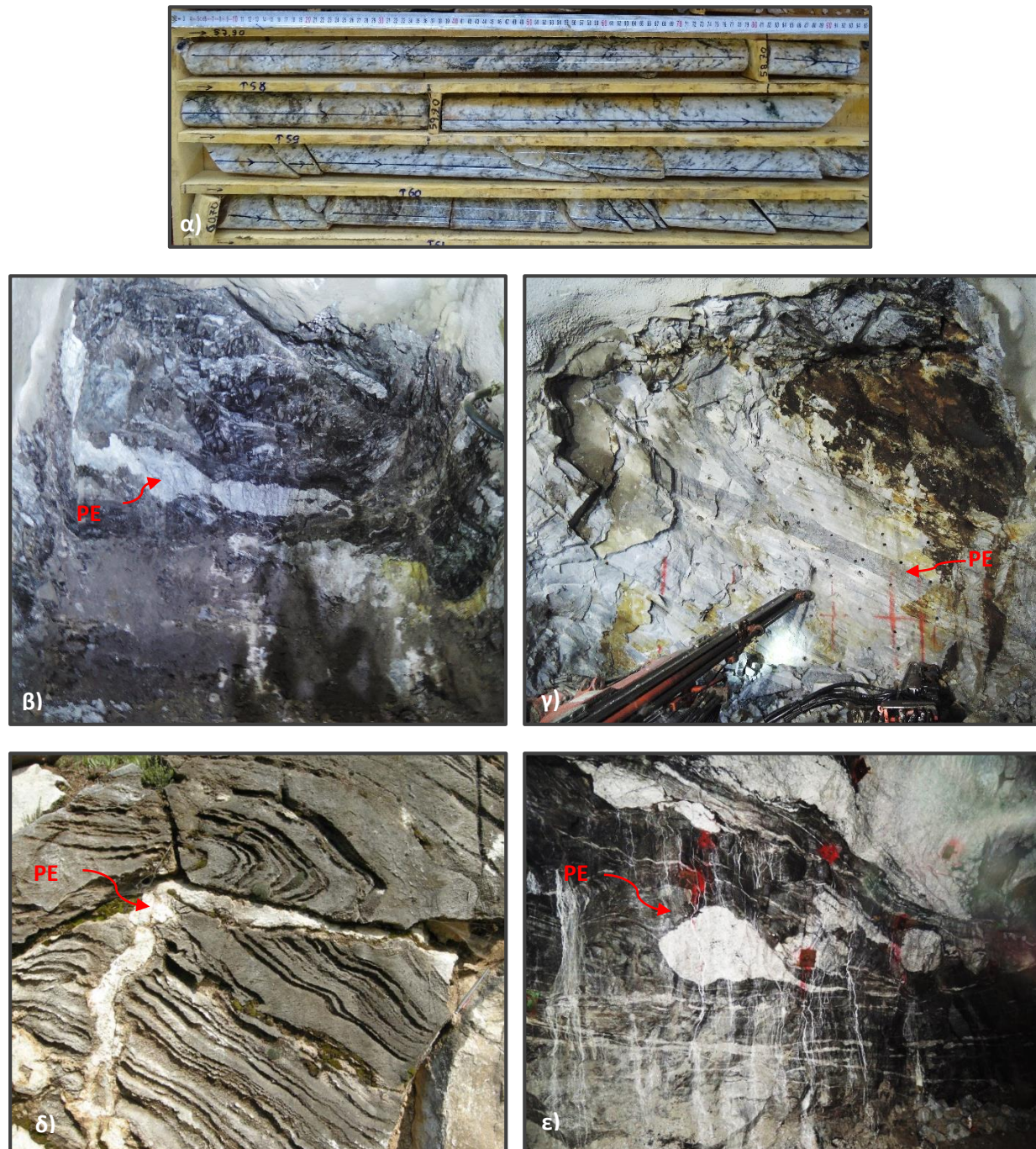
Εικόνα 4.5 Τυπικά μάρμαρα α) λεπτόκοκκα, ζωνώδη, από τη γεώτρηση OLDD0006 στα 215,70 – 219,90 m, β) μεσόκοκκα, πλούσια σε γραφίτικα φλεβίδια, από τη γεώτρηση OLDD0023 στα 54.00 – 56.70 m, γ) με γραφίτικές ζωνώσεις, από το επίπεδο -100 της Ανατολικής Πρόσβασης (East Access).

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 77





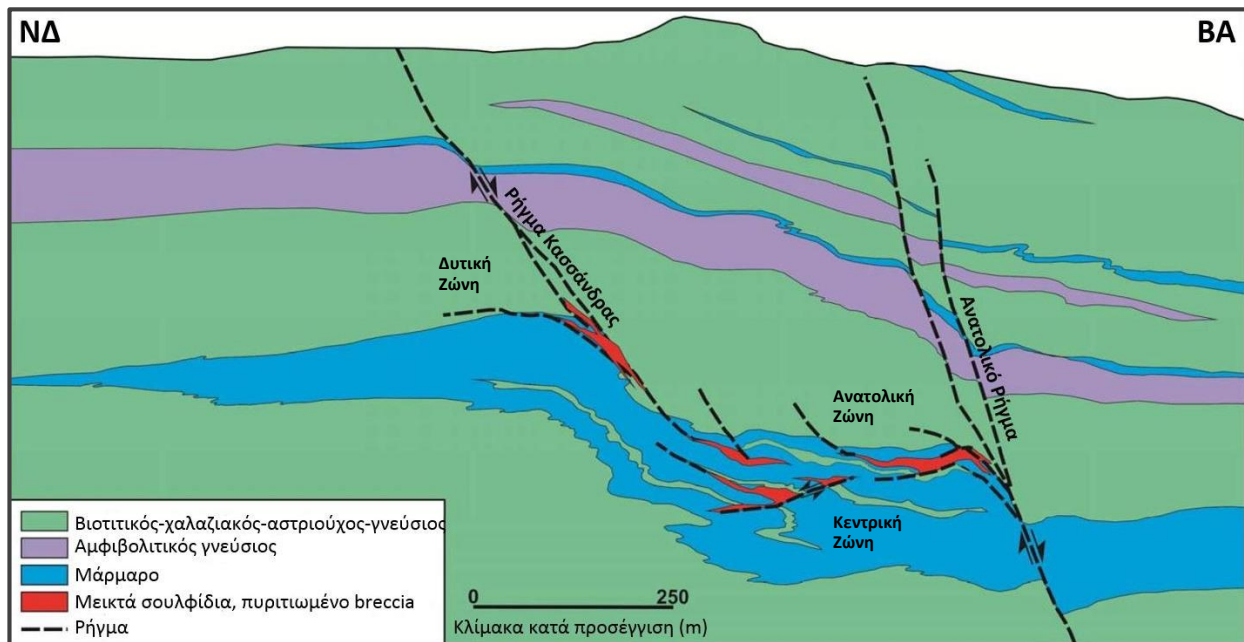
Εικόνα 4.6 Τυπικές γρανιτικές / πηγματιτικές διεισδύσεις (PE) α) από τη γεώτρηση OLDD0016 στα 57,90 – 61,60 m, β) μέσα σε Βιοτιτικούς Γνευσίους στο επίπεδο -150 της Ανατολικής Πρόσβασης (East Access), γ) μέσα σε μάρμαρα στο επίπεδο -240 της πρόσβαση κάτω τεμάχους (Footwall Drive Access), ε) παράλληλα στον άξονα των F2 πτυχών, σε αποκάλυψη επί της οδού Ολυμπιάδας – Βαρβάρας, ε) μέσα σε Βιοτιτικούς Γνευσίους παρουσιάζοντας χαρακτηριστικές μορφές boudinage.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

### 4.2.3 Τεκτονική δομή

Η Σερβομακεδονική ζώνη, και κατ' επέκταση η ενότητα Κερδυλλίων όπου υπάγεται η μεταλλευτική περιοχή της Ολυμπιάδας, υπέστη συνεχή τεκτονική δράση από το Παλαιοζωικό μέχρι τις τελευταίες φάσεις της Αλπικής ορογένεσης περί το Ηώκαινο - Ολιγόκαινο. Η πλούσια τεκτονική ιστορία της περιοχής αντικατοπτρίζεται στις πολύπλοκες δομές που παρατηρούνται στα πετρώματα της.

Συγκεκριμένα, οι λιθολογικές ενότητες της Ολυμπιάδας παρουσιάζουν διεύθυνση Β – ΒΔ και κλίνουν ΒΑ με μικρή έως μέση γωνία κλίσης. Εξαιρέση αποτελούν τα βορειότερα τμήματα του κοιτάσματος όπου παρατηρείται Α – ΒΑ διεύθυνση με κλίση προς τα ΝΑ και μικρές γωνίες κλίσης.



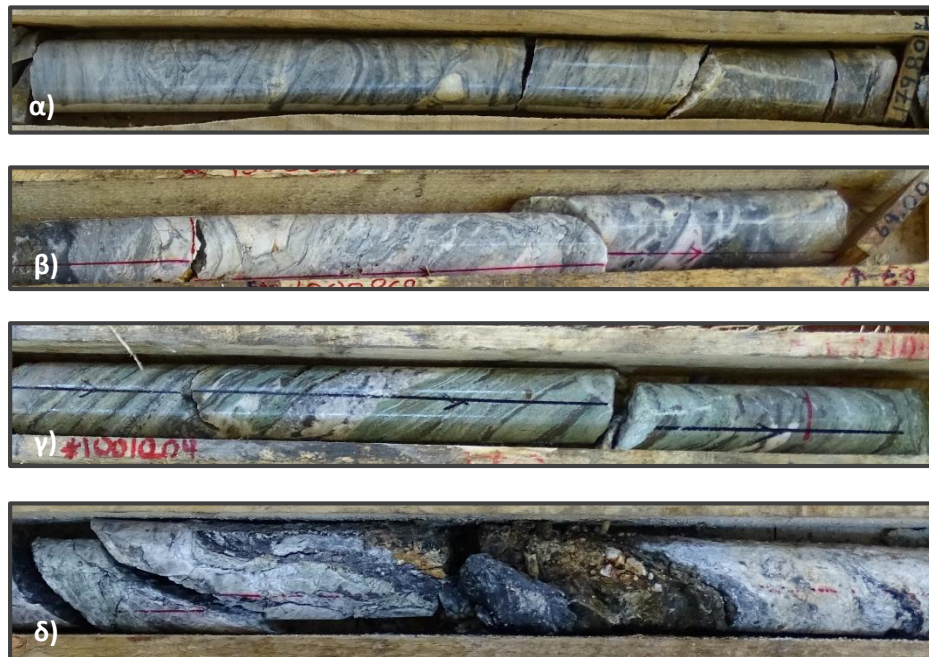
Σχήμα 4.6 Σκαρίφημα με προσανατολισμό ΝΔ – ΒΑ κατά μήκος του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας, βασιζόμενο στη σύνθεση των τομών 800ΒΔ έως 1000ΒΔ, όπου παρουσιάζονται οι λιθολογικές ενότητες και οι τεκτονικές δομές καθώς και η θέση αυτών στο χώρο (Rhyss, 2013).

Τουλάχιστον τρεις φάσεις πτυχώσεων (D1, D2, D3) έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της κύριας αμφιβολιτικής αλλά και της ανάδρομης πρσινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης που υπέστη η Σερβομακεδονική Μάζα. Τα μεταμορφικά αυτά γεγονότα συνοδεύτηκαν από παραμόρφωση και ανάπτυξη, μεταξύ άλλων, της κύριας σχιστότητας S1 των πετρωμάτων καθώς και των μιγματιτών αλλά και των συγγενετικών με αυτούς πηγματίτες λόγω της μερικής ανάτηξης των πετρωμάτων. Επιπλέον η μεταγενέστερη εφελκυστική τεκτονική, που έλαβε χώρα κατά το Μειόκαινο - Πλειόκαινο σε ψαθρές συνθήκες, έδωσε γένεση στους μυλωνίτες, τις ημι - πλαστικές ζώνες διάτμησης αλλά και τα κανονικά ρήγματα που εντοπίζονται στην περιοχή.



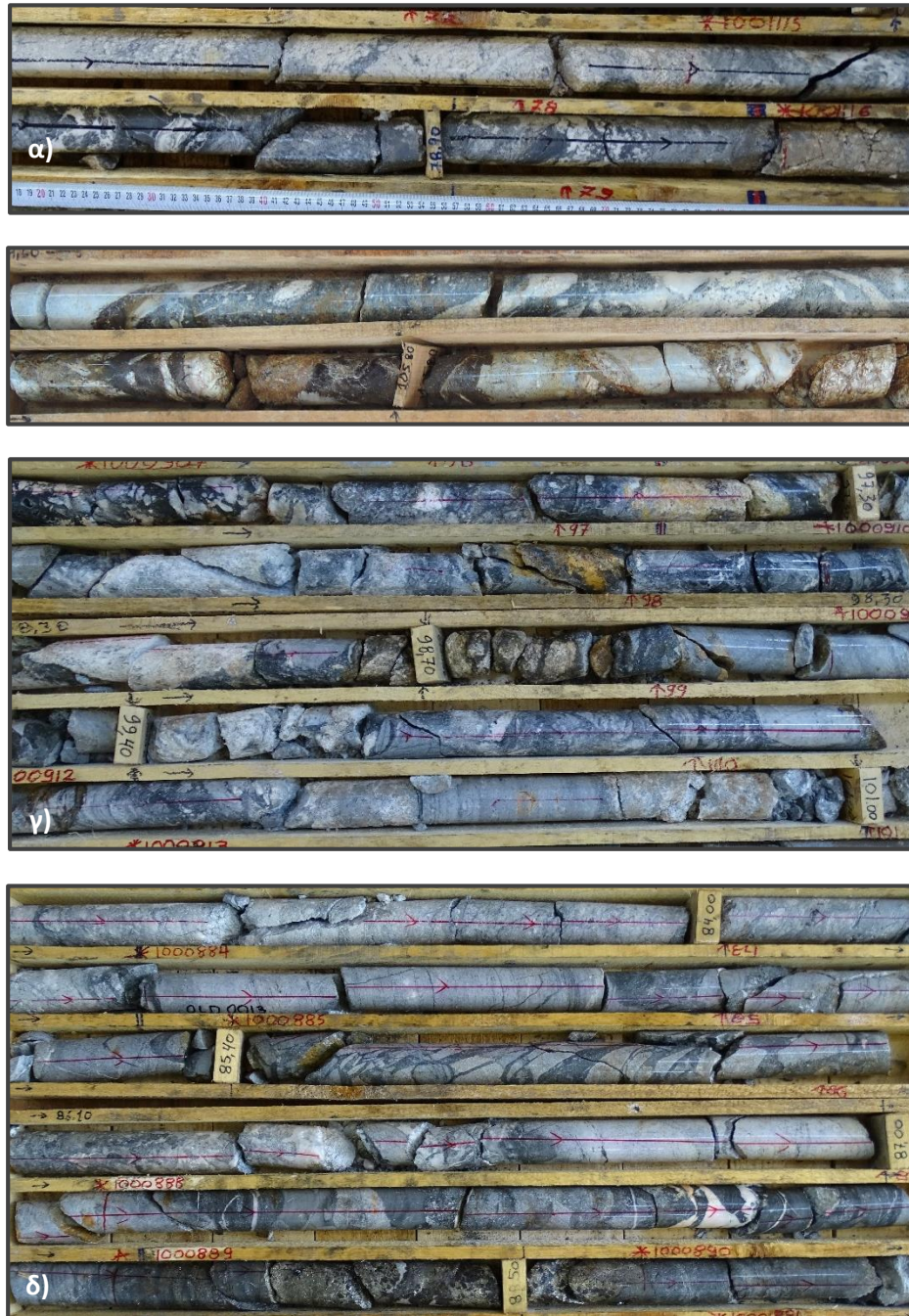
Δύο είναι τα κύρια ρήγματα που εντοπίζονται στην έκταση του κοιτάσματος Ολυμπιάδας, το ρήγμα της Κασσάνδρας και το Ανατολικό ρήγμα, ενώ εκτός των δύο αυτών κύριων ρηγμάτων στην περιοχή αναπτύσσονται και άλλα μικρότερα (Rhys, 2013). Πιο συγκεκριμένα:

- **Το ρήγμα της Κασσάνδρας:** Πρόκειται για ρήγμα με παράταξη Β/ΒΔ - Ν/ΝΑ και κλίση προς ΒΑ με μέση γωνία κλίσης. Αναπτύσσεται κατά μήκος του ανώτερου ορίζοντα μαρμάρου και της μεταλλοφορίας του Δυτικού κοιτάσματος και εκτείνεται ως την Κεντρική Ζώνη, όπου και διασχίζεται από τη μεταλλοφορία, και χάνεται. Το πάχος του φτάνει κατά τόπους ως και τα 20m ενώ αποτελείται από μία ή περισσότερες ζώνες έντονου κερματισμού με παρουσία τεκτονικής λιθοκονίας (fault gouge) ή πυριτωμένου κατακλαστικού λατυποπαγούς (breccia).
- **Το Ανατολικό ρήγμα:** Πρόκειται για κανονικό ρήγμα με παράταξη Β/ΒΔ - Ν/ΝΑ, κλίση προς ΝΔ και μετατόπιση από 70 ως 100m. Αποτελείται από ζώνες έντονου κερματισμού με παρουσία αργιλικών υλικών (fault gouge) που περιβάλλονται από ζώνη αργιλικής εξαλλοίωσης και φακούς πυριτωμένου κατακλαστικού λατυποπαγούς (breccia) που συχνά φέρουν μεταλλοφορία, καθώς και ζώνες σερικιτικής εξαλλοίωσης, γεγονός που καταδεικνύει τη σύγχρονη γένεση του ρήγματος με τη μεταλλοφορία. Το Ανατολικό ρήγμα φαίνεται να ενεργοποιείται και μεταγενέστερα με σχηματισμό ζωνών μεγάλου πλάτους και έντονου κερματισμού (Rhys, 2013).



Εικόνα 4.7 α) Ζώνες μυλωνιτώσεως σε α) πυριτωμένο μάρμαρο από τη γεώτρηση OLDD0006 στα 179,40 – 179,80 m, β) σε πυριτωμένο μάρμαρο σε επαφή με τη μεταλλοφορία, από τη γεώτρηση OLDD0013 στα 68,50 – 69,00 m, και ζώνη διάτμησης γ) σε βιοτιτικό γνεύσιο με έντονη εξαλλοίωση σε πράσινο σερικίτη, σε επαφή με τη μεταλλοφορία, από τη γεώτρηση OLDD0025 στα 114,30 – 114,80 m, δ) σε γραφιτικά μάρμαρα με παρουσία αργιλικών και κλαστικών, πιθανόν μεταγενέστερων, υλικών κατά μήκος της διάτμησης, από τη γεώτρηση OLDD0008 στα 80,10 – 80,50 m





Εικόνα 4.8 Λιθοποιημένα / πυριτωμένα κατακλαστικά λατυποπαγή (breccia) α) ως ενδιάμεσο στάδιο της πλευρικής μετάβασης από ζώνη μυλωνιτώσεως σε ρήγμα πληρωμένο με τεκτονική λιθοκονία (fault gouge) από τη γεώτρηση OLDD0022 στα 77,50 – 79,50 m, β), με τεφροπράσινο πυριτικό συνδετικό υλικό (matrix) από τη γεώτρηση OLDD0007 στα 104,70 – 106,40 m γ) σε επαφή με τη μεταλλοφορία, έντονα αργιλικά εξαλλοιωμένο κατά τόπους, από τη γεώτρηση OLDD0012 στα 96,40 – 101,10 m, δ) σε επαφή με τη μεταλλοφορία, με πυριτικό συνδετικό υλικό (matrix), από τη γεώτρηση OLDD0013 στα 83,20 – 88,90 m.

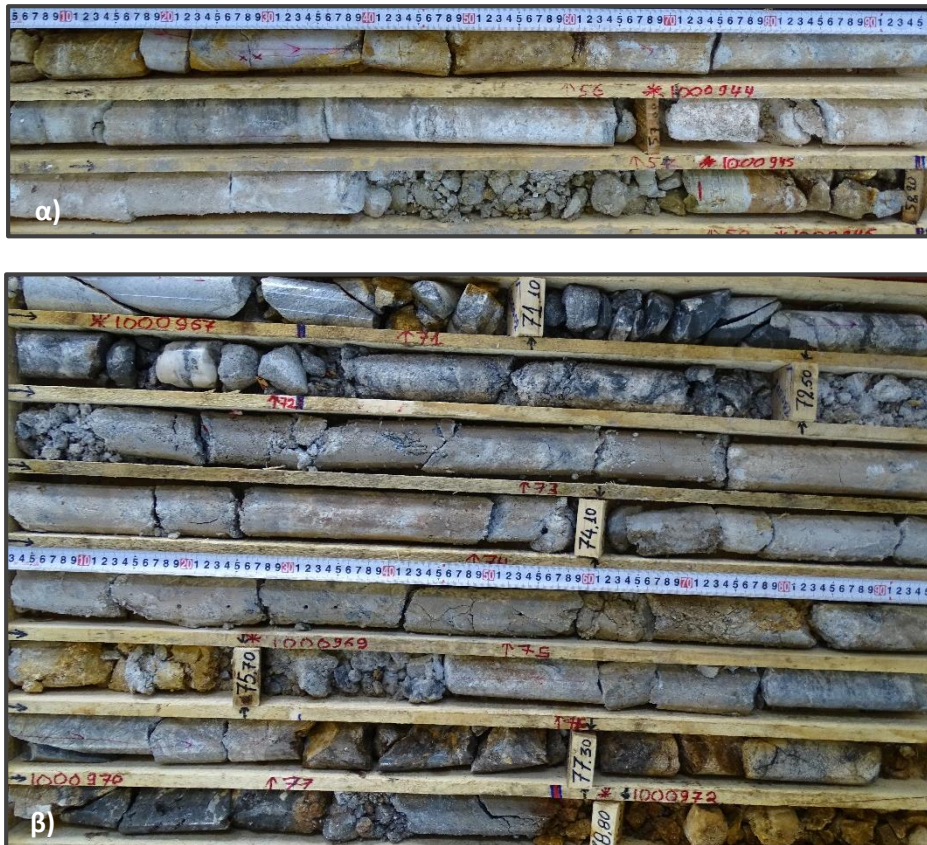
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 81



- **Ρήγματα Κεντρικής Ζώνης:** Κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας κλίσης με βύθιση προς τα Δυτικά. Αναπτύσσονται κατά μήκος του ορίου ή της προέκτασης των φακών της μεταλλοφορίας και αποτελούνται συνήθως από μιλωνίτες ή πυριτιωμένα κατακλαστικά breccia με αργλική – σερικιτική εξαλλοίωση κατά τόπους. Έχουν πάχος μερικών δεκάδων εκατοστών και χωρίς μεγάλη συνέχεια στο χώρο.
- **Ρήγματα ανωτέρων γνευσιακών οριζόντων ανάμεσα στο Ανατολικό ρήγμα και το ρήγμα Κασσάνδρας:** Πολλαπλά, μικρού πάχους ρήγματα με μέτρια ως μεγάλη κλίση προς ΝΑ, παράλληλα στο Ανατολικό ρήγμα. Ορίζονται από μικρές ζώνες κατακλαστικού λατυποπαγούς (breccia) με πράσινο ή τεφρό συγκολλητικό υλικό (matrix) που συχνά φέρει μεταλλοφορία. Εντοπίζονται στο χώρο πάνω από τον κεντρικό και δυτικό φακό μεταλλοφορίας.
- **Λοιπά ρήγματα:** Μικρά ρήγματα, χωρίς συνέχεια στο χώρο που χαρακτηρίζονται από έντονο κερματισμό της βραχώμαζας ή παρουσία τεκτονικής λιθοκονίας (fault gouge).



Εικόνα 4.9 Νεότερα ψαθγρά ρήγματα πληρωμένα με τεκτονική λιθοκονία (fault gouge) α) από τη γεώτρηση OLDD0015 στα 55,35 – 58,20 m, β) από τη γεώτρηση OLDD0011 στα 72,00 – 78,80 m.

#### 4.2.4 Ενεργός τεκτονική και σεισμικότητα

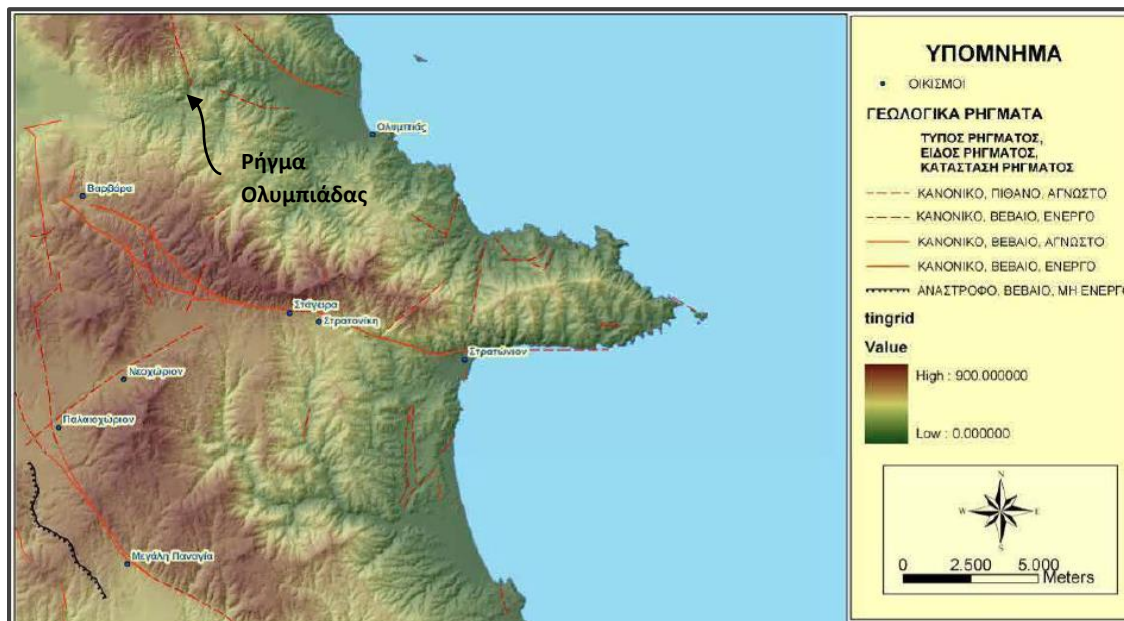
Όπως προκύπτει από τους Παυλίδης, et al., 2010 οι εφελκυστικές τάσεις του σύγχρονου ενεργού πεδίου τάσεων του Βόρειου Ελληνικού Χώρου έχουν γενική διεύθυνση Β-Ν και προκαλούν κανονικά ρήγματα, με διεύθυνση κυρίως Α-Δ. Η χερσόνησος της Χαλκιδικής χαρακτηρίζεται από τεκτονικά κέρατα και

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

τεκτονικές τάφρους, αποτέλεσμα της μεγάλης γωνίας κλίσης κανονικών ρηγμάτων που συχνά παρουσιάζουν σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις. Τα μεγάλα ρήγματα που δεσπόζουν στον ευρύτερο χώρο της ΒΑ Χαλκιδικής, στον οποίο ανήκει η περιοχή μελέτης, παρουσιάζουν τρεις γενικές διευθύνσεις ανάπτυξης:

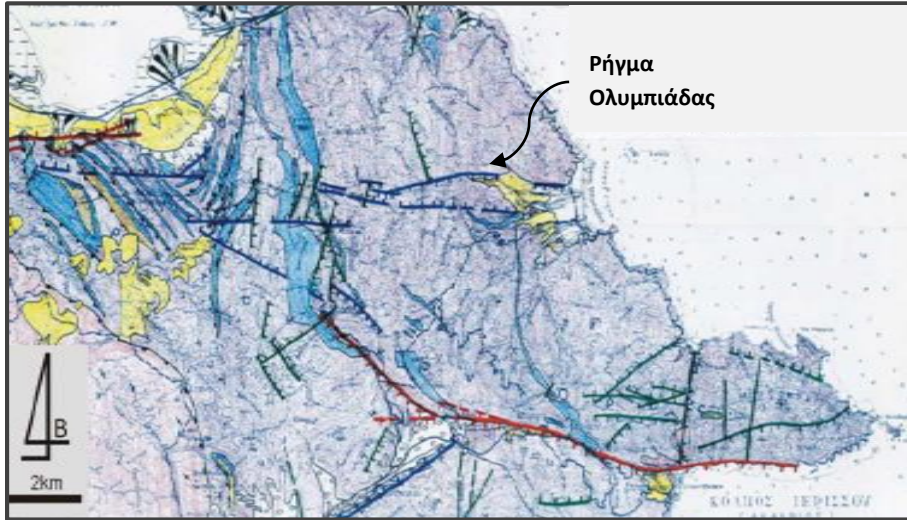
- ΒΔ-ΝΑ έως ΒΒΔ-ΝΝΑ,
- Α-Δ έως ΔΒΔ-ΑΝΑ και
- ΒΑ-ΝΔ.

Το σημαντικότερο ενεργό ρήγμα της περιοχής είναι το ρήγμα Ολυμπιάδας. Πρόκειται για κανονικό ρήγμα με γενική διεύθυνση Α - Δ, μήκος 6km και κλίση προς Νότο το οποίο σε συνδυασμό με το μικρότερο μήκους και σημασίας αντιθετικό ρήγμα της Κασσάνδρας στα νότια, διαμορφώνει το βύθισμα της Ολυμπιάδας. Οι κινήσεις που παρουσιάζει το ρήγμα είναι μία αριστερόστροφη με οριζόντια μετατόπιση και μία, μεταγενέστερη κανονική κίνηση.

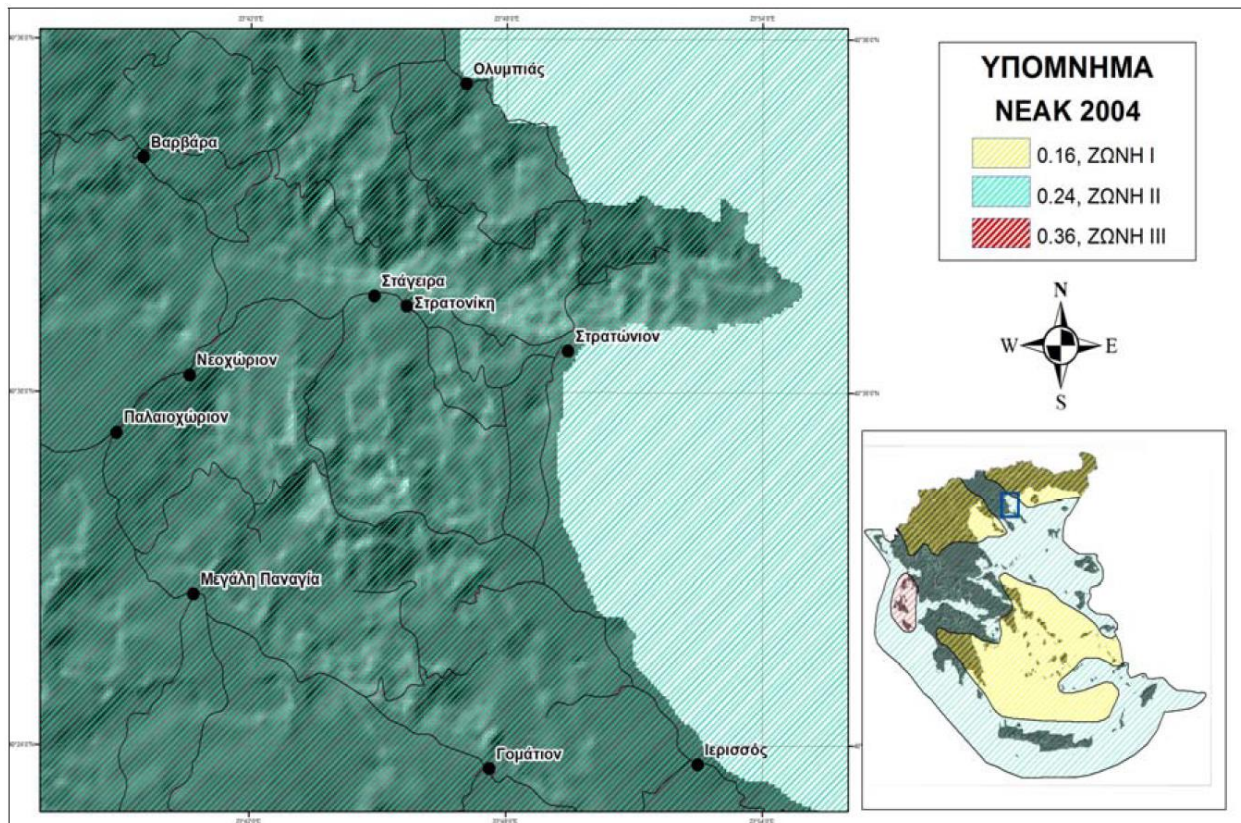


Σχήμα 4.7 Τοπογραφικό ψηφιακό μοντέλο (DEM) με τις επιφανειακές εμφανίσεις ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης όπου διακρίνεται και το ρήγμα της Ολυμπιάδας. Τα ρήγματα προέρχονται από ψηφιοποίηση των Γεωλογικών χαρτών του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλα: Αρναία, Ιερισσός, Σταυρός και Στρατονίκη, (Ι.Γ.Μ.Ε., 1978, κλίμακα: 1:50.000) (Μιχαηλίδου , 2005).





Σχήμα 4.8 Νεοτεκτονικός χάρτης του ευρύτερου χώρου της περιοχής Στρατωνίου - Βαρβάρας - Ολυμπιάδας (από Νεοτεκτονικό χαρτη, Φύλλο Ροδολίβος, κλίμακα 1:100.000 Ο.Α.Σ.Π. - υπό έκδοση).



Σχήμα 4.9 Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I, II, III) του ελληνικού χώρου σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 (τελευταία τροποποίηση - 2003) (Παυλίδης, et al., 2010).

Από άποψη σεισμικότητας, σύμφωνα με τα στοιχεία του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ε.Α.Κ.-2000 του Ο.Α.Σ.Π.), η περιοχή μελέτης κατατάσσεται στην Κατηγορία II με οριζόντια σεισμική επιτάχυνση εδάφους  $A_h = \alpha x g$ , όπου  $\alpha = 0,24$ .

Το κυριότερο ενεργό ρήγμα της περιοχής, όπως αναφέρθηκε, είναι το ρήγμα της Ολυμπιάδας. Εφόσον ενεργοποιηθεί όλο το ορατό μήκος του εν λόγω ρήγματος, εκτιμάται από τη σεισμοτεκτονική μελέτη των Παυλίδης, et al., 2010 μέγιστο μέγεθος σεισμού μέχρι και  $M_s = 6,2$  με αντίστοιχη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση 41cm και μέση μετατόπιση 28cm. Εκτιμάται επιπροσθέτως ζώνη πιθανών επιφανειακών παραμορφώσεων  $\pm 50m$  εκατέρωθεν του ρήγματος.

Το ρήγμα της Ολυμπιάδας, αν και πλησίον των εγκαταστάσεων του μεταλλείου βρίσκεται εκτός αυτών και ως εκ τούτου δεν απαιτείται σεισμική θωράκιση των έργων, δεδομένου ότι δεν επηρεάζονται από τυχόν ενεργοποίηση του εν λόγω ρήγματος.

#### 4.2.5 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει ένα πολύπλοκο σύστημα το οποίο αποτελείται από επάλληλους υδροφορείς οι οποίοι είτε είναι σε επικοινωνία, είτε απομονωμένοι, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις περιλαμβάνουν και επικρεμάμενες υδροφορίες τοπικού χαρακτήρα. Όσον αφορά στη λειτουργία του συστήματος, κυρίαρχο ρόλο φαίνεται ότι διαδραματίζει ο εκάστοτε μανδύας αποσάθρωσης, ο οποίος λειτουργεί ως ταμειυτήρας τροφοδοσίας υδατορεμάτων και κατώτερων υδροφορέων, καθώς και τα υδατορέματα τα οποία δημιουργούν κατά θέσεις συνθήκες τροφοδοσίας και αποστράγγισης. Μέσω των δύο αυτών στοιχείων πραγματοποιείται η κατανομή των υδατικών πόρων στους υπόγειους υδροφορείς και ρυθμίζεται η διαίτα των νερών.

Σύμφωνα με την Τεχνική Μελέτη των Μεταλλευτικών Εγκαταστάσεων Ολυμπιάδας (Ελληνικός Χρυσός, 2011):

- Στην ευρύτερη περιοχή του μεταλλείου αναπτύσσονται τρεις (3) κύριοι υδροφόροι ορίζοντες στους βραχώδεις σχηματισμούς του υποβάθρου:
  - ο υδροφορέας των μαρμάρων,
  - ο υδροφορέας των υπερκείμενων του μαρμάρου βιοτιτικών γνευσίων και
  - ο υδροφορέας των υποκείμενων του μαρμάρου βιοτιτικών γνευσίων
- Επιφανειακά αναπτύσσεται υδροφορέας εντός της ζώνης αποσάθρωσης που λόγω της αποθηκευτικής ικανότητας του διακόπτει την απευθείας τροφοδοσία των βαθιών υδροφορέων κατά τους χειμερινούς μήνες και δύναται να τροφοδοτεί τους υδροφορείς του βραχώδους υποβάθρου με υστέρηση 3-4 μήνες. Το εν λόγω συμπέρασμα τεκμηριώνεται από ιστορικά δεδομένα των εισροών νερού στο μεταλλείο της Ολυμπιάδας, σύμφωνα με τα οποία παρουσιάζονταν περίπου 30% υψηλότερες εισροές υδάτων κατά τους μήνες Απρίλιο και Μάιο σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Σε απόσταση 600m δυτικά από το υπάρχον φρέαρ του μεταλλείου και πάνω από τις στοές -31m έως -122m του Δυτικού κοιτάσματος, βρίσκεται ζώνη καθίζησης του εδάφους που οφείλεται στην παλαιά μέθοδο εκμετάλλευσης με κατακρήμνιση οροφής. Κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων λόγω του υψηλού συντελεστή κατείδυσης (25-30%) μεγάλες ποσότητες νερού κατεισδύουν μέσω της ζώνης αυτής προς τα μεταλλευτικά υπόγεια έργα. Η ζώνη καθίζησης καταλαμβάνει μικρή έκταση και χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη παρουσία σχισμών, ρηγμάτων και οπών.
- Και οι τρεις κύριοι υδροφόροι ορίζοντες του βραχώδους υποβάθρου χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή πρωτογενή διαπερατότητα. Οι εισροές υπογείων υδάτων σε αυτούς ελέγχονται από το ρωγμώδες των ασυνεχειών.
- Ο κύριος υδροφορέας της περιοχής αναπτύσσεται εντός των μαρμάρων. Πρόκειται για υδροφόρο ορίζοντα που αναπτύσσεται λόγω του δευτερογενούς πορώδους και στον οποίο η διαπερατότητα παρουσιάζεται με ανισοτροπία που ελέγχεται από τον προσανατολισμό και τα χαρακτηριστικά των κύριων δομικών χαρακτηριστικών. Παρουσιάζει σημαντική διαπερατότητα που συσχετίζεται με τους υδροφόρους ορίζοντες άνωθεν και κάτωθεν των μαρμάρων, μέσω της διεύρυνσης λόγω διάλυσης των ασυνεχειών οι οποίες δύνανται να συνδέονται με ζώνες καολινιτώσης. Τέτοιες ζώνες απαντώνται όταν οι πηγματίτες εξαλλοιώνονται από την παρουσία του νερού. Τα μάρμαρα είναι κατά θέσεις μερικώς καρστικοποιημένα, με βαθμό καρστικοποίησης που μεταβάλλεται κατά θέσεις και με το βάθος. Ο εκτιμώμενος συντελεστής κατείδυσης για την περιορισμένη επιφανειακή εμφάνιση του σχηματισμού ανέρχεται σε 30-60%, και ο συντελεστής απορροής είναι μηδενικός, ενώ η υδροπερατότητα είναι υψηλή στα ανώτερα τμήματα ( $K > 10^{-2} \text{ m/s}$ ) και μειώνεται με το βάθος. Η υδροπερατότητα εντός του μεταλλείου της Ολυμπιάδας (απόλυτο υψόμετρο -319m έως -381m) είναι σημαντικά μικρότερη και κυμαίνεται μεταξύ  $K = 1 \times 10^{-4} - 7,6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ . Η φιλοξενούμενη υδροφορία είναι υπό πίεση. Όπως προέκυψε από δοκιμές στείρευσης σε γεωτρήσεις που βρίσκονται στα υπόγεια των μεταλλείων Ολυμπιάδας, η αποθηκευτική ικανότητα της υδροστρωματογραφικής ενότητας του μαρμάρου είναι πολύ μικρότερη από τυπικές αποθηκευτικές ικανότητες καρστικών υδροφορέων. Η αυξημένη υδροφορία του μαρμάρου οφείλεται περισσότερο στην πλευρική διήθηση υπογείων νερών από τους γειτονικούς γνευσίους (μέσω ρηγμάτων) παρά στην αποθηκευτική ικανότητα του ίδιου του μαρμάρου. Με βάση τα δημοσιευμένα στοιχεία, δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί η συνολική ετήσια τροφοδοσία του σχηματισμού διότι οφείλεται κατά κύριο λόγο σε πλευρικές υπόγειες εισροές, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν.
- Σημαντικός υδροφόρος ορίζοντας αναπτύσσεται και εντός των υγιών γνευσίων που υπέρκεινται των μαρμάρων στην ευρύτερη περιοχή. Ο υγιής, μη αποσαθρωμένος βιοτιτικός γνεύσιος είναι έντονα τεκτονισμένος και κερματισμένος από συστήματα διακλάσεων και ρήγματα. Ο σχηματισμός δεν εμφανίζεται επιφανειακά, διότι καλύπτεται από ζώνη εξαλλοίωσης η οποία είναι εμφανής στην επιφάνεια. Η υδροφορία του σχηματισμού είναι υπό πίεση. Η κατείδυση στα πετρώματα αυτά ανέρχεται σε 3-12% των κατακρημνισμάτων, ανάλογα με τον βαθμό κερματισμού και την κλίση του αναγλύφου. Η υδροπερατότητα στους τεκτονισμένους γνευσίους κυμαίνεται από  $K = 10^{-4} \text{ m/s}$  έως  $10^{-6} \text{ m/s}$  ενώ στους υγιείς μη κερματισμένους γνευσίους εκτιμάται ότι μειώνεται σε  $10^{-6} \text{ m/s}$  έως  $10^{-9} \text{ m/s}$ .

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Ο τρίτος κύριος υδροφόρος ορίζοντας που αναπτύσσεται στην περιοχή, είναι ο υδροφορέας που φιλοξενείται στον βιοτιτικό γνεύσιο που αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής μελέτης και υπόκειται των μαρμάρων. Πρόκειται για υπό πίεση υδροφορέα με πολύ περιορισμένο δευτερογενές πορώδες. Η μεταβιβασιμότητα του υδροφορέα είναι μικρότερη από  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, ενώ κατά περιοχές αγγίζει και τα  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Τροφοδοτείται από διαρροές του υπερκείμενου μαρμάρου και οι διαρροές του είναι τόσο μικρές που δεν καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό της ούτως ή άλλως αμελητέας ετήσιας τροφοδοσίας του.
- Η αποστράγγιση των υπόγειων υδάτων που πραγματοποιείται στην περιοχή των υφιστάμενων εγκαταστάσεων του μεταλλείου Ολυμπιάδας έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία κώνου κατάπτωσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Ο κώνος κατάπτωσης παρουσιάζει ανισότροπο σχήμα, με το μεγάλο άξονα σε ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση και στάθμη στα -230m στην περιοχή του υφιστάμενου κεντρικού φρέατος του μεταλλείου. Η μεγάλη διάμετρος του κώνου εκτιμάται ότι είναι περί τα 2600m ενώ η μικρή διάμετρος περί τα 1500m. Κατά την ανάπτυξη και λειτουργία των εγκαταστάσεων της Ολυμπιάδας προβλέπεται, μετά την άντληση υδάτων, η πτώση του κώνου σε υψόμετρο -660m στην περιοχή του φρέατος και τη μεταβολή της μεγάλης διαμέτρου στα 3600m και της μικρής στα 2000m έως 2300m.

#### 4.2.6 Τεχνικογεωλογική περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών

Τα πετρώματα που συγκροτούν την περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας παρουσιάζουν γενικά καλή γεωμηχανική συμπεριφορά. Πρόκειται για καλής ποιότητας βραχώμαζες με μικρές μόνο περιοχές πτωχής ποιότητας, που σχετίζονται με έντονη αποσάθρωση, εξαλλοίωση ή παρουσία τεκτονικών δομών (ρήγματα). Πιο συγκεκριμένα:

- **Βιοτιτικοί γνεύσιοι:**
  - Συνήθως σκουρότεφροι αλλά και πρασινότεφροι ή καστανότεφροι ανάλογα με το βαθμό αποσάθρωσης ή τον τύπο εξαλλοίωσης, λεπτόκοκκοι ως μεσόκοκκοι και ζωνώδεις.
  - Συχνή παρουσία φλεβοειδών διεισδύσεων ή ακανόνιστου σχήματος φακών πηγματίτη, συνήθως παράλληλα στη φολίδωση του πετρώματος, που αυξάνουν την ανισοτροπία αλλά και συχνά απομειώνουν την ποιότητα του λόγω της παρουσίας αστρίων ως κύριο ορυκτό στους πηγματίτες και της ευπάθειας αυτών στην εξαλλοίωση (καολινιτίωση) από τα υδροθερμικά ρευστά.
  - Συναντάται από υγιής, με πολύ υψηλή αντοχή και άρρηκτη δομή, έως έντονα αποσθρωμένους ή εξαλλοιωμένους με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά.
  - Σε περιβάλλον έντονου τεκτονισμού ή κοντά σε πυριγενείς διεισδύσεις και υδροθερμικά ρευστά παρατηρείται έντονη σερικιτική ή / και χλωριτική εξαλλοίωση των βιοτιτών αλλά και καολινιτίωση των αστρίων, σχηματίζοντας ασθενείς βραχώμαζες. Η αποσάθρωση ή / και εξαλλοίωση των βιοτιτικών γνευσίων μπορεί να αποφέρει από απομείωση των διατμητικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών (και ιδιαίτερα της γνευσιακής υφής) έως σχηματισμό έντονα σχιστοποιημένων και διατμημένων βραχομαζών, με πολύ πτωχά

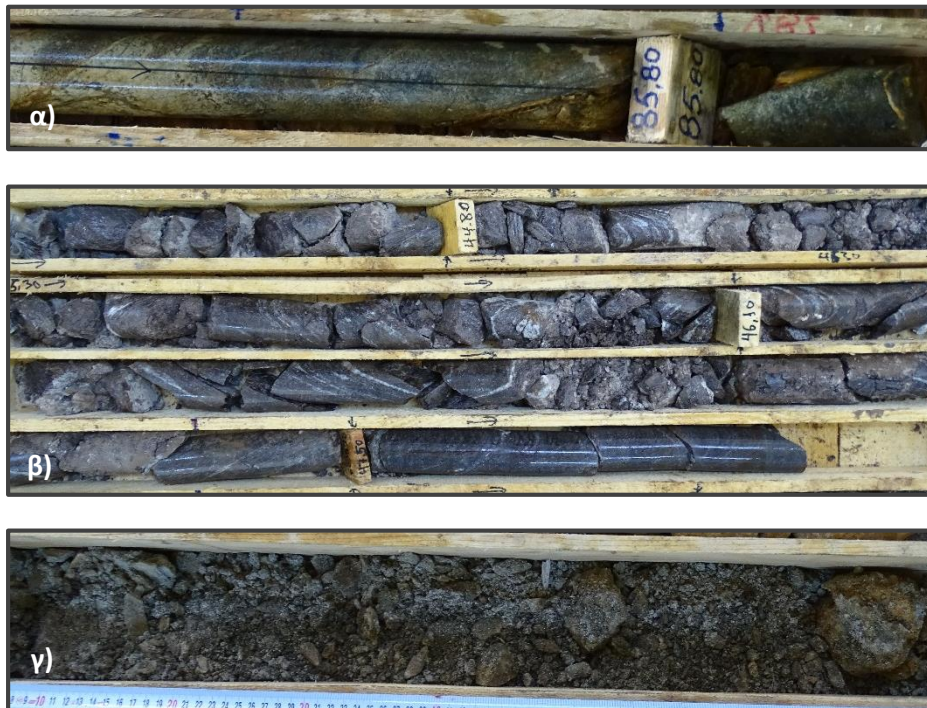
Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 87



μηχανικά χαρακτηριστικά, που σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να προσομοιάζουν ακόμη και συμπεριφορά εδαφικού υλικού.



Εικόνα 4.10 Ασθενείς Βιοτιτικοί Γνεύσιμοι α) μέτρια εξαλλοιωμένοι, με απομειωμένα διατμητικά χαρακτηριστικά ασυνεχειών λόγω της παρουσίας σερικήτη, χλωρίτη και αργιλικών ορυκτών, από τη γεώτρηση OLDD0025 στα 85,50 - 85,90 m, β) μέτρια ως έντονα εξαλλοιωμένη βραχώμαζα με έντονη παρουσία αργιλικών ορυκτών κατά τόπους, που διατηρεί όμως εν γένει τη δομή της, από τη γεώτρηση OLDD0012 στα 44,10 – 48,00 m, γ) πλήρως αποσαθρωμένη βραχώμαζα με έντονη παρουσία αργιλικών ορυκτών και μηχανική συμπεριφορά που προσομοιάζει αυτήν εδαφικού υλικού, από τη γεώτρηση OLDD0019 στα 22,20 – 23,00 m.

- **Μάρμαρα:**

- Τεφρά, λευκότεφρα ως, σπάνια, λευκά, λεπτόκοκκα έως μεσόκοκκα, κρυσταλλικά, μεσοστρωμάτωση ως παχυστρωμάτωση.
- Παρουσία γραφιτικού υλικού υπό μορφή νιφάδων και φλεβιδίων που συχνά αποτελούν επιφάνειες αδυναμίας.
- Σχηματισμός γενικά υγιής με μεγάλη αντοχή, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου έχει υποστεί πυριτίωση.
- Τεμαχώδης έως πολύ τεμαχώδης βραχώμαζα, τεμνόμενη από ασυνέχειες μέσης έως μεγάλης πυκνότητας, μέσης γενικά εμμόνης και μικρού έως καθόλου ανοίγματος. Συχνά κατά μήκος των ασυνεχειών παρατηρούνται πηγματιτικές διεισδύσεις, σιδηροξείδια, γραφιτικό υλικό, και, πλησίον της μεταλλοφορίας, μαγγανοξείδια.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Κατά τόπους παρουσιάζονται ζώνες τοπικής αποσάθρωσης που περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά διάλυσης και οδηγούν σε δημιουργία καρστικών εγκοίλων, χωρίς υλικό πλήρωσης ή πληρωμένων με καστανέρυθρα αργιλικά υλικά.
- Παρά την υψηλή αντοχή και τα καλά γενικά μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών η βραχώμαζα κατά τόπους μπορεί να εμφανίζεται έντονα κερματισμένη και αποδιοργανωμένη χωρίς συνοχή μεταξύ των τεμαχών αλλά με καλό αλληλοκλείδωμα που οφείλεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στην υψηλή γωνία τριβής.
- Απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών μπορεί να προκύψει λόγω της παρουσίας έντονα εξαλλοιωμένων (καολιτιτωμένων) πηγματιτών κατά μήκος των ασυνεχειών και κυρίως της φολίδωσης.

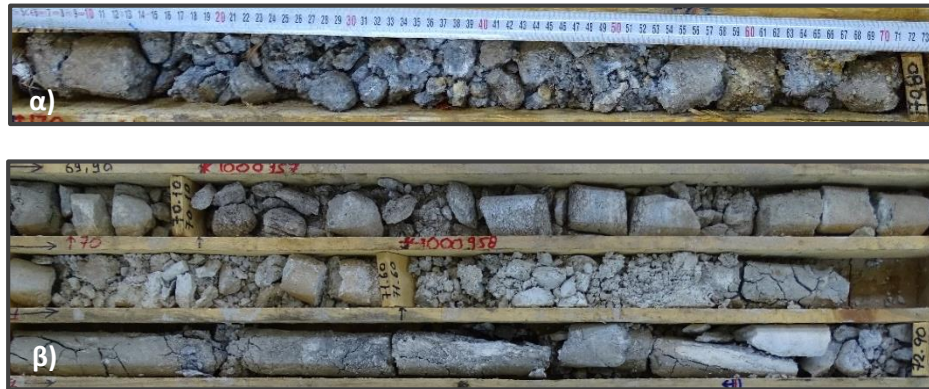


Εικόνα 4.11 Έντονα κερματισμένα και αποδιοργανωμένα μάρμαρα α) πλησίον της μεταλλοφορίας, με χαρακτηρισες μυλωνιτώσεως και τεκτονικού λατυποπαγούς (breccia), από τη γεώτρηση OLDD0018 στα 161,50 - 164,50 m, β) σε επαφή με τη μεταλλοφορία και με έντονη παρουσία μαγνητοξειδίων, από τη γεώτρηση OLDD0019 στα 89,90 - 90,60 m.

- **Πηγματίτες και Γρανιτικοί Γνεύσιοι:**

- Λευκού έως λευκότεφρου χρώματος, αδρόκοκκοι ως μεσόκοκκοι και κρυσταλλικοί.
- Εντοπίζονται εντός των προϋπαρχόντων πετρωμάτων της ενότητας Κερδυλλίων (γνεύσιοι και μάρμαρα) με τη μορφή φλεβοειδών διεισδύσεων και φακών ακανόνιστου σχήματος (παρείσακτων κοιτών) και άρα βρίσκονται σε μικρή ποσοστιαία αναλογία έναντι των υπόλοιπων σχηματισμών.
- Συναντώνται από υγιείς με μεγάλη αντοχή και άρρηκτη δομή, έως έντονα αποσαθρωμένοι ή εξαλλοιωμένοι με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά.
- Παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευπάθεια στην εξαλλοίωση ή / και αποσάθρωση, λόγω της επίδρασης υδροθερμικών διαλυμάτων ή ατμοσφαιρικών συνθηκών αντίστοιχα, σχηματίζοντας εξαιρετικά ασθενή γεωυλικά, αργιλικής φύσης, λόγω της εξαλλοίωσης των αστρίων που αποτελούν κύριο συστατικό των πετρωμάτων αυτών, σε καολίνη.
- Ακόμη και σε υγιείς γνευσίους παρατηρείται συχνά χαμηλή αντοχή (Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. & Γεωτεχνικό Τμήμα Σκουριών, 2015) λόγω του πυκνού δικτύου ασβεστιτικών φλεβιδίων που διατρέχουν τη βραχώμαζα.

#### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Εικόνα 4.12 Πηγματιτικές διεισδύσεις α) έντονα εξαλλοιωμένες με σημαντική παρουσία αργιλικών ορυκτών, από τη γεώτρηση OLDD0018 στα 169,90 - 170,80 m, β) πλήρως εξαλλοιωμένη βραχόμαζα αποτελούμενη ως επί το πλείστον από αργιλικά ορυκτά, από τη γεώτρηση OLDD0015 στα 69,90 - 72,90 m.

- **Μεταλλοφορία**

- Αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη και αρσενοπυρίτη σε διάφορες αναλογίες.
- Εντοπίζεται κυρίως εντός των μαρμάρων και σπανιότερα εντός των βιοτιτικών γνευσίων αλλά και των πηγματιτών.
- Εμφανίζεται κυρίως συμπαγής με παρουσία όμως εγκοίλων, μεγέθους λίγων χιλιοστών έως και 2-3 εκατοστών.
- Παρουσιάζει καλά γενικά μηχανικά χαρακτηριστικά και ιδιαίτερα όταν έχει υποστεί πυριτώση, με εξαίρεση τις περιπτώσεις όπου το ποσοστό των εγκοίλων επί της βραχόμαζας είναι αυξημένο οπότε και η μεταλλοφορία καθίσταται εύθραπτη παρουσιάζοντας πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 4.13 Μεταλλοφορία μεικτών θειούχων α) από τη γεώτρηση OLDD0001 στα 84,90 - 87,80 m



## 5 Τεχνικογεωλογική περιγραφή και ταξινόμηση της βραχώμαζας στην περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας

### 5.1 Αντοχή και μέτρο ελαστικότητας των πετρωμάτων του μεταλλείου Ολυμπιάδας

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα και όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, η περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας αποτελείται από γνευσίους (βιοτιτικούς, αστριούχους βιοτιτικούς και αμφιβολιτικούς) και μάρμαρα, ενώ συχνά οι σχηματισμοί αυτοί φαίνεται να διασχίζονται από φλεβοειδείς πηγματιτικές διεισδύσεις ποικίλου πάχους.

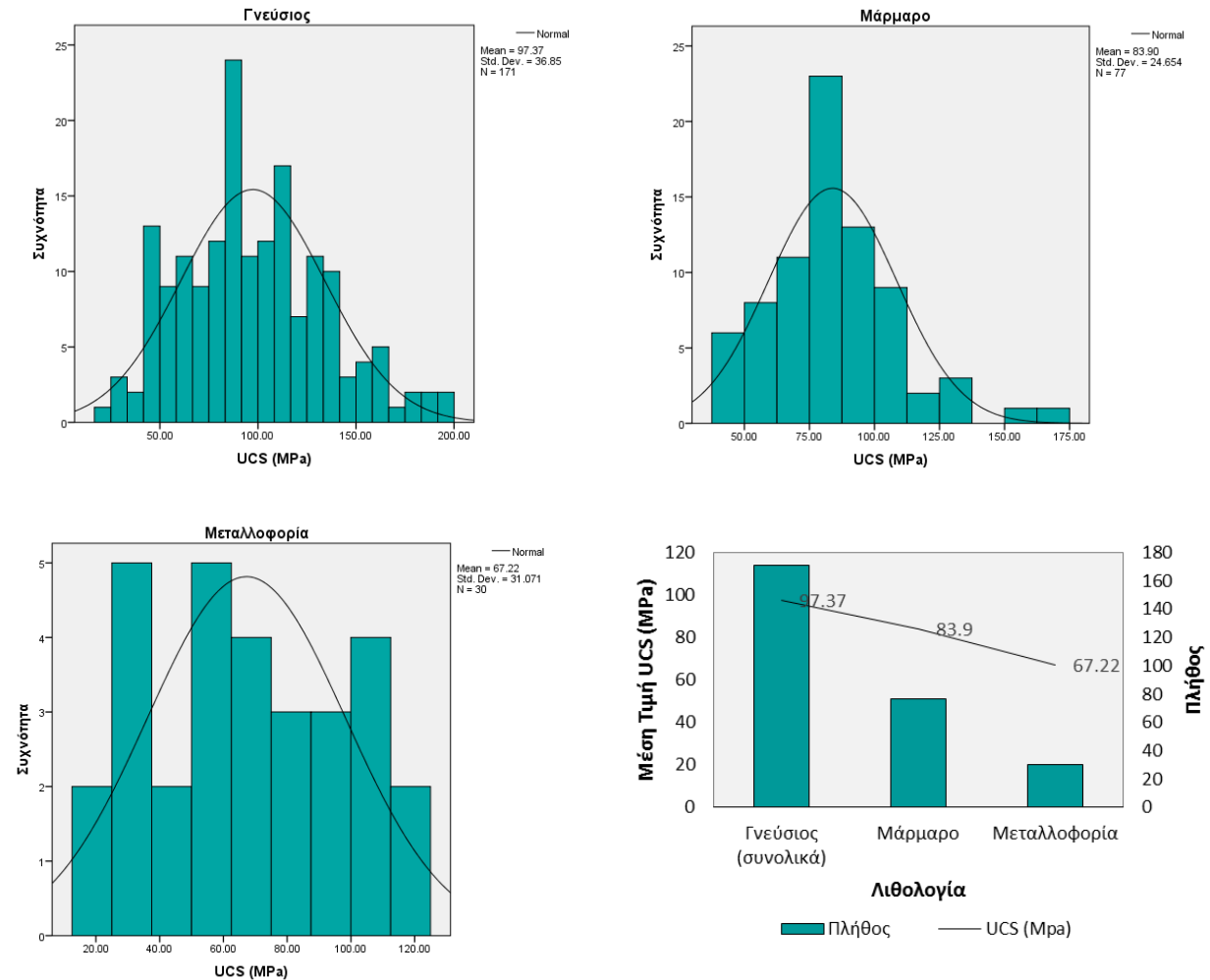
Προκειμένου να προσδιοριστούν οι αντιπροσωπευτικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας διεξήχθησαν εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές ενώ λήφθηκαν υπόψη στοιχεία από εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν σε δείγματα πετρωμάτων της περιοχής με βάση τις διάφορες μελέτες που έχουν εκπονηθεί για την ευρύτερη περιοχή των μεταλλείων Κασσάνδρας. Με βάση τα στοιχεία αυτά προέκυψαν οι τιμές αντοχής και μέτρου ελαστικότητας των επικρατέστερων λιθολογικών ενοτήτων που απαντώνται στην περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας και οι οποίες παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και σχήματα.

Για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την κατασκευή των ιστογραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό IBM SPSS 20.

**Πίνακας 5.1** Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και στατιστική ανάλυση επί των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Λιθολογία	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη – UCS (MPa)				
	Πλήθος δοκιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Γνεύσιος (συνολικά)	171	97	37	20	194
Μάρμαρο	77	84	25	40	172
Μεταλλοφορία	30	67	31	14	121

Στην κατανομή των γνευσίων (συνολικά) παρατηρούνται περισσότερα από ένα μέγιστα τα οποία πιθανόν οφείλονται στην ορυκτολογική ποικιλομορφία (βιοτιτικοί, αμφιβολιτικοί, αστριούχοι-βιοτιτικοί), την κοκκομετρία, την περιοχή δειγματοληψίας, τον τύπο αστοχίας των δοκιμών (αστοχία ακέραιου πετρώματος, αστοχία πάνω σε υπάρχουσα επιφάνεια αδυναμίας κ.λπ.) κ.λπ..



Σχήμα 5.1 Κατανομή των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής UCS για τους κύριους λιθολογικούς σχηματισμούς του μεταλλείου Ολυμπιάδας καθώς και για τη μεταλλοφορία μεικτών θειούχων.

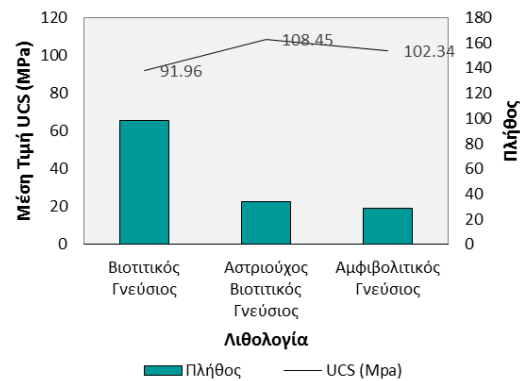
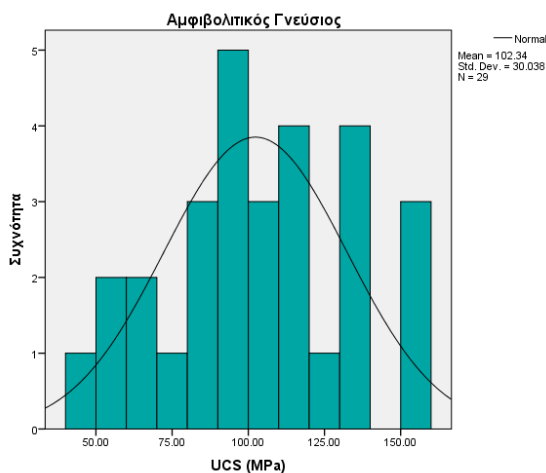
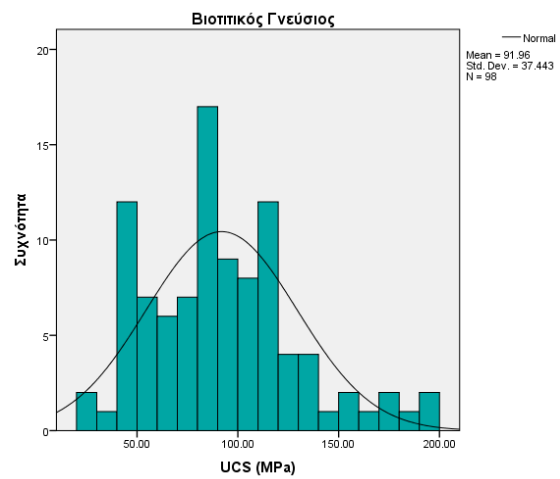
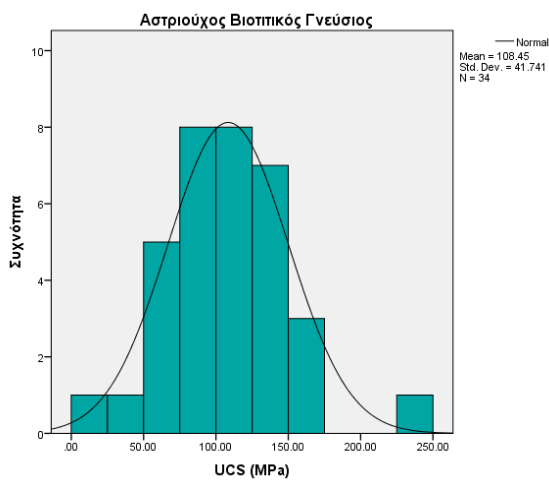
Λόγω της ποικιλομορφίας των γνευσίων κρίθηκε απαραίτητη η διάκριση τους σύμφωνα με την ορυκτολογική τους σύσταση και η ανάλυση τους ώστε να διερευνηθούν τυχόν ιδιαιτερότητες ή αποκλίσεις.

Όπως προκύπτει λοιπόν από τη διάκριση των γνευσίων με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση και την περαιτέρω στατιστική ανάλυση αυτών (Σχήμα 5.2 Σχήμα 5.2 Κατανομή των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής UCS για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση., Πίνακας 5.2) προκύπτει ότι οι γνεύσιοι με αμφιβολιτική και αστριούχα-βιοτιτική σύσταση παρουσιάζουν γενικά υψηλότερες τιμές αντοχής από αυτές των βιοτιτικών γνευσίων ενώ το εύρος και η τυπική απόκλιση των αστριούχων βιοτιτικών γνευσίων φαίνεται να είναι υψηλότερα από αυτά των υπόλοιπων τύπων γνευσίου.



Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και στατιστική ανάλυση επί των διάφορων τύπων γνευσίου που απαντώνται στο μεταλλείο Ολυμπιάδας.

Τύπος γνευσίου	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη – UCS (MPa)				
	Πλήθος δοκιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Βιοτιτικός Γνεύσιος	98	92	37	26	194
Αστριούχος Βιοτιτικός Γνεύσιος	34	108	42	20	243
Αμφιβολιτικός Γνεύσιος	29	102	30	48	152



Σχήμα 5.2 Κατανομή των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής UCS για το σχηματισμό των γνευσιών, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

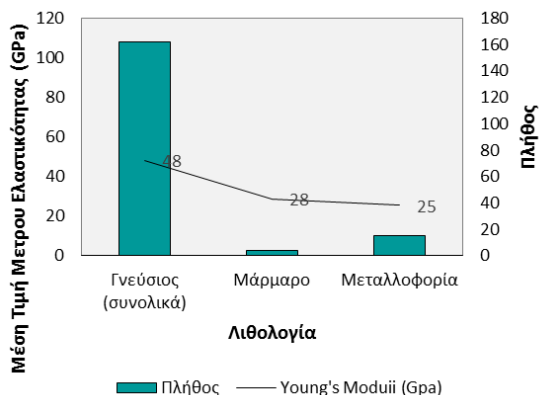
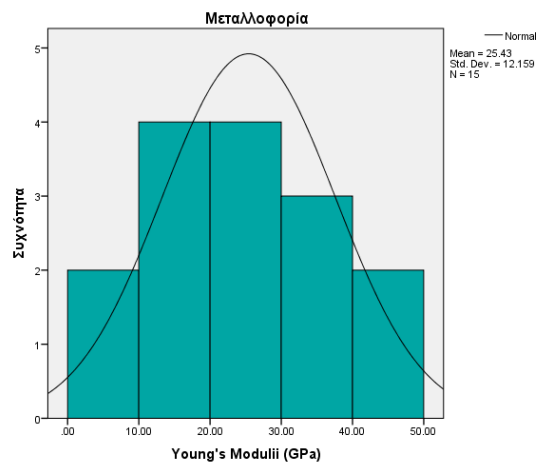
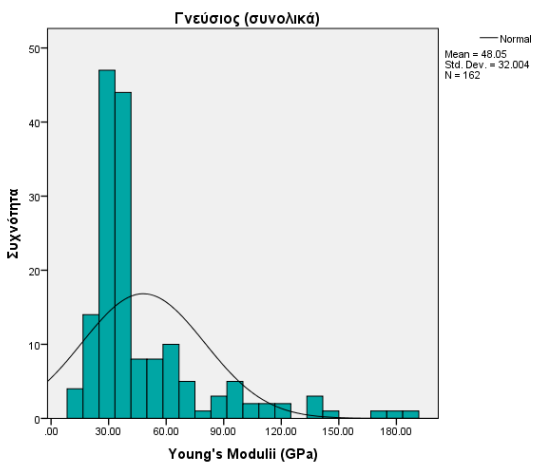
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 93

Από τις εργαστηριακές δοκιμές που διενεργήθηκαν κατέστη δυνατός και ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των επικρατέστερων λιθολογικών ενοτήτων του μεταλλείου Ολυμπιάδας. Στους παρακάτω πίνακες και σχήματα απεικονίζονται οι κατανομές και τα μέτρα θέσης και διασποράς αυτών. Από τις κατανομές απουσιάζει αυτή των μαρμάρων λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων.

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας των εργαστηριακών δοκιμών που διενεργήθηκαν επί των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

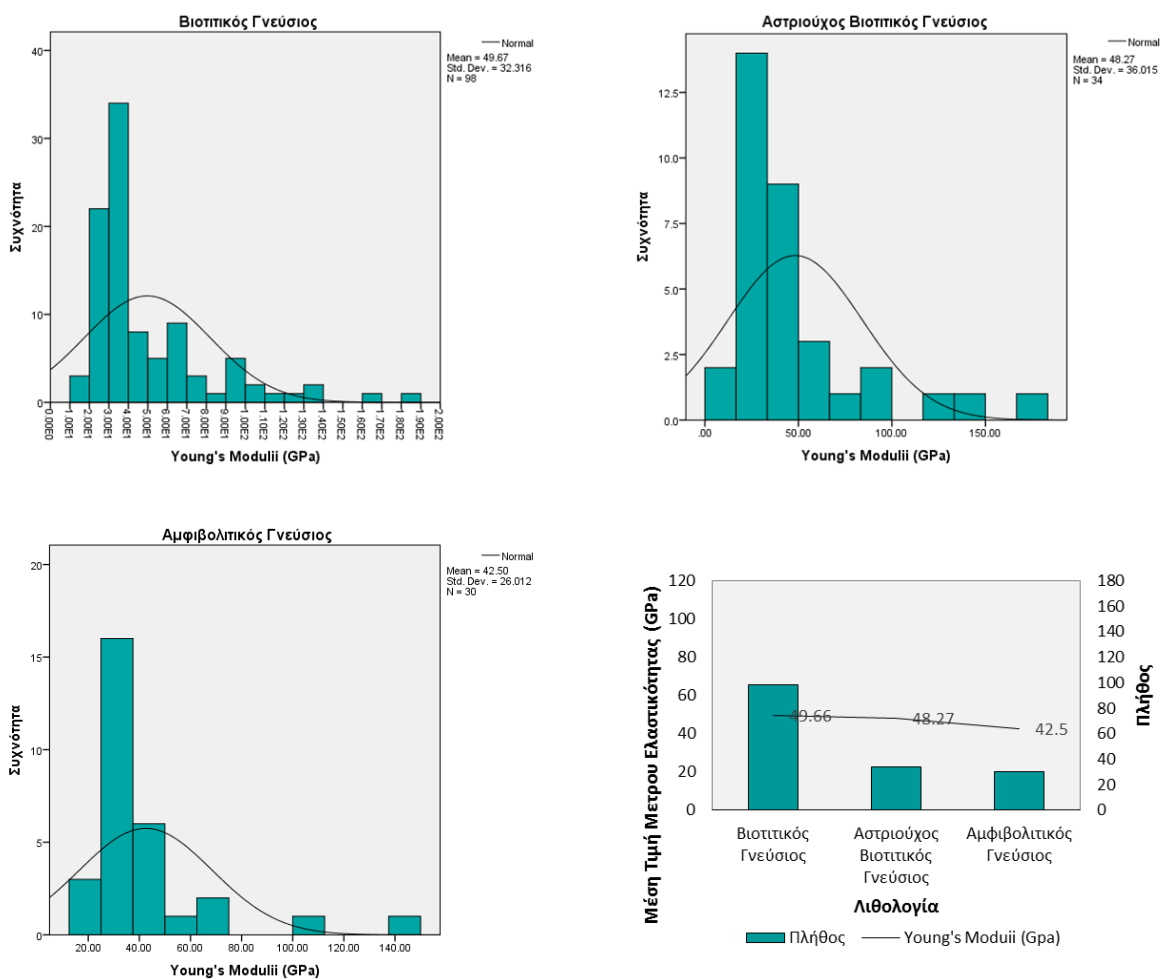
Λιθολογία	Μέτρο ελαστικότητας - $E_i$ (GPa)				
	Πλήθος δοκιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Γνεύσιος (συνολικά)	162	48	32	134	184
Μάρμαρο	4	28	9	18	38
Μεταλλοφορία	15	25	12	3	44



Σχήμα 5.3 Κατανομή των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για τους κύριους λιθολογικούς σχηματισμούς του μεταλλείου Ολυμπιάδας καθώς και για τη μεταλλοφορία μεικτών θειούχων.

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας των εργαστηριακών δοκιμών που διενεργήθηκαν επί των διάφορων τύπων γνευσίου που απαντώνται στο μεταλλείο Ολυμπιάδας.

Λιθολογία	Μέτρο ελαστικότητας - E <sub>i</sub> (GPa)				
	Πλήθος δοκιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Αμφιβολιτικός γνεύσιος	30	43	26	19	142
Βιοτιτικός γνεύσιος	98	50	32	14	184
Αστριούχος Βιοτιτικός Γνεύσιος	34	48	36	14	178



Σχήμα 5.4 Κατανομή των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση.

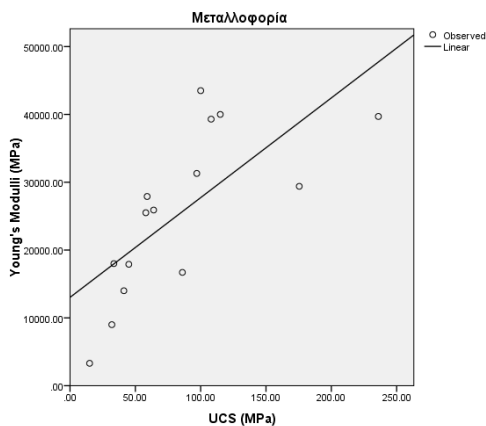
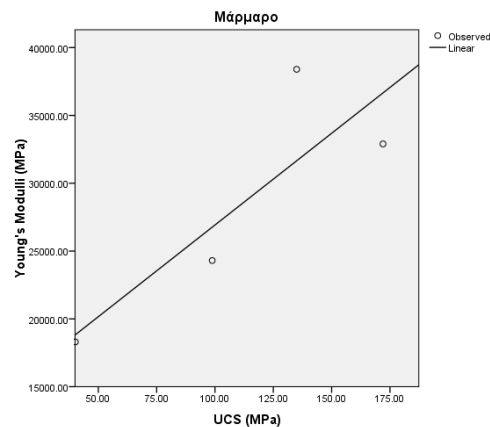
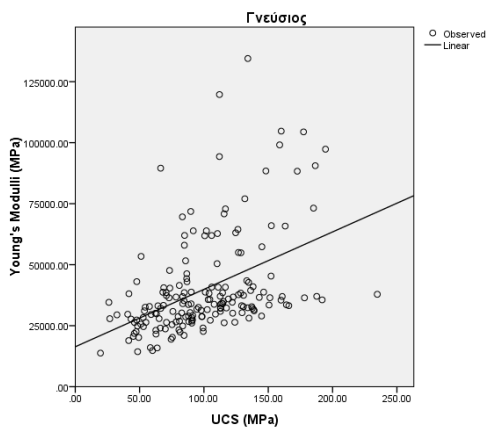
Από τη συσχέτιση των τιμών της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) και του μέτρου ελαστικότητας ( $E_i$ ) προέκυψαν οι τιμές του λόγου παραμορφωσιμότητας MR για τους επικρατέστερους λιθολογικούς

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

τύπους του μεταλλείου Ολυμπιάδας (Πίνακας 5.5, Σχήμα 5.5) καθώς και για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση (Πίνακας 5.6, Σχήμα 5.6).

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) των εργαστηριακών δοκιμών που διενεργήθηκαν επί των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

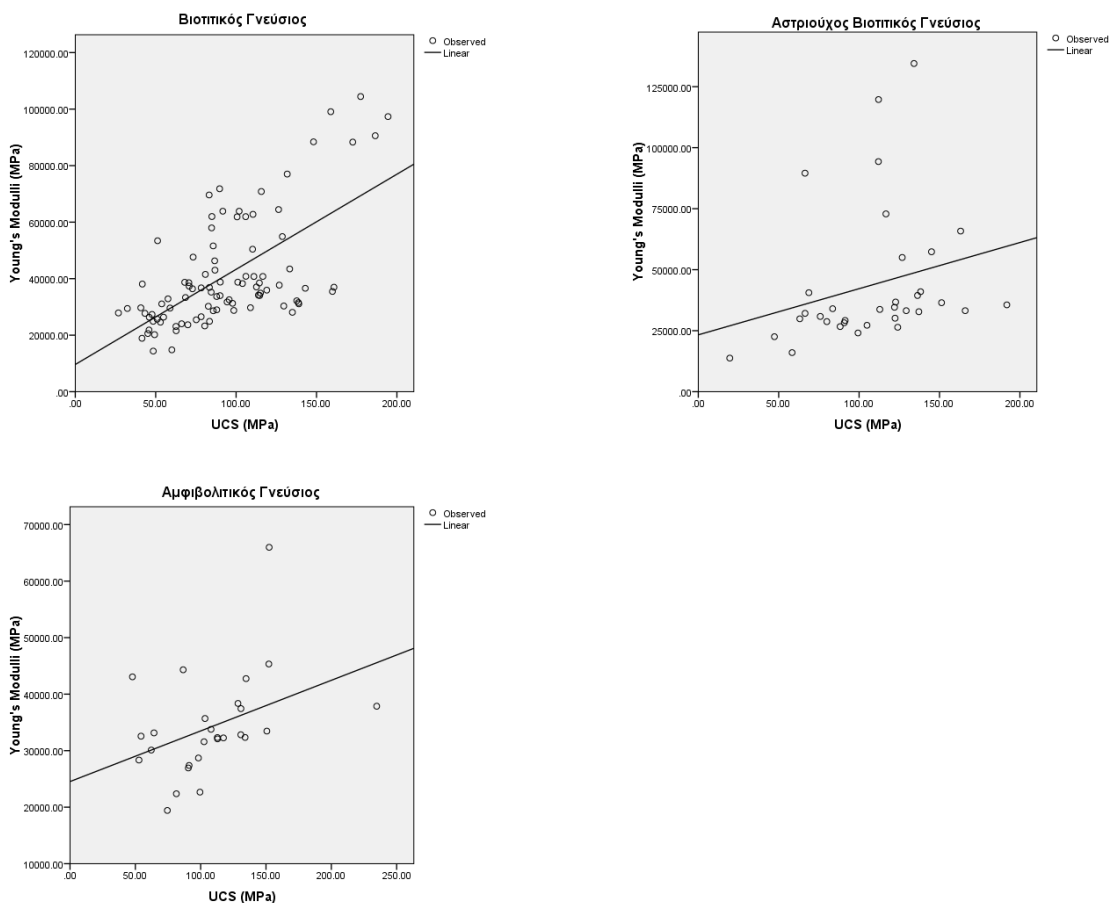
Λιθολογία	Σταθερά Παραμορφωσιμότητας (MR)		
	Πλήθος δοκιμών	MR	R <sup>2</sup>
Γνεύσιος (συνολικά)	177	235	0.201
Μάρμαρο	4	135	0.724
Μεταλλοφορία	15	147	0.507



Σχήμα 5.5 Διαγράμματα Μονοαξονικής Αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) - Μέτρου Ελαστικότητας ( $E_i$ ) για τον προσδιορισμό της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) των επικρατέστερων λιθολογικών τύπων του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση.

Λιθολογία	Σταθερά Παραμορφωσιμότητας (MR)		
	Πλήθος δοκιμών	MR	R <sup>2</sup>
Αμφιβολιτικός γνεύσιος	27	90	0.156
Βιοτιτικός γνεύσιος	94	337	0.403
Αστριούχος Βιοτιτικός Γνεύσιος	34	189	0.064



Σχήμα 5.6 Διαγράμματα Μονοαξονικής Αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) - Μέτρου Ελαστικότητας ( $E_i$ ) για τον προσδιορισμό της σταθεράς παραμορφωσιμότητας (MR) για το σχηματισμό των γνευσίων, ανάλογα με την ορυκτολογική τους σύσταση.

Γενικά, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, η αντοχή των βραχωμαζών που απαντώνται στο μεταλλείο Ολυμπιάδας μπορεί να χαρακτηριστεί μέση έως και, κατά τόπους, υψηλή. Εξάιρεση αποτελούν περιοχές όπου οι βραχώμαζες έχουν επηρεαστεί από τα

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 97



υδροθερμικά ρευστά με αποτέλεσμα την αργιλική, σερικιτική ή χλωριτική εξαλλοίωση τους. Στις περιοχές αυτές οι αντοχές των σχηματισμών, όπως προκύπτει από επί τόπου δοκιμές με χρήση γεωλογικού σφυριού, είναι εξαιρετικά χαμηλές, προσεγγίζοντας έως και αντοχές εδαφικών σχηματισμών (<5 MPa) (λόγω της εξαιρετικά χαμηλής αντοχής δεν ήταν δυνατή η μόρφωση δοκιμών για τη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών).

Οι τιμές του MR που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία (Palmstrom & Singh, 2001) για τους γνευσίους όσο και για τα μάρμαρα είναι 330-406 και 474-1074 αντίστοιχα. Σύμφωνα όμως με τις ανωτέρω τιμές, όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των εργαστηριακών δεδομένων, προέκυψαν μεγάλες διαφορές με τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές. Εξάιρεση αποτελεί ο σχηματισμός των βοτιτικών γνευσίων με μέση τιμή MR 337.

## 5.2 Γεωτεχνική ταξινόμηση των πετρωμάτων του μεταλλείου Ολυμπιάδας με βάση το σύστημα RMR '89

Το σύστημα ταξινόμησης RMR '89 αποτελεί το βασικό σύστημα ταξινόμησης που έχει χρησιμοποιηθεί στο μεταλλείο Ολυμπιάδας, τόσο για την περιγραφή των πυρήνων γεωτρήσεων όσο και για τη χαρτογράφηση των μετώπων των υπόγειων στοών. Συνολικά, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μεταλλείου υπό την εταιρία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε., με το σύστημα RMR έχουν χαρτογραφηθεί πάνω από 900 μέτωπα υπόγειων στοών που διανοίχθηκαν σχεδόν αποκλειστικά σε στείρα πετρώματα και έχουν περιγραφεί περί τα 5.000m πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος.

Επί πλέον, δεδομένα χαρτογράφησης υπόγειων στοών αλλά και περιγραφής δειγματοληπτικών γεωτρήσεων αντλήθηκαν από μελέτες που διεξήχθησαν κατά τις προγενέστερες περιόδους λειτουργίας του μεταλλείου. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών θα χρησιμοποιηθούν για λόγους σύγκρισης της ποιότητας της βραχώμαζας.

Οι περιγραφές και οι κατηγοριοποιήσεις των γεωλογικών σχηματισμών παρουσιάζουν κάποιες διαφορές μεταξύ των χαρτογραφήσεων των μετώπων των υπόγειων στοών και των περιγραφών των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Η ανομοιομορφία αυτή οφείλεται κυρίως στην διαφορετική κλίμακα παρατήρησης.

### 5.2.1 Χαρτογραφήσεις μετώπων κατά την ανάπτυξη των στοών πρόσβασης του Ανατολικού Κοιτάσματος

Στη φάση ανάπτυξης του μεταλλείου Ολυμπιάδας χαρτογραφήθηκαν και ταξινομήθηκαν με το σύστημα RMR '89 πάνω από 900 μέτωπα υπόγειων στοών. Οι χαρτογραφήσεις διεξήχθησαν στην Ανατολική Ράμπα, τις στοές πρόσβασης -100, -150, -180, -200, -220, την ερευνητική στοά -210 καθώς και τη συνδετική στοά -173. Τα εύρη τιμών του δείκτη RMR παρουσιάζονται παρακάτω, συνολικά αλλά και

ξεχωριστά ανά λιθολογική ενότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό του RMR έχουν ληφθεί ξηρές συνθήκες λόγω της αποστράγγισης που διενεργείται στο μεταλλείο αλλά κυρίως για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων με αυτά των γεωτρήσεων.



Σχήμα 5.7 Απόσπασμα από το χώρο εργασίας του λογισμικού Datamine Studio 3 όπου απεικονίζεται, με μορφή τρισδιάστατου μοντέλου, η δομή του κοιτάσματος Ολυμπιάδας και οι στοές στις οποίες διεξήχθησαν οι χαρτογραφήσεις μετώπων.

Πίνακας 5.7 Τιμές RMR από τη χαρτογράφιση μετώπων κατά την ανάπτυξη των στοών πρόσβασης του Ανατολικού Κοιτάσματος

Λιθολογία	RMR				
	Πλήθος	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Γνεύσιος	192	66	9.91	37	87
Γνεύσιος με Πηγματίτες	15	53	13.75	35	77
Επαφή Γνευσίου - Μαρμάρου	92	63	10.81	33	82
Μάρμαρο	506	68	8.52	40	84
Μάρμαρο με Πηγματίτες	29	61	8.21	45	79
Συνολικά	908	67	9.48	33	87

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 99

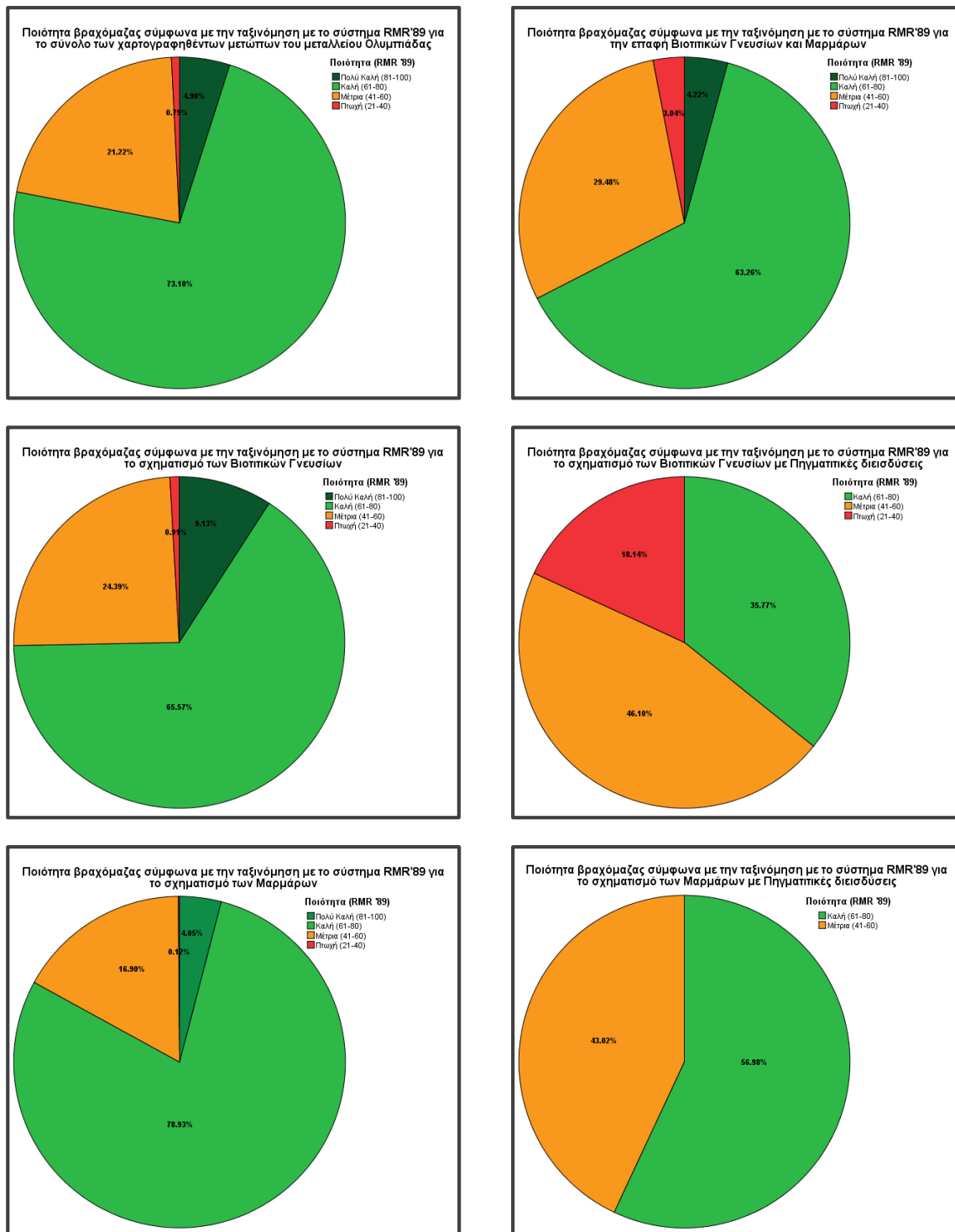
Πίνακας 5.8 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχώμαζας επί του συνόλου των χαρτογραφούμενων μετώπων για όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για το σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων των στοών πρόσβασης του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Λιθολογία	Ποιότητα βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR'89				
	Πολύ Πτωχή (0-20)	Πτωχή (21-40)	Μέτρια (41-60)	Καλή (61-80)	Πολύ Καλή (81-100)
Γνεύσιος	-	0.91%	24.39%	65.57%	9.13%
Γνεύσιος με Πηγματίτες	-	18.14%	46.10%	35.77%	-
Επαφή Γνευσίου - Μαρμάρου	-	3.04%	29.48%	63.26%	4.22%
Μάρμαρο	-	0.12%	16.90%	78.93%	4.05%
Μάρμαρο με Πηγματίτες	-	-	43.02%	56.98%	-
Συνολικά	-	0.79%	21.22%	73.10%	4.90%

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα:

- Η πλειοψηφία των χαρτογραφηθέντων μετώπων αφορούν μέτωπα μαρμάρου.
- Στο σύνολο τους η ποιότητα των μετώπων ταξινομείται από «πτωχή» έως «καλή» με τη μέση τιμή του RMR να καταδεικνύει «καλή» ποιότητα βραχώμαζας στο σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων. Συγκεκριμένα σχεδόν το 80% (4.90% Πολύ Καλή, 73.10% Καλή) της βραχώμαζας, όπως αυτή καταγράφηκε κατά την χαρτογράφηση των μετώπων, χαρακτηρίζεται καλής έως πολύ καλής ποιότητας. Λιγότερο από 1% (0.79% Πτωχή) της βραχώμαζας χαρακτηρίστηκε κακής έως πολύ κακής ποιότητας, ενώ το υπόλοιπο 20% της βραχώμαζας χαρακτηρίστηκε μέτριας ποιότητας (21.22% Μέτρια).
- Γενικά τα μέτωπα, ανεξάρτητα από τη λιθολογία, παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες όσον αφορά τόσο στο εύρος των τιμών του δείκτη RMR, όσο και στην απόκλιση αυτών από τη μέση τιμή.
- Τόσο στα γνευσιακά μέτωπα όσο και στα μέτωπα μαρμάρου παρατηρείται σαφής μείωση της τιμής του RMR με την παρουσία πηγματιτικών διεισδύσεων. Φαίνεται όμως η ποιότητα των μαρμάρων να επηρεάζεται πολύ λιγότερο από τις πυριγενείς διεισδύσεις σε σχέση με αυτή των γνευσίων.
- Παρ' όλα αυτά όμως στα μάρμαρα φαίνεται να απουσιάζουν τα «πτωχά» μέτωπα αλλά να αυξάνει κατακόρυφα το ποσοστό των «μέτριων» μετώπων. Αντίθετα στους γνεύσιους παρατηρείται μία καθολική μετατόπιση του RMR προς τις πτωχότερες ποιότητες.
- Την υψηλότερη μέση τιμή παρουσιάζουν τα μάρμαρα, ενώ η μέγιστη τιμή RMR παρουσιάζεται σε γνευσιακό μέτωπο.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Σχήμα 5.8 Κυκλικά διαγράμματα της ποιότητας της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR '89 για κάθε κύρια λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων των στοών πρόσβασης του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 101

Για τον προσδιορισμό των αιτιών στα οποία οφείλεται η απομείωση της τιμής του δείκτη RMR κατασκευάστηκαν οι Πίνακας 5.9 και Πίνακας 5.10 όπου παρουσιάζεται η μέση τιμή κάθε παραμέτρου του RMR ανά λιθολογική ενότητα και ανά ποιότητα βραχώμαζας αντίστοιχα καθώς και η ποσοστιαία συμμετοχή αυτών στην τιμή του RMR. Σύμφωνα με τους πίνακες αυτούς:

- Η αντοχή του άρρηκτου βράχου (R1) φαίνεται να κατέχει μεγαλύτερο ποσοστό στην τιμή του RMR για σχηματισμούς που παρουσιάζουν γενικά καλύτερη ποιότητα (πχ. μάρμαρα), ενώ το ίδιο φαίνεται να ισχύει και για την τιμή του RQD (R2).
- Η απόσταση των ασυνεχειών (R3) δε φαίνεται να παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση για τους διάφορους σχηματισμούς. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στον μέτριο κερματισμό που συναντάται ακόμη και στα καλής ποιότητας μέτωπα. Το RQD φαίνεται να παραμένει ανεπηρέαστο, γεγονός που πιθανόν υποδεικνύει ότι παρά το πυκνό δίκτυο ασυνεχειών τα σχηματιζόμενα τεμάχια έχουν μήκος μεγαλύτερο από 10cm.
- Η ποιότητα των ασυνεχειών (R4) αν και δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση για τους διάφορους λιθολογικούς τύπους φαίνεται να επηρεάζεται αρνητικά από την παρουσία πηγματιτικών διεισδύσεων στα γνευσιακά μέτωπα. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση της ποσοστιαίας συμμετοχής του R4 στους σχηματισμούς με χαμηλότερη μέση τιμή RMR (γνεύσιοι με πηγματίτες, επαφή γνευσίου - μαρμάρου) ενώ η τιμή του συντελεστή R4 φαίνεται να αυξάνεται σημαντικά με τη μετάβαση της ποιότητας από «Πτωχή» σε «Πολύ Καλή».

Πίνακας 5.9 Μέση τιμή του δείκτη RMR '89 και των συντελεστών αυτού ανά λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων των στοών πρόσβασης του Ανατολικού κοιτάσματος.

Παράμετρος	Μέση τιμή και ποσοστιαία συμμετοχή											
	Γνεύσιος		Γνεύσιος με Πηγματίτες		Επαφή Γνευσίου - Μαρμάρου		Μάρμαρο		Μάρμαρο με Πηγματίτες		Συνολικά	
R1 (IRS)	9	14%	6	11%	8	13%	11	16%	9	15%	10	15%
R2 (RQD)	12	18%	8	15%	11	17%	13	19%	10	16%	12	18%
R3 (απόσταση ασυνεχειών)	9	14%	7	13%	8	13%	8	12%	8	13%	8	12%
R4 (ποιότητα ασυνεχειών)	21	32%	18	34%	20	32%	20	29%	20	33%	20	30%
RMR**	66		53		63		68		61		67	

\* Όλες οι τιμές έχουν υποστεί στρογγυλοποίηση.

\*\* Για τον υπολογισμό του RMR έχουν ληφθεί ξηρές συνθήκες (R5=15).



Πίνακας 5.10 Μέση τιμή συντελεστών RMR ανά κατηγορία ποιότητας βραχώμαζας

Λιθολογία	Μέση τιμή και ποσοστιαία συμμετοχή									
	Πολύ Πτωχή (0-20)		Πτωχή (21-40)		Μέτρια (41-60)		Καλή (61-80)		Πολύ Καλή (81-100)	
R1 (IRS)	-	-	3	8%	7	13%	11	15%	14	17%
R2 (RQD)	-	-	4	11%	9	16%	14	20%	18	22%
R3 (απόσταση ασυνεχειών)	-	-	6	16%	8	15%	9	13%	11	13%
R4 (ποιότητα ασυνεχειών)	-	-	9	24%	17	31%	22	31%	25	30%
RMR**	-		37		55		71		83	

\* Όλες οι τιμές έχουν υποστεί στρογγυλοποίηση.

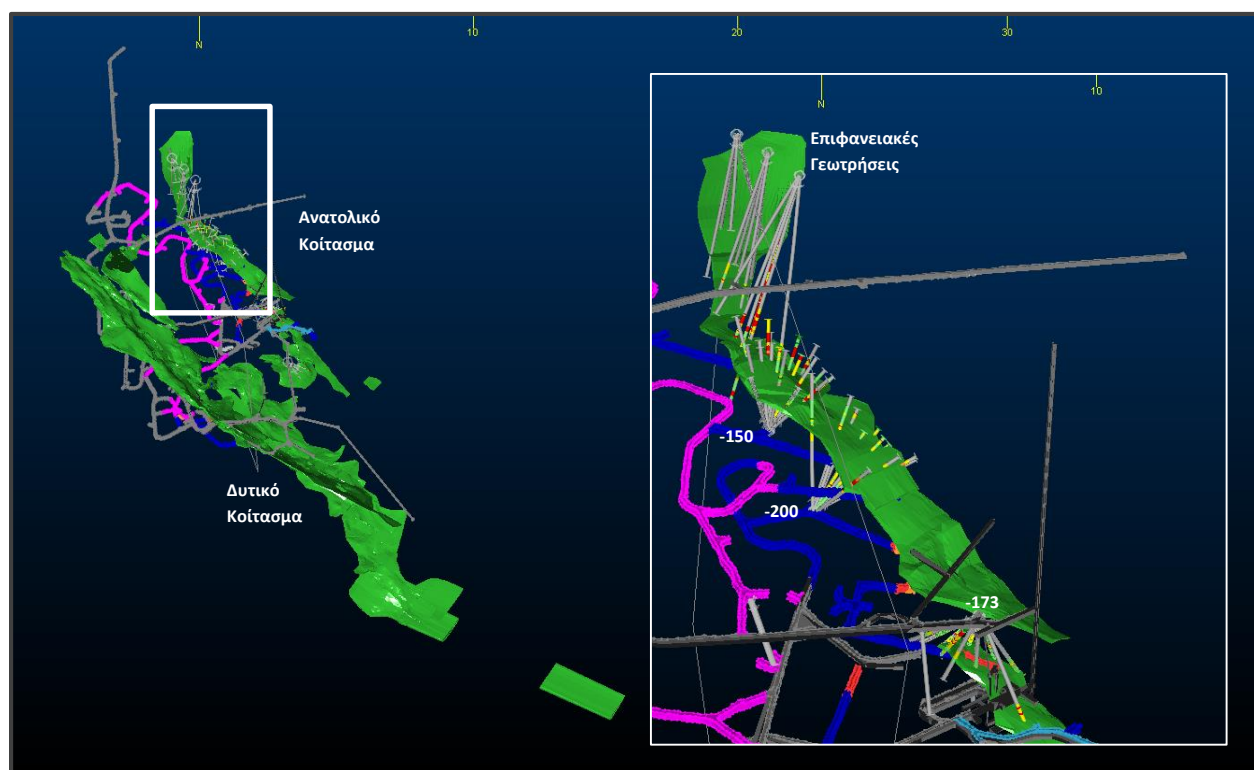
\*\* Για τον υπολογισμό του RMR έχουν ληφθεί ξηρές συνθήκες (R5=15).

### 5.2.2 Περιγραφή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού Κοιτάσματος

Στα πλαίσια του γεωτρητικού προγράμματος οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας 2015 πρόκειται να διατρηθούν 15.000m δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Περί τα 5.000m έχουν διατρηθεί μέχρι σήμερα, ενώ σχεδόν 2.000m εξ αυτών έχουν περιγραφεί γεωτεχνικά. Η γεωτεχνική πληροφορία των γεωτρήσεων καταγράφεται, εκτός ελάχιστων εξαιρέσεων, αποκλειστικά πλησίον της μεταλλοφορίας, στους σχηματισμούς δηλαδή που πρόκειται να αποτελέσουν τα τοιχώματα των στοών απόληψης του μεταλλεύματος.

Να σημειωθεί ότι για την ταξινόμηση της βραχώμαζας κατά τη περιγραφή των γεωτρήσεων λαμβάνονται ξηρές συνθήκες (R5=15) λόγω της αδυναμίας εκτίμησης των συνθηκών υπόγειου νερού με αξιοπιστία. Επιπλέον, η απόληψη του μεταλλεύματος πρόκειται να γίνει υπό ξηρές συνθήκες λόγω της διεξαγωγής αντλήσεων στο κατώτερο τμήμα του μεταλλείου.

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων της κατανομής της ποιότητας των κύριων λιθολογικών ενοτήτων σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR '89.



Εικόνα 5.1 Απόσπασμα από το χώρο εργασίας του λογισμικού Datamine Studio 3 όπου απεικονίζεται, με μορφή τρισδιάστατου μοντέλου, η δομή του κοιτάσματος Ολυμπιάδας, οι σταθμοί διεξαγωγής των γεωτρήσεων του γεωτρητικού προγράμματος 2015 καθώς και τα ίχνη των γεωτρήσεων.

Πίνακας 5.11 Τιμές RMR όπως προκύπτουν από την περιγραφή πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος.

Λιθολογία	Τιμές RMR από την περιγραφή πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος				
	Πλήθος δοκιμών	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Γνεύσιοι (συνολικά)	129	57	14.56	24	92
Μάρμαρο	183	61	13.93	23	86
Γρανιτικός Γνεύσιος και Πηγματίτης	78	53	14.47	23	81
Μεταλλοφορία Μεικτών Θειούχων	64	62	15.52	23	89
Συνολικά		59	15.03	23	92

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



Σχήμα 5.9 Κυκλικά διαγράμματα της ποιότητας της βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR '89 για κάθε κύρια λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 105

Πίνακας 5.12 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχώμαζας όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για το σύνολο των περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος.

Λιθολογία	Ποιότητα βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR '89				
	Πολύ Πτωχή (0-20)	Πτωχή (21-40)	Μέτρια (41-60)	Καλή (61-80)	Πολύ Καλή (81-100)
Γνεύσιοι (συνολικά)	-	9.99%	39.74%	39.89%	10.37%
Βιοτιτικοί Γνεύσιοι	-	10.97%	53.12%	28.78%	7.13%
Μάρμαρο	-	4.53%	27.63%	59.84%	7.99%
Γρανιτικός Γνεύσιος και Πηγματίτης	-	16.28%	30.97%	49.20%	3.56%
Μεταλλοφορία Μεικτών Θειούχων	-	2.76%	27.66%	48.71%	20.87%
Συνολικά	-	7.53%	30.89%	51.66%	9.71%

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα:

- Η πλειοψηφία των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που περιγράφηκαν αφορούν τους οριζοντες μαρμάρου. Αυτό είναι λογικό καθώς τα μάρμαρα αποτελούν τους ξενιστές της μεταλλοφορίας πλησίον της οποίας διεξάχθηκε και η πλειοψηφία των τεχνικογεωλογικών περιγραφών.
- Συνολικά η ποιότητα της βραχώμαζας στην περιοχή της μεταλλοφορίας του Ανατολικού Κοιτάσματος αλλά και πέριξ αυτής παρουσιάζει «καλή» ποιότητα σε ποσοστό 52%. Πιο συγκεκριμένα το 60% (9.71% Πολύ Καλή, 51.66% Καλή) της βραχώμαζας, όπως αυτή απεικονίζεται από τους πυρήνες των γεωτρήσεων, χαρακτηρίζεται «καλής» έως «πολύ καλής» ποιότητας. Λιγότερο από 10% (7.53% Πτωχή) της βραχώμαζας χαρακτηρίστηκε «κακής» έως «πολύ κακής» ποιότητας, ενώ το υπόλοιπο 30% της βραχώμαζας χαρακτηρίστηκε «μέτριας» ποιότητας (30.89% Μέτρια).
- Η μέση τιμή του δείκτη RMR παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της (62) στη μεταλλοφορία μεικτών θειούχων, κατά μία μόνο μονάδα υψηλότερη από αυτή των μαρμάρων (61), ενώ την ελάχιστη (53) στο σχηματισμό των γρανιτικών γνευσίων και πηγματιτών.
- Καμία εκ των τεχνικογεωλογικών ενοτήτων που περιγράφηκαν δεν ταξινομείται ως «πολύ πτωχή».

Για τον προσδιορισμό των αιτίων στα οποία οφείλεται η απομείωση της τιμής του δείκτη RMR κατασκευάστηκαν οι Πίνακας 5.13 και Πίνακας 5.14 όπου παρουσιάζονται η μέση τιμή κάθε παραμέτρου του RMR ανά λιθολογική ενότητα και ανά ποιότητα βραχώμαζας αντίστοιχα καθώς και η ποσοστιαία συμμετοχή αυτών τιμή του RMR. Σύμφωνα με τους πίνακες αυτούς:

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

- Η αντοχή του άρρηκτου βράχου (R1) φαίνεται να κατέχει σταθερή συμμετοχή στην τιμή του RMR με τους γρανιτικούς γνεύσιους και πηγματίτες να διαφοροποιούνται κατά μία μονάδα προς τα κάτω.
- Η τιμή του RQD (R2) παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένες τιμές ως προς τα μάρμαρα και τη μεταλλοφορία σε σχέση με τους γνεύσιους και τους πηγματίτες, των οποίων οι τιμές είναι μειωμένες κατά 1% και 2% αντίστοιχα.
- Η απόσταση των ασυνεχειών κυμαίνεται από 9, για τους γνεύσιους και τους πηγματίτες, έως 11 για τη μεταλλοφορία, με τα μάρμαρα να λαμβάνουν την ενδιάμεση τιμή των 10.
- Η ποιότητα των ασυνεχειών
- με τη μεγαλύτερη διακύμανση μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών. Και πάλι η μεταλλοφορία καταλαμβάνει την υψηλότερη τιμή (23) ενώ οι πηγματίτες τη χαμηλότερη (18).

Πίνακας 5.13 Μέση τιμή του δείκτη RMR '89 και των συντελεστών αυτού ανά λιθολογική ενότητα αλλά και για το σύνολο των περιγραφθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων οριοθέτησης του Ανατολικού κοιτάσματος.

Συντελεστής	Μέση τιμή και ποσοστιαία συμμετοχή									
	Βιοτιτικός Γνεύσιος και Αστριούχος Βιοτιτικός Γνεύσιος		Μάρμαρο		Γρανιτικός Γνεύσιος και Πηγματίτης		Μεταλλοφορία Μεικτών Θειούχων		Συνολικά	
R1 (IRS)	4	7%	4	7%	3	6%	4	6%	4	7%
R2 (RQD)	9	16%	10	16%	8	15%	10	16%	9	15%
R3 (απόσταση ασυνεχειών)	9	16%	10	16%	9	17%	11	18%	10	17%
R4 (ποιότητα ασυνεχειών)	19	33%	22	30%	18	34%	23	37%	21	36%
RMR*	57		61		53		62		59	

Πίνακας 5.14 Μέση τιμή συντελεστών RMR ανά κατηγορία ποιότητας βραχώμαζας

Λιθολογία	Μέση τιμή και ποσοστιαία συμμετοχή									
	Πολύ Πτωχή (0-20)		Πτωχή (21-40)		Μέτρια (41-60)		Καλή (61-80)		Πολύ Καλή (81-100)	
R1 (IRS)	-	-	1	3%	4	8%	5	7%	5	6%
R2 (RQD)	-	-	3	9%	6	12%	14	20%	17	20%
R3 (απόσταση ασυνεχειών)	-	-	5	15%	8	15%	11	16%	19	23%
R4 (ποιότητα ασυνεχειών)	-	-	8	24%	20	38%	24	35%	26	31%
RMR**	-		33		52		69		83	

\* Όλες οι τιμές έχουν υποστεί στρογγυλοποίηση.

\*\* Για τον υπολογισμό του RMR έχουν ληφθεί ξηρές συνθήκες (R5=15).

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 107



### 5.3 Σύγκριση δεδομένων χαρτογράφησης μετώπων και περιγραφής γεωτρήσεων ως προς την ποιότητα της βραχόμαζας

Από την ανάλυση και σύγκριση των δεδομένων χαρτογράφησης μετώπων και περιγραφής γεωτρήσεων ως προς την ποιότητα της βραχόμαζας, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR '89 προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Τα δεδομένα χαρτογράφησης των μετώπων των υπόγειων στοών παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία, από αυτά των περιγραφών των πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.
- Τόσο οι γνεύσιμοι όσο και τα μάρμαρα παρουσιάζουν χαμηλότερη μέση τιμή του δείκτη RMR κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων από αυτή των χαρτογραφήσεων των μετώπων. Η διαφορά αυτή, η οποία είναι επαρκής ώστε να αλλάξει και η κατηγορία ποιότητας βραχόμαζας από «μέτρια» στις γεωτρήσεις σε «καλή» στα μέτωπα, θα μπορούσε να αποδοθεί:
  - Στην τρισδιάστατη πληροφορία που είναι διαθέσιμη κατά την χαρτογράφηση των μετώπων έναντι της δισδιάστατης πληροφορίας κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων
  - Στην καλύτερη αντίληψη της μορφής και της έκτασης των τεκτονικών δομών κατά την χαρτογράφηση των μετώπων των υπόγειων στοών
  - Στην αναπόφευκτη διατάραξη στην οποία υπόκεινται οι βραχώδεις σχηματισμοί κατά τη διάτρηση και δειγματοληψία
- Από τους πίνακες κατανομής των ποσοστών συμμετοχής κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχόμαζας αλλά και από τα αντίστοιχα κυκλικά διαγράμματα, προκύπτει μία αναντιστοιχία της κατανομής μεταξύ των τιμών του RMR στις διάφορες κατηγορίες ποιότητας. Συγκεκριμένα οι τιμές των μετώπων τείνουν να συγκεντρώνονται περισσότερο στις μέσες κατηγορίες («μέτρια» και «καλή») ενώ οι αντίστοιχες τιμές στις γεωτρήσεις λαμβάνουν αξιόλογα ποσοστά, της τάξης του 5-10%, και στις ακραίες κατηγορίες («πτωχή» και «πολύ καλή»). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη λεπτομερή διάκριση των ενοτήτων ταξινόμησης, με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας, κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων σε αντίθεση με την ταξινόμηση της βραχόμαζας στα μέτωπα των υπόγειων στοών όπου τμήματα του μετώπου με τυχόν διαφορετικές ιδιότητες συνυπολογίζονται για τον υπολογισμό του δείκτη RMR.
- Ως προς τις τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι του RMR παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ των καταγραφών κατά τη χαρτογράφηση των μετώπων και κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων. Οι διαφορές αυτές άλλοτε είναι μικρές (R3, R4) και άλλοτε μεγαλύτερες (R1, R2). Συγκεκριμένα:
  - Η τιμή της αντοχής του άρρηκτου βράχου (R1) παρουσιάζεται συστηματικά υψηλότερη κατά την χαρτογράφηση των μετώπων των υπόγειων στοών από αυτή της περιγραφής των πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Η διαφορά αυτή πιθανόν οφείλεται στη μικρή διάμετρο των πυρήνων (NQ) και στη ευκολότερη θραύση τους με το γεωλογικό σφυρί σε σύγκριση με τα δείγματα από τα μέτωπα. Να σημειωθεί ότι μέχρι πρότινος δεν

- ήταν διαθέσιμα τα στοιχεία αντοχής των εργαστηριακών δοκιμών, όπως αυτά παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα.
- Ο δείκτης ποιότητας βραχώμαζας (R2) παρουσιάζει επίσης υψηλότερες τιμές κατά την χαρτογράφηση των μετώπων. Αυτό είναι εν μέρει αναμενόμενο λόγω της αδρότητας του υπολογισμού του RQD κατά τη χαρτογράφηση αλλά και στην λεπτομερέστερη διάκριση των ενοτήτων ταξινόμησης κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων, όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα. Επιπλέον, το RQD κατά την περιγραφή των πυρήνων δεν μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητο από την ποιότητα της δειγματοληψίας καθώς και τη διάμετρο του πυρήνα, στοιχεία που, κατά την άποψη της συγγραφέως, έχουν μεγαλύτερη επίδραση στον τεχνητό κερματισμό της βραχώμαζας απ' ό,τι η χρήση των εκρηκτικών για την προχώρηση των μετώπων. Αξίζει να σημειωθεί βέβαια ότι για τον υπολογισμό του RQD κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων γίνεται διάκριση των φυσικών από τις τεχνητές ασυνέχειες.
  - Μικρότερες είναι οι διαφορές που παρατηρούνται στην απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (R3) αλλά και στην ποιότητα (R4) αυτών. Οι μικρές διαφορές που παρουσιάζουν μπορούν και πάλι να δικαιολογηθούν από την διαφορά της κλίμακας παρατήρησης. Ως εκ τούτου εκτιμάται ότι η τιμή που προκύπτει από την περιγραφή των γεωτρήσεων, τόσο για την απόσταση όσο και την ποιότητα των ασυνεχειών, απεικονίζει πιο πιστά την πραγματικότητα.

#### 5.4 Εκτίμηση της ποιότητας της ζώνης μεταλλοφορίας και της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Σύγκριση δεδομένων με παλαιότερες μελέτες

Η εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών της περιοχής του κοιτάσματος απαιτεί τη γνώση των ιδιοτήτων του εξορυσσόμενου γεωυλικού καθώς επίσης και της περιβάλλουσας αυτού βραχώμαζας που θα κληθεί να υποστηρίξει το υπόγειο άνοιγμα μετά την απόληψη του μεταλλεύματος. Για το λόγο αυτό έγινε εκτίμηση της ποιότητας της βραχώμαζας, σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR '89, ενώ τα αποτελέσματα της εκτίμησης αυτής συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα με προηγούμενων μελετών. Οι περιοχές που ερευνήθηκαν αφορούν:

- Τη ζώνη της μεταλλοφορίας.
- Τη ζώνη πάχους 2m πάνω που υπέρκειται της μεταλλοφορίας.
- Τη ζώνη πάχους 10m που υπέρκειται της μεταλλοφορίας.
- Τη ζώνη πάχους 10m που υπόκειται της μεταλλοφορίας.
- Το ενδιάμεσο τμήμα ανάμεσα σε δύο μεταλλοφόρους φακούς, όπου αυτό παρουσιάζεται.

Σύμφωνα με μελέτη που διενεργήθηκε από την SRK (UK) το 1999, στα πλαίσια της μελέτης σκοπιμότητας, το ανατολικό κοίτασμα, σε αντίθεση με το δυτικό, δεν παρουσιάζει διακοπή της μεταλλοφορίας με τη

**Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα**

**Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας**

**Σελίδα 109**

μορφή ενδιάμεσης ζώνης. Σύμφωνα όμως με τις νέες γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή παρατηρείται ενδιάμεση ζώνη μικρού μήκους και πάχους περίπου 1-10m.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται η μέση τιμή του RMR καθώς και η ποσοστιαία αναλογία της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχώμαζας επί του συνόλου των καταγραφών σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης RMR για κάθε μία από τις ενότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 5.15 Σύγκριση της μέσης τιμής και της ποιότητας της βραχώμαζας, όπως αυτή προκύπτει από το σύστημα RMR' 89, του γεωερευνητικού προγράμματος 2015 και δεδομένων παλαιότερων μελετών.

Μελετώμενη ζώνη	Μέση τιμή και ποιότητα βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR'89	
	Γεωερευνητικό πρόγραμμα 2015	Δεδομένα από παλαιότερες μελέτες (SRK (UK), 1999)*
Μεταλλοφορία	63 - Καλή	60 (45) - Μέτρια
2m πάνω από τη μεταλλοφορία	62 (Καλή)	57 (43) - Μέτρια
10m πάνω από τη μεταλλοφορία	60 (Μέτρια)	60 (45) - Μέτρια
10m κάτω από τη μεταλλοφορία	59 (Μέτρια)	60 (45) - Μέτρια
Ενδιάμεση ζώνη	62 (Καλή)	-

\* Στην τιμή του RMR έχουν προστεθεί 15 μονάδες («ξηρές» συνθήκες του υπόγειου νερού) ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση. Στην παρένθεση η τιμή με βάση τη μελέτη.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.15 η μέση τιμή του δείκτη RMR παρουσιάζει μεγάλη ομοιομορφία με αποκλίσεις από 0 έως 5 μονάδες. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται στη ζώνη 2m στην οροφή της μεταλλοφορίας όπου σύμφωνα με τα νεότερα δεδομένα οι σχηματισμοί παρουσιάζουν καλή ποιότητα (RMR=62) έναντι της μέτριας ποιότητας (RMR=57) των παλαιότερων δεδομένων.

Πίνακας 5.16 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχώμαζας όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για τη ζώνη της μεταλλοφορίας και την περιβάλλουσα βραχώμαζα σύμφωνα με τα δεδομένα του τρέχοντος γεωερευνητικού προγράμματος.

Μελετώμενη ζώνη	Ποιότητα βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR'89*				
	Πολύ Πτωχή (0-20)	Πτωχή (21-40)	Μέτρια (41-60)	Καλή (61-80)	Πολύ Καλή (81-100)
Μεταλλοφορία	- (1%)	4% (22%)	33% (40%)	40% (37%)	23% (-)
2m πάνω από τη μεταλλοφορία	- (4%)	7% (11%)	23% (62%)	55% (22%)	14% (-)
10m πάνω από τη μεταλλοφορία	- (5%)	7% (19%)	29% (51%)	54% (26%)	10% (-)
10m κάτω από τη μεταλλοφορία	- (3%)	5% (18%)	31% (70%)	61% (10%)	4% (-)
Ενδιάμεση ζώνη	- (1%)	1% (17%)	29% (82%)	70% (-)	- (-)

\*Σε παρένθεση τα ποσοστά του RMR αν στην τιμή του RMR δεν υπολογιστεί η συμμετοχή των συνθηκών υπόγειου νερού για να είναι εφικτή η σύγκριση με τον Πίνακα 5.17.

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Πίνακας 5.17 Ποσοστό (%) της κάθε κατηγορίας ποιότητας βραχώμαζας όπως προκύπτει από την ταξινόμηση με το σύστημα RMR'89 για τη ζώνη της μεταλλοφορίας και την περιβάλλουσα βραχώμαζα σύμφωνα με τα δεδομένα παλαιότερων μελετών (SRK (UK), 1999).

Μελετώμενη ζώνη	Ποιότητα βραχώμαζας σύμφωνα με το σύστημα RMR'89				
	Πολύ Πτωχή (0-20)	Πτωχή (21-40)	Μέτρια (41-60)	Καλή (61-80)	Πολύ Καλή (81-100)
Μεταλλοφορία	-	20%	66%	4%	-
2m πάνω από τη μεταλλοφορία	6%	40%	34%	20%	-
10m πάνω από τη μεταλλοφορία	5%	27%	51%	17%	-
10m κάτω από τη μεταλλοφορία	-	18%	77%	5%	-
Ενδιάμεση ζώνη	-	-	-	-	-

Ως προς την κατανομή της ποιότητας της βραχώμαζας:

- Αν και όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχουν μεγάλες ομοιότητες μεταξύ των νεότερων και των παλαιότερων καταγραφών ως προς τη μέση τιμή του δείκτη RMR ανά μελετώμενη ζώνη, η κατανομή των ποσοστών ανά κατηγορία βραχώμαζας παρουσιάζει αρκετές διαφορές.
- Η ζώνη της μεταλλοφορίας ταξινομείται ως «πτωχής» προς «μέτριας» ποιότητας σύμφωνα με τα παλαιότερα δεδομένα ενώ κατά τα νεότερα δεδομένα η ποιότητα κυμαίνεται μεταξύ «μέτριας» και «καλής».
- Η υπερκείμενη της μεταλλοφορίας ζώνη πάχους 2m είναι, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.17, «πτωχής» έως «μέτριας» ποιότητας. Σύμφωνα όμως με τον Πίνακα 5.16, η βραχώμαζα ταξινομείται ως επί το πλείστον ως «μέτριας» ποιότητας. Και στις δύο περιπτώσεις περίπου 5% παρουσιάζει «πολύ πτωχή» ποιότητα ενώ το 20% περίπου «καλή» ποιότητα.
- Στη ζώνη 10m πάνω από τη μεταλλοφορία αν και το ποσοστό που αντιστοιχεί στη «μέτρια» ποιότητα βραχώμαζας ταυτίζεται στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζει μία αύξηση του ποσοστού της «πτωχής» ποιότητας στα δεδομένα των παλαιότερων μελετών έναντι της αυξημένης «καλής» ποιότητας των νεότερων δεδομένων.
- Όσον αφορά στη ζώνη 10m κάτω από τη μεταλλοφορία τα δεδομένα παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια με αποκλείσεις μικρότερες του 10%. Στη ζώνη αυτή η βραχώμαζα παρουσιάζει γενικά «μέτρια» ποιότητα ενώ λιγότερο από 20% της βραχώμαζας ταξινομείται ως «πτωχή».
- Γενικά τα παλαιότερα δεδομένα εμφανίζονται πιο συντηρητικά σε σύγκριση με τα νεότερα δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στην «πτωχή» προς «μέτρια» ποιότητα έναντι της «μέτριας» προς «καλή» που παρουσιάζεται στα νεότερα. Η διαφοροποίηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν στο Ανατολικό κοίτασμα πριν το 2015 και συνεπώς στον περιορισμένο αριθμό των δεδομένων. Δυστυχώς με βάση τα διαθέσιμα μέχρι

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

στιγμής δεδομένα δεν μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται αυτή η διαφοροποίηση στην ποιότητα της βραχώμαζας του ανατολικού κοιτάσματος.



## 6 Τεχνικογεωλογική συμπεριφορά της βραχόμαζας του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας

### 6.1 Διάκριση τεχνικογεωλογικών ενότητων βραχόμαζας

Με γνώμονα τα γεωλογικά αλλά και τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή του μεταλλείου Ολυμπιάδας, όπως αυτά αναλύθηκαν εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια, κατέστη δυνατή η διάκριση αυτών σε τεχνικογεωλογικές ενότητες βραχόμαζας με σκοπό τον μεταγενέστερο προσδιορισμό των αντιπροσωπευτικών παραμέτρων σχεδιασμού για το εύρος των τεχνικογεωλογικών συνθηκών που αναμένεται να συναντηθούν κατά την κατασκευή του έργου. Οι κύριες τεχνικογεωλογικές ενότητες που διακρίθηκαν είναι:

- **Τεχνικογεωλογική ενότητα I – Καλή / Πολύ Καλή:** Βιοτιτικοί γνεύσιοι, αστριούχοι βιοτιτικοί γνεύσιοι, μάρμαρα και πηγματίτες, υγιείς έως ελαφρά αποσαθρωμένοι με τιμές RMR > 60.
- **Τεχνικογεωλογική ενότητα II - Μέτρια:** Βιοτιτικοί γνεύσιοι, αστριούχοι βιοτιτικοί γνεύσιοι, μάρμαρα και πηγματίτες, τεμαχώδεις, μέτρια αποσαθρωμένοι ή / και εξαλλοιωμένοι. καθώς και ψαθιρές ζώνες έντονου κερματισμού με τιμές RMR = 40-60.
- **Τεχνικογεωλογική ενότητα III - Πτωχή:** Ασθενείς ζώνες που σχετίζονται με τεκτονική, ρηξιγενή δραστηριότητα ή έντονη εξαλλοίωση με παρουσία αργιλικών υλικών και τιμές, RMR = 20-40.
- **Τεχνικογεωλογική ενότητα III – Πολύ Πτωχή:** Ζώνες μικρού γενικά πάχους συσχετιζόμενες με τεκτονικές, ρηξιγενείς δομές, έντονα διατμημένες και διαταραγμένες ή έντονα εξαλλοιωμένες με σημαντική παρουσία ασθενών ορυκτών όπως άργιλος και χλωρίτης με τιμές RMR < 20.

Συγκεντρωτικά οι τεχνικογεωλογικές ενότητες βραχόμαζας που προσδιορίζονται με τα αντίστοιχα εύρη τιμών RMR δίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Τεχνικογεωλογικές ενότητες βραχόμαζας για την περιοχή του Ανατολικού κοιτάσματος του Μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Τεχνικογεωλογική ενότητα	Εύρος τιμής RMR'89
Ενότητα I – Καλή / Πολύ Καλή	>60-
Ενότητα II – Μέτρια	40 - 60
Ενότητα III – Πτωχή:	20 – 40
Ενότητα IV – Πολύ Πτωχή	< 20

Με βάση το διαχωρισμό της βραχόμαζας σε τεχνικογεωλογικές ενότητες έγινε συναξιολόγηση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και υπολογισμός των αντίστοιχων αντιπροσωπευτικών τιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2 Εύρος τιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες βραχόμαζας του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Τεχνικογεωλογική ενότητα	Περιγραφή τεχνικογεωλογικής ενότητας	Εύρος τιμής RMR'89	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_i$ (GPa)
<b>Ενότητα I – Καλή / Πολύ Καλή</b>	Βιοιτικός γνεύσιος, αστριούχος βιοιτικός γνεύσιος, μάρμαρο και πηγματίτης ιγνή έως ελαφρά αποσαθρωμένα και συμπαγής μεταλλοφορία	>60-	100	30
<b>Ενότητα II – Μέτρια</b>	Βιοιτικός γνεύσιος, αστριούχος βιοιτικός γνεύσιος, μάρμαρο και πηγματίτης, τεμαχώδη, μέτρια αποσαθρωμένοι ή / και εξαλλοιωμένοι, ψαθρές ζώνες έντονου κερματισμού καθώς και μέταλλευμα με έντονη παρουσία εγκοίλων και οξειδώσεων	40 - 60	80	30
<b>Ενότητα III – Πτωχή:</b>	Ασθενείς ζώνες που σχετίζονται με τεκτονική, ρηξιγενή δραστηριότητα ή έντονη εξαλλοίωση καθώς και εύθρυπτο μέταλλευμα που έχει επηρεαστεί από τις ρηξιγενείς δομές	20 – 40	40	20
<b>Ενότητα IV – Πολύ Πτωχή</b>	Ζώνες μικρού γενικά πάχους συσχετιζόμενες με τεκτονικές, ρηξιγενείς δομές, έντονα διατμημένες και διαταραγμένες ή έντονα εξαλλοιωμένες με σημαντική παρουσία ασθενών ορυκτών όπως άργιλος και χλωρίτης	< 20	25	15

## 6.2 Τύποι τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αποτελούν τη βραχόμαζα στην οποία θα κατασκευαστούν τα έργα υποδομής για την απόληψη του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας, όπως αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες, παρουσιάζουν υψηλή γενικά αντοχή και μέτρια έως καλή μηχανική συμπεριφορά. Ο κύριος τύπος αστοχίας της βραχόμαζας στο υπόγειο έργο πρόκειται συνεπώς να εξαρτηθεί από το πλήθος, τον προσανατολισμό και την ποιότητα των ασυνεχειών που τέμνουν το υπόγειο άνοιγμα και δύνανται να προκαλέσουν βαρυτικές καταπτώσεις ή ολισθήσεις τεμαχών.

Σύμφωνα με το διάγραμμα συμπεριφοράς της βραχόμαζας, όπως αυτό προκύπτει από τον «Οδηγό για τον γεωτεχνικό σχεδιασμό υπόγειων έργων με συμβατική μέθοδο» της ΟεGG (Πίνακας 6.3) οι αναμενόμενοι τεχνικογεωλογικοί τύποι συμπεριφοράς των σχηματισμών του μεταλλείου Ολυμπιάδας είναι:

- **Ευσταθής:** στην περίπτωση υγιούς και ελαφρά κερματισμένης βραχώμαζας, υψηλής αντοχής και με καλό αλληλοκλείδωμα των σχηματιζόμενων τεμαχών.
- **Δυνητική αστοχία βραχώδους τεμάχους, ελεγχόμενη από την παρουσία ασυνεχειών:** στην περίπτωση ελαφρά έως μέτρια κερματισμένης βραχώμαζας.
- **Κάμψη:** σε περιπτώσεις λεπτοστρωματώδους βραχώμαζας με παρουσία ασυνεχειών μεγάλου μήκους και εμμόνης (πχ. φολίδωση).
- **Αστοχία στέψης:** σε περιπτώσεις όπου ασθενής βραχώμαζα παρουσιάζεται στην στέψη του υπόγειου ανοίγματος.
- **Καταρροή εδάφους:** σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένου βράχου με πτωχό αλληλοκλείδωμα και πιθανότητα παρουσίας υγρασίας.
- **Ροή εδάφους:** σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένης ή διατμημένης βραχώμαζας με ταυτόχρονη ροή νερού.
- **Έδαφος με συχνά εναλλασσόμενα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης:** σε περιπτώσεις βραχώμαζας πολύ πτωχής ποιότητας που οφείλεται στη δράση τεκτονικών ρηξιγενών δομών ή στην εκτενή υδροθερμική εξαλλοίωση.

Η διάκριση της βραχώμαζας σε τεχνικογεωλογικές ενότητες καθώς και ο προσδιορισμός του αναμενόμενου τύπου συμπεριφοράς και αστοχίας έγινε λαμβάνοντας υπόψη υπερκείμενα πάχους 150-350m.

Πίνακας 6.3 Γενικές κατηγορίες συμπεριφοράς της βραχώμαζας (Austrian Society for Geomechanics, 2010).

Basic categories of Behaviour Types (BT)		Description of potential failure modes/mechanisms during excavation of the unsupported ground
1	Stable	Stable ground with the potential of small local gravity induced falling or sliding of blocks
2	Potential of discontinuity controlled block fall	Voluminous discontinuity controlled, gravity induced falling and sliding of blocks, occasional local shear failure on discontinuities
3	Shallow failure	Shallow stress induced failure in combination with discontinuity and gravity controlled failure
4	Voluminous stress induced failure	Stress induced failure involving large ground volumes and large deformation
5	Rock burst	Sudden and violent failure of the rock mass, caused by highly stressed brittle rocks and the rapid release of accumulated strain energy
6	Buckling	Buckling of rocks with a narrowly spaced discontinuity set, frequently associated with shear failure
7	Crown failure	Voluminous overbreaks in the crown with progressive shear failure
8	Raveling ground	Raveling of dry or moist, intensely fractured, poorly interlocked rocks or soil with low cohesion
9	Flowing ground	Flow of intensely fractured, poorly interlocked rocks or soil with high water content

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
 Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 115

10	Swelling ground	Time dependent volume increase of the ground caused by physical-chemical reaction of ground and water in combination with stress relief
11	Ground with frequently changing deformation characteristics	Combination of several behaviours with strong local variations of stresses and deformations over longer sections due to heterogeneous ground (i.e. in heterogeneous fault zones; block-in-matrix rock, tectonic melanges)

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.4) παρουσιάζεται η ταξινόμηση των τεχνικογεωλογικών ενότητων στις οποίες έχει διακριθεί η βραχόμαζα του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας, το εύρος της τιμής RMR καθώς και ο αναμενόμενος τύπος συμπεριφοράς για κάθε μία από τις ενότητες αυτές. Συγκεκριμένα:

- **Ενότητα I – Καλή / Πολύ Καλή:** Η βραχόμαζα της ενότητας αυτής λόγω της υψηλής γενικά αντοχής, του ελαφρού κερματισμού και της καλής ποιότητας των ασυνεχειών δύναται να συμπεριφερθεί ευσταθώς, με τοπικές μόνο καταπτώσεις τεμαχών ή ολισθήσεις κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών ή της τομής αυτών.
- **Ενότητα II – Μέτρια:** Η ενότητα αυτή αποτελείται κυρίως από μέτρια κερματισμένη και εξαλλοιωμένη βραχόμαζα γνευσίου, μαρμάρου ή πηγματίτη καθώς και από ζώνες έντονου κερματισμού με καλό όμως αλληλοκλείδωμα των τεμαχών. Τέτοιου είδους βραχόμαζες δύναται να προκαλέσουν βαρυτικές καταπτώσεις τεμαχών ή ολισθήσεις κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών ή της τομής αυτών. Αυτός ο τύπος αστοχίας αποτελεί τον κυριότερο και πιο συχνά συναντώμενο τύπο αστοχίας για τις βραχόμαζες που κατατάσσονται στην ενότητα II. Επιπλέον όμως, σε περιπτώσεις όπου έντονα λεπτοστρωματώδης γνεύσιος ή μάρμαρο απαντάται στην περιοχή της στέψης του υπόγειου ανοίγματος δύναται να προκύψει κάμψη των στρωμάτων και διατμητική αστοχία αυτών κατά μήκος των επιφανειών της σχιστότητας / φολίδωσης. Τέλος, σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένης βραχόμαζας, συνήθως μαρμάρου με σημαντική παρουσία αργιλικών ορυκτών κατά μήκος των ασυνεχειών, που βρίσκεται κοντά σε μεγάλες ρηξιγενείς δομές, όπως το Ανατολικό ρήγμα, μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες μεγάλου όγκου (αστοχία στέψης) και καταρροή εδάφους.
- **Ενότητα III – Πτωχή:** Στην ενότητα αυτή εντάσσονται βραχόμαζες με πτωχή γενικά ποιότητα είτε λόγω του έντονου κερματισμού είτε λόγω της έντονης εξαλλοίωσης. Οι τύποι συμπεριφοράς της βραχόμαζας δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από αυτούς της ενότητας II, παρουσιάζουν όμως μεγαλύτερη ένταση και έκταση. Στην ενότητα αυτή πιο συχνά αναμένεται να συναντηθούν οι τύποι «αστοχία στέψης» και «καταρροή εδάφους».
- **Ενότητα IV – Πολύ Πτωχή:** Η ενότητα αυτή σχετίζεται με περιοχές που έχουν επηρεαστεί έντονα από τον τεκτονισμό στην περιοχή παρουσιάζοντάς πολύ πτωχή ποιότητα βραχόμαζας με έντονο κερματισμό ή διάτμηση και έντονη παρουσία ορυκτών εξαλλοίωσης, όπως καολίνης. Οι βραχόμαζες αυτές δύναται να παρουσιάσουν «ροή» ή «καταρροή εδάφους», έως και

συνδυασμό διάφορων τύπων συμπεριφοράς με έντονες τοπικές διακυμάνσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων, όταν η βραχώμαζα παρουσιάζει ετερογένεια.

Πίνακας 6.4 Τύποι συμπεριφοράς της ανυποστήρικτης διατομής για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας.

Τεχνικογεωλογική ενότητα	Περιγραφή τεχνικογεωλογικής ενότητας	Εύρος τιμής RMR'89	Κατηγορία τύπου συμπεριφοράς	Περιγραφή πιθανού τύπου / μηχανισμού αστοχίας κατά τη διάρκεια εκσκαφής ανυποστήρικτης διατομής
<b>Ενότητα I – Καλή / Πολύ Καλή</b>	Βιοιτιτικός γνεύσιος, αστριούχος βιοιτιτικός γνεύσιος, μάρμαρο και πηγματίτης ιγυή έως ελαφρά αποσαθρωμένα και συμπαγής μεταλλοφορία	>60	Ευσταθής	Ευσταθής βραχώμαζα με δυνατότητα παρουσίας μικρών, τοπικών , βαρυτικών καταπτώσεων ή ολισθήσεων
			Δυνητική αστοχία βραχώδους τεμάχους ελεγχόμενη από την παρουσία ασυνεχειών	Μεγάλου όγκου βαρυτικές αστοχίες ελεγχόμενες από την παρουσία ασυνεχειών, ενίοτε με παρουσία τοπικών διατμητικών αστοχιών κατά μήκος των ασυνεχειών
<b>Ενότητα II – Μέτρια</b>	Βιοιτιτικός γνεύσιος, αστριούχος βιοιτιτικός γνεύσιος, μάρμαρο και πηγματίτης, τεμαχώδη, μέτρια αποσαθρωμένοι ή / και εξαλλοιωμένοι, ψαθρές ζώνες έντονου κερματισμού καθώς και μετάλλευμα με έντονη παρουσία εγκοίλων και οξειδώσεων	40 - 60	Δυνητική αστοχία βραχώδους τεμάχους ελεγχόμενη από την παρουσία ασυνεχειών	Μεγάλου όγκου βαρυτικές αστοχίες ελεγχόμενες από την παρουσία ασυνεχειών, ενίοτε με παρουσία τοπικών διατμητικών αστοχιών κατά μήκος των ασυνεχειών
			Κάμψη	Κάμψη βράχου υπό την παρουσία πολύ πυκνού συστήματος ασυνεχειών, συχνά σχετιζόμενο με διατμητικές αστοχίες
			Αστοχία στέψης	Αστοχίες μεγάλου όγκου στη οροφή με προοδευτικές διατμητικές αστοχίες
			Καταρροή εδάφους	Καταρροή ξηρής ή υγρής, έντονα κερματισμένης βραχώμαζας με πτωχό αλληλοκλείδωμα μεταξύ των τεμαχών ή εδάφους με μικρή συνοχή
<b>Ενότητα III – Πτωχή:</b>	Ασθενείς ζώνες που σχετίζονται με τεκτονική, ρηξιγενή δραστηριότητα ή	20 – 40	Κάμψη	Κάμψη βράχου υπό την παρουσία πολύ πυκνού συστήματος ασυνεχειών, συχνά σχετιζόμενο με διατμητικές αστοχίες

Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
 Σχολή Θετικών Επιστημών - Τμήμα Γεωλογίας – Τομέας Γεωλογίας

Σελίδα 117



	έντονη εξαλλοίωση καθώς και εύθρυπτο μετάλλευμα που έχει επηρεαστεί από τις ρηξιγενείς δομές		Αστοχία στέψης	Αστοχίες μεγάλου όγκου στη οροφή με προοδευτικές διατμητικές αστοχίες
			Καταρροή εδάφους	Καταρροή ξηρής ή υγρής, έντονα κερματισμένης βραχόμαζας με πτωχό αλληλοκλείδωμα μεταξύ των τεμαχών ή εδάφους με μικρή συνοχή
<b>Ενότητα IV – Πολύ Πτωχή</b>	Ζώνες σχετιζόμενες με τεκτονικές, ρηξιγενείς δομές, έντονα διατμημένες και διαταραγμένες ή έντονα εξαλλοιωμένες με σημαντική παρουσία ασθενών ορυκτών όπως άργιλος και χλωρίτης	< 20	Καταρροή εδάφους	Καταρροή ξηρής ή υγρής, έντονα κερματισμένης βραχόμαζας με πτωχό αλληλοκλείδωμα μεταξύ των τεμαχών ή εδάφους με μικρή συνοχή
			Ροή εδάφους	Ροή έντονα κερματισμένης βραχόμαζας ή εδάφους με πτωχό αλληλοκλείδωμα των τεμαχών και έντονη παρουσία νερού
			Έδαφος με συχνά εναλλασσόμενα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης	Συνδυασμός διάφορων τύπων συμπεριφοράς με έντονες τοπικές διακυμάνσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων σε μεγάλο μήκος του υπόγειου ανοίγματος λόγω της ετερογένειας τη βραχόμαζας (π.χ. ετερογενείς ρηξιγενείς ζώνες, τεκτονικά mélange)

## 7 Συμπεράσματα και Προτάσεις

### 7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική. Εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά και η ποιότητα τόσο του άρρηκτου βράχου όσο και της βραχόμαζας. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στηρίχθηκαν σε μια σειρά κατηγοριοποιήσεων των δεδομένων σε τεχνικογεωλογικές ενότητες με κριτήρια το λιθολογικό τύπο και την ήδη υπάρχουσα διάκριση των δεδομένων. Επιπλέον εξετάστηκε η ποιότητα της βραχόμαζας και σε ζώνες περιμετρικά της μεταλλοφορίας.

Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο στάδιο των αναλύσεων, και με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του άρρηκτου βράχου, εξετάστηκε η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των γεωλογικών σχηματισμών. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε 278 συνολικά δείγματα γνευσίου, μαρμάρου και μεταλλοφορίας μεικτών θειούχων η μέση τιμή της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας των σχηματισμών παρουσιάζει μικρές σχετικά διαφορές, με τους γνεύσιους να παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές (97 MPa, 48 GPa) και τη μεταλλοφορία τις χαμηλότερες (67 MPa, 28 GPa). Τα μάρμαρα λαμβάνουν ενδιάμεσες τιμές (84 MPa, 28 GPa), αλλά και τη μικρότερη τυπική απόκλιση, λόγω της μεγαλύτερης ομοιογένειας του σχηματισμού.

Για τη διερεύνηση της ποιότητας της βραχόμαζας, η οποία πρώτα διακρίθηκε σε τεχνικογεωλογικές ενότητες ανάλογα με το λιθολογικό τύπο, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης RMR'89. Η ανάλυση έγινε ξεχωριστά για τα δεδομένα που προέρχονται από τις χαρτογραφήσεις των μετώπων των υπόγειων στοών και τα δεδομένα περιγραφών των πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις η ποιότητα των μετώπων των υπόγειων στοών ταξινομείται από «πτωχή» έως «καλή» με τη μέση τιμή του RMR να καταδεικνύει «καλή» ποιότητα βραχόμαζας στο σύνολο των χαρτογραφηθέντων μετώπων. Συγκεκριμένα σχεδόν το 80% (4.90% Πολύ Καλή, 73.10% Καλή) της βραχομάζας χαρακτηρίζεται καλής έως πολύ καλής ποιότητας. Λιγότερο από 1% (0.79% Πτωχή) της βραχομάζας χαρακτηρίστηκε κακής έως πολύ κακής ποιότητας, ενώ το υπόλοιπο 20% της βραχόμαζας χαρακτηρίστηκε μέτριας ποιότητας (21.22% Μέτρια).

Ως προς την ποιότητα της βραχόμαζας, όπως αυτή προκύπτει από την περιγραφή των πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, εκτιμήθηκε ότι αυτή παρουσιάζεται «καλή» σε ποσοστό 52%. Πιο συγκεκριμένα το 60% (9.71% Πολύ Καλή, 51.66% Καλή) της βραχομάζας, όπως αυτή όπως αυτή απεικονίζεται από τους πυρήνες των γεωτρήσεων, χαρακτηρίζεται «καλής» έως «πολύ καλής» ποιότητας. Λιγότερο από 10% (7.53% Πτωχή) της βραχομάζας χαρακτηρίστηκε «κακής» έως «πολύ κακής» ποιότητας, ενώ το υπόλοιπο 30% της βραχόμαζας χαρακτηρίστηκε «μέτριας» ποιότητας (30.89% Μέτρια).

Από τη σύγκριση μεταξύ των παραπάνω δεδομένων προκύπτουν αποκλίσεις τόσο στην ποιότητα της βραχόμαζας όσο και στην ομοιομορφία των δεδομένων. Συγκεκριμένα τα δεδομένα που προκύπτουν από τις χαρτογραφήσεις μετώπων παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία και υψηλότερες γενικά τιμές από αυτές των δεδομένων που προκύπτουν από την περιγραφή των γεωτρήσεων. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη λεπτομερέστερη διάκριση των ενοτήτων ταξινόμησης, με βάση τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας, κατά την περιγραφή των γεωτρήσεων σε αντίθεση με την ταξινόμηση της βραχόμαζας στα μέτωπα των υπόγειων στοών όπου τμήματα του μετώπου με τυχόν διαφορετικές ιδιότητες συνυπολογίζονται για τον υπολογισμό του δείκτη RMR.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η ποιότητα της βραχόμαζας που περιβάλλει το μεταλλοφόρο σώμα, ανεξάρτητα από τη λιθολογία, και η οποία θα κληθεί να υποστηρίξει τη στοά μετά την απόληψη του μεταλλεύματος. Σ' αυτή τη φάση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την περιγραφή των γεωτρήσεων του γεωερευνητικού προγράμματος 2015 τα οποία και διακρίθηκαν με βάση την απόσταση τους από τη ζώνη μεταλλοφορίας σε τέσσερις κατηγορίες, τις ζώνες 2m και 10m στο άνω τέμαχος της μεταλλοφορίας, τη ζώνη 10m στο κάτω τέμαχος της μεταλλοφορίας καθώς και την ίδια τη ζώνη μεταλλοφορίας. Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των δεδομένων αυτών με παλαιότερα δεδομένα, όπως αυτά προκύπτουν από μελέτες που διενεργήθηκαν για λογαριασμό της TVX Hellas S.A. (1996-1997).

Γενικά τα παλαιότερα δεδομένα εμφανίζονται πιο συντηρητικά σε σύγκριση με τα νεότερα δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στην «πτωχή» προς «μέτρια» ποιότητα έναντι της «μέτριας» προς «καλή» που παρουσιάζεται στα νεότερα. Η διαφοροποίηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό γεωτρήσεων που διανοίχτηκαν στο Ανατολικό κοίτασμα πριν το 2015 και συνεπώς στον περιορισμένο αριθμό των δεδομένων.

Έπειτα, η βραχόμαζα διακρίθηκε σε τεχνικογεωλογικές ενότητες, για κάθε μία από τις οποίες έγινε εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) και του μέτρου ελαστικότητας ( $E_i$ ). Τέλος, προσδιορίστηκαν οι αναμενόμενοι τύποι συμπεριφοράς και αστοχίας κατά την διάνοιξη των υπόγειων στοών. Σύμφωνα με τις αναλύσεις αυτές η ευστάθεια της βραχόμαζας στο υπόγειο έργο φαίνεται να εξαρτάται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από αστοχίες βαρυτικού τύπου. Συγκεκριμένα, οι βραχόμαζες καλύτερης ποιότητας αναμένεται να παρουσιάσουν ευσταθή συμπεριφορά ή παρουσία τοπικών αστοχιών με τη μορφή καταπτώσεων ή ολισθήσεων. Με την απομείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας, είτε λόγω τεκτονικής καταπόνησης είτε εξ' αιτίας της δράσης των υδροθερμικών ρευστών, αστοχίες δύνανται να προκληθούν με τη μορφή κάμψης των λεπτοστρωματωδών σχηματισμών, καταπτώσεων μεγάλου όγκου από την οροφή, καταρροής ή και ροής εδάφους. Σε πολύ ιδιαίτερες περιπτώσεις, που αποτελούν εξαίρεση για την περιοχή του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας, τασικές αστοχίες με παρουσία συγκλίσεων και παραμορφώσεων δύνανται να παρουσιαστούν.

## 7.2 Προτάσεις

Η παρούσα έρευνα διαπίστωσε την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης με σκοπό την πληρέστερη κατανόηση της αναμενόμενης τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας. Συνεπώς κρίνονται αναγκαία:

- Η διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών για τις διάφορες τεχνικογεωλογικές ενότητες του Ανατολικού κοιτάσματος με σκοπό την επαλήθευση των τιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου.
- Η διεξαγωγή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων σε όλη την έκταση του κοιτάσματος και η τεχνικογεωλογική περιγραφή των πυρήνων με στόχο την ισοκαταταμημένη χωρικά γεωτεχνική πληροφορία.
- Η κατασκευή του τεχνικογεωλογικού μοντέλου ποιότητας της βραχώμαζας με σκοπό την οικονομικότερη αλλά, κυρίως, την ασφαλέστερη απόληψη του μεταλλεύματος.
- Η αντιστοίχιση της ποιότητας της βραχώμαζας και του μηχανισμού αστοχίας με κατάλληλες διατομές άμεσης υποστήριξης.

## Περίληψη

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης εκπονήθηκε με σκοπό την περιγραφή και εκτίμηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών του Ανατολικού κοιτάσματος του μεταλλείου Ολυμπιάδας στη ΒΑ Χαλκιδική.

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα από περισσότερα από 900 χαρτογραφηθέντα μέτωπα υπόγειων στοών και 2.000m περιγραφηθέντων πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Επιπλέον, παλαιότερα δεδομένα αντλήθηκαν από μελέτες που διεξήχθησαν για λογαριασμό της TVX Hellas S.A., ενώ ο προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής και μέτρου ελαστικότητας στηρίχθηκε κυρίως σε δεδομένα παλαιότερων γεωερευνητικών προγραμμάτων. Τέλος διεξήχθησαν συγκρίσεις για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ των δεδομένων που προέκυψαν από χαρτογραφήσεις υπόγειων μετώπων και πυρήνων γεωτρήσεων αλλά και μεταξύ δεδομένων που προέρχονται από την παρούσα και από προγενέστερες φάσεις λειτουργίας του μεταλλείου.

Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε, η παρούσα διατριβή εξετάζει το Ανατολικό κοίτασμα του μεταλλείου Ολυμπιάδας, το μικρότερο εκ των δύο μεταλλοφόρων σωμάτων της Ολυμπιάδας το οποίο βυθίζεται για 600m περίπου προς τα ΝΔ με γωνία κλίσης 25-30°. Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας είναι ένα τεκτονικά ελεγχόμενο, στρωματόμορφο κοίτασμα αντικατάστασης μεικτών θειούχων που φιλοξενείται εντός του κατώτερου οριζοντα των μαρμάρων της ενότητας Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής Μάζας. Η μεταλλοφορία αποτελείται κυρίως από τα ορυκτά γαληνίτης, σφαλερίτης και αρσενοπυρίτης, ενώ τα πετρώματα που φιλοξενούν και περιβάλλουν τα μεταλλοφόρα σώματα αποτελούνται κυρίως από μάρμαρα, βιοτιτικούς γνευσίους, και πηγματίτες.

Η τεχνικογεωλογική περιγραφή της βραχόμαζας και η εκτίμηση της ποιότητάς της αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τον οικονομικό και πάνω απ' όλα ασφαλή σχεδιασμό και κατασκευή των υπόγειων έργων. Ιδιαίτερα στα υπόγεια μεταλλευτικά έργα όπου η βραχόμαζα καταπονείται επανειλημμένα και το πεδίο των τάσεων υπόκειται σε συνεχείς μεταβολές λόγω της εξέλιξης των εργασιών, η γνώση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών και η αναγνώριση των ενδεχόμενων κινδύνων κρίνεται απαραίτητη.

Για την τεχνικογεωλογική περιγραφή της βραχόμαζας και την εκτίμηση της ποιότητας των γεωλογικών σχηματισμών του μεταλλείου Ολυμπιάδας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης RMR, όπως αυτό προτάθηκε από τον Bieniawski το 1989. Η επιλογή του συστήματος έγινε κυρίως με βάση την πληθώρα των δεδομένων από ταξινομήσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο κατά την χαρτογράφηση των μετώπων των υπόγειων στοών όσο και κατά την περιγραφή των πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων. Επιπλέον, με τη χρήση του συστήματος RMR κατέστη δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ταξινομήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά την παρούσα φάση λειτουργίας του μεταλλείου (2012-2015) με παλαιότερα δεδομένα, όπως αυτά προκύπτουν από μελέτες που διενεργήθηκαν για λογαριασμό της TVX Hellas S.A. (1996-1997). Στα πλαίσια της διερεύνησης της ποιότητας της βραχόμαζας πραγματοποιήθηκε διάκριση σε τεχνικογεωλογικές ενότητες με βάση το λιθολογικό τύπο αλλά και την

---

### Διατριβή Ειδίκευσης Ε. Ι. Βουγιούκα



απόσταση από τη ζώνη της μεταλλοφορίας. Σκοπός των διακρίσεων αυτών είναι η διερεύνηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε λιθολογικής ενότητας και των πιθανών κινδύνων που τυχόν εγκυμονεί καθώς και η διερεύνηση της ποιότητας της βραχόμαζας στις περιοχές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, στην περιοχή δηλαδή της μεταλλοφορίας αλλά προπάντων στις περιοχές που θα αποτελέσουν τα τοιχώματα των στοών μετά την απόληψη του μεταλλεύματος.

Έπειτα διενεργήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των ταξινομήσεων από τις χαρτογραφήσεις των υπόγειων στοών και τις περιγραφές των πυρήνων δειγματοληπτικών γεωτρήσεων καθώς επίσης και μεταξύ των ταξινομήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά την παρούσα φάση λειτουργίας του μεταλλείου και των παλαιότερων δεδομένων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Τέλος η βραχόμαζα διακρίθηκε σε τεχνικογεωλογικές ενότητες, με βάση την ποιότητα της βραχόμαζας, όπως αυτή αντικατοπτρίζεται στην τιμή του RMR. Για κάθε μία από τις κατηγορίες βραχόμαζας πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) και του μέτρου ελαστικότητας ( $E_i$ ), ενώ στη συνέχεια προσδιορίστηκαν και οι αναμενόμενοι τύποι συμπεριφοράς και αστοχίας κατά την διάνοιξη των υπόγειων στοών.

## Summary

The present thesis aims in the description and assessment of the engineering geological conditions of the East Orebody of the Olympias Mine in NE Chalkidiki.

Available data from more than 900 mapped underground faces and 2.000m geotechnically logged drill holes, along with old data derived from reports conducted for TVX Hellas S.A., were used for the analysis. The determination of strength and deformability parameters was based entirely on old project data in the area. Moreover, comparisons between underground mapping data and dill hole logging data and between recent and older data were conducted in order to determine the relation between them.

More specifically, as mentioned above, the present thesis deals with the East Orebody of Olympias Mine, the smallest of the two orebodies of Olympias which dips shallowly (25-30°) to the SW for about 600m. Olympias deposit is a structure controlled, massive sulphide, carbonate replacement deposit hosted in the lower marble horizon of the Kerdyllia unit of the Serbomacedonian Massif. The mineralization is mainly consisting of galena, sphalerite and arsenopyrite hosted and surrounded by marbles and biotite gneisses or pegmatites respectively.

The engineering geological description of the rockmass and the assessment of the rockmass quality are two critical parameters for the safe and economic design and construction of underground structures. Especially in underground mines where rockmass is continuously disturbed and the stress field is continually altered due to mine induced field stress variation, the understanding of the engineering geological conditions and the identification of the possible hazards is necessary.

In the present thesis the RMR classification system, after Bieniawski 1989, is used for the engineering geological description of the rockmass and the assessment of the quality of the geological formations of the Olympias Mine. The selection of the classification system was based mainly on the availability of the classifications data from underground face mapping or diamond drill core logging. Furthermore, the use of the RMR classification system allowed the comparison between the current data (2012-2015) and data derived from reports to TVX Hellas S.A. (1996-1997).

For the description of the rockmass and the assessment of the rockmass quality the Bieniawski's RMR'89 classification system was used. The selection was based mainly on the adequacy of underground mapping and drill hole logging data. Moreover, the use of RMR allowed the comparison between resent classification data and older data derived from reports to TVX Hellas S.A. (1996-1997).

For the rockmass quality assessment the orebody has been separated in geotechnical domains based on the lithological type and the distance from the ore zone. These two categorizations aim in the identification of the characteristics and possible weaknesses describing each lithological unit and the investigation of the most interesting areas (the ore zone and the future roof and floor of the adits) respectively.

## Summary

---

Furthermore a comparison has been made between the classification data of the underground face mapping and the diamond drill core logging. Also comparison has been made between the current data and data derived from reports to TVX Hellas S.A., as mentioned above.

In the end the rockmass was divided in geotechnical types based on the rockmass quality reflected in the RMR value. For each one of the rockmass geotechnical types the uniaxial compressive strength ( $\sigma_{ci}$ ), the Young's modulus ( $E_i$ ) and then the expected behavior and failure types were assessed.

## Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Anonymous, 2001. *Engineering geology field manual*. s.l.:s.n.

ASTM, 2003.

Austrian Society for Geomechanics, 2010. *Guidline for the geotechnical design of underground structures with conventional excavation*, Salzburg: Austrian Society for Geomechanics.

Barton, N. & Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mecanics*, Τόμος 10, pp. 1-54.

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Τόμος 6, pp. 189-236.

Bell, F. G., 2007. *Engineering geology (Second Ed.)*. s.l.:Elselvier Ltd..

Bieniawski, Z., 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley Interscience Publication.

Brady, B. & Brown, E., 2005. *Rock mechanics for underground mining*. s.l.:Kluwer Academic Publishers.

Deere, D., 1968. Chapter 1: Geological considerations. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, pp. 1-20.

Deere, D. & Deere, D., 1988. The Rock Quality Designation (RQD) Index in practice. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984*, pp. 91-101.

Deere, D. U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes.. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), pp. 17-22.

Dempers, G., Seymour, C. & Harris, M., 2010. *Optimising geotechnical logging to accurately represent the geotechnical environment*. Sydney, s.n.

Einstein, H., Steiner, W. & Baecher, G., 1979. Assessment of empirical design methods for tunnels in rock. *RETC 1979*, pp. 683-705.

Forward, P., 2011. The Geology and metallogenesis of the Kassandra Mines Deposits, Northern Greece.

Goodman & Shi, 1985. *Block theory and its application to rock engineering*. New Jersey: Prentice-Hall Inc..

Grimstad, E. & Barton, N., 1993. Updating of the Q-system for NMT. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*.

ψψ

Hoek, E., 2007. *Practical rock engineering*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner/books>

Hoek, E. & Brown, E., 1988. The Hoek-Brown failure criteria - a 1998 update. *15th Canadian Rock Mass Symposium*, pp. 31-38.

Hoek, E. & Brown, E. T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 1013-1035.

Hoek, E., Carter, T. & Diederichs, M., 2013. Quantification of the Geological Strength Index. *Proceedings of the 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, 23-26 June, San Francisco, CA, USA.

Hoek, E., Kaiser, P. & Bawden, W., 1998. *Support of underground excavations in hard rock*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [http://www.mirarco.org/wp-content/uploads/mirarco\\_books/Support\\_of\\_Underground\\_Excavations\\_in\\_Hard\\_Rock.pdf](http://www.mirarco.org/wp-content/uploads/mirarco_books/Support_of_Underground_Excavations_in_Hard_Rock.pdf)

Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Τόμος 57(2), pp. 151-160.

Hoek, E., Wood, D. & Shah, S., 1992. *A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses*. Chester, UK, s.n.

ISRM, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics*, Τόμος 18, pp. 85-110.

Kalogeropoulos, S. και συν., 1989b. Genesis of the Olympias carbonate-hosted Pb-Zn (Au, Ag) sulphide ore deposit, eastern Chalkidiki, northern Greece. *Economic Geology*, Τόμος 84, pp. 1210-1234.

Kochel, F., Mollat, H. & Walther, H., 1971. Geologie des Serbo-Mazedonischen Massivs und seines mesozoischen Rahmens (Nord-Griechenland). *Geol. Jahrb*, Τόμος 89, pp. 529-551.

Kockel, F. και συν., 1978b. Φύλλο Σταυρός, Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000, s.l.: I.G.M.E..

Kockel, F., Mollat, H. & Walther, H., 1977. Erläuterungen zur Geologischen Karte der Chalkidiki und angrenzender Gebiete 1:100.000 (Nord-Griechenland). *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*.

Kockel, F. και συν., 1978a. Φύλλο Σταυρός, Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000, s.l.: I.G.M.E..



Kockel, F. & Walther, H., 1965. Die Strimonlinie als Grenze zwischen Serbo-Mazedonoschen und Rilad-Rhodope Massiv in Ost-Mazedonien. *Geol. Jb.*, Τόμος 83, pp. 575-602.

Kockel, F. & Walther, H., 1968. Zur Geologischen entwicklung des Sudli-chen Serbomazedonischen massivs. *Bulg. Ak. Sc. Bull. Geol*, Τόμος KH XVII, pp. 133-142.

Marinos, P. & Hoek, E., 2000. *GSI: A Geologically friendly tool for rock mass*. Melbourne, s.n.

Mathis, J., 2001. *Reinforcement Design for Excavation in Rock*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.edumine.com/courses/online-courses/reinforcement-design-for-excavation-in-rock/>

Mathis, J., 2015. *Geotechnical data 2 - rock fabric and structures*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<http://www.edumine.com/xutility/html/template.htm?category=xcourse&course=xlog2&session=doc0100.xml&level=text&lang=EN>

Merciel, J., 1966. Etude geologique des zones internes des Hellenides en Macedoine centrale. *Ann. Geol. des Pays Hell*, Τόμος 20, pp. 1-793.

Milne, D., 2009. *Rock mass classification for mine design*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.edumine.com/courses/online-courses/rock-mass-classification-for-mine-design/>

Nebel, M., Hutchinson, R. & Zartman, R., 1991. Metamorphism and polygenesis of the Madem Lakkos polymetallic sulphide deposit, Chalkidiki, Greece. *Econ. Geol.*, Τόμος 86, pp. 81-105.

NGI, 2013. *Using the Q-system. Rock mass classification and support design*, s.l.: NGI.

Pakalnis, R., 2015. *Underground Mining Methods and Equipment*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.edumine.com/courses/online-courses/underground-mining-methods-and-equipment/>

Pakalnis, R., 2005. *Design for Underground Metal Mines 1 - Design Parameters*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.edumine.com/courses/online-courses/design-for-underground-metal-mines-1-design-parameters/>

Palmstrom, A. & Broch, E., 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*, Τόμος 21, pp. 575-593.

Palmstrom, A. & Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Τόμος 16, pp. 115-131.

Razali, N. M. & Wah, Y. B., 2011. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analysis*, 2(1), pp. 21-33.

Rhys, D., 2013. *Olympias deposit: Initial assessment of deposit geology and structural controls*, s.l.: Consultants Report from Panterra Geoservices Inc. to Eldorado Gold Corp..

Sevastakis, X., 1998. *Mavres Petres geotechnical model*, s.l.: TVX Hellas.

Shapiro, S. & Wilk, M., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3 and 4), pp. 591-611.

SRK (UK), 1999. *Conveyor decline, geotechnical information for contractors bid document*, s.l.: s.n.

Stille, H. & Palmstrom, A., 2003. Classification as a tool in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Τόμος 18, pp. 331-345.

Tzamos, S. & Sofianos, A., 2007. A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Τόμος 44, pp. 477-495.

Unknown, 2008. RMR and Q setting records straight. *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 26-29.

## Ελληνική Βιβλιογραφία

Δημητριάδης, Σ., 1974. *Πετρολογική μελέτη των μιγματιτικών γνευσίων και αμφιβολιτών των περιοχών Ρεντίνας - Ασπροβάλτας, Σταυρού - Ολυμπιάδος*, Θεσσαλονίκη: Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Ελευθεριάδης, Γ. & Κορωναίος, Α., 2006. *Σημειώσεις ρετρολογίας πυριγενών πετρωμάτων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Α.Π.Θ..

Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. & Γεωτεχνικό Τμήμα Σκουριών, 2015. *Αξιολόγηση γεωλογικών - γεωτεχνικών δεδομένων γεώτρησης (OLD001) προπορείας σήραγγας Μαντέμ Λάκκου - Ολυμπιάδας*, s.l.: s.n.

Ελληνικός Χρυσός, Α. Ε., 2011. *Μεταλλευτικές εγκαταστάσεις Ολυμπιάδας. Τεχνική μελέτη εκμετάλλευσης*, s.l.: s.n.

Ζαφείρης, Χ., Παπάγγελος, Ι. Α. & Πλακογιαννάκης, Κ. Ε., 2001. *Χαλκιδική, η θάλασσα, ορεινή Χαλκιδική, ιστορία, το Άγιον Όρος*. s.l.:Ζαρζώνη.

Καββαδάς, Μ., 2005. *Σημειώσεις σχεδιασμού υπόγειων έργων*. s.l.:Εκδόσεις Ε.Μ.Π..

Κασώλη - Φουρναράκη, Α., 1981. *Συμβολή στην ορυκτολογική και πετρολογική μελέτη αμφιβολιτικών πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής Μάζας*, Θεσσαλονίκη: Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν., 2002. *Τεχνική γεωλογία*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Μαρίνος, Β., 2007. *Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων*, s.l.: Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαρίνος, Π., 1993. Επί της εφαρμογής της Γεωμηχανικής ταξινόμησης Bieniawski σε ασθενείς και ετερογενείς βραχώμαζες. Ειδική αναφορά στην περίπτωση του Πινδικού φλύσχη. *Ειδική έκδοση ΕΜΠ προς τιμή Καθηγητή Α. Πανάγου*, pp. 549-566.

Μιχαηλίδου, Α., 2005. Μορφοτεκτονική ανάλυση με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (G.I.S.) και μικροτεκτονική των ρηγμάτων Στρατωνίου - Βαρβάρας αι Γοματίου (Ανατολική Χαλκιδική). *Διατριβή Ειδίκευσης*, p. 155.

Μουντράκης, Δ., 2010. *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Μπενάρδος, Α., n.d. *Βασικές μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης*. [Ηλεκτρονικό] Available at: [http://www.metal.ntua.gr/uploads/4321/1150/4\\_Basikes\\_methodoi-A.pdf](http://www.metal.ntua.gr/uploads/4321/1150/4_Basikes_methodoi-A.pdf)

Οικονομίδης, Δ. Ι., 2000. Συμβολή της τηλεπισκόπησης και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (G.I.S.) στην γεωλογική, κοιτασματολογική και περιβαλλοντική έρευνα της Β.Α. Χαλκιδικής. *Διδακτορική Διατριβή*, p. 136.

Ομικρον-Κάππα Μελετητική Α.Ε., 2008. *Τεχνική μελέτη κατασκευής κύριας σήραγγας προσπέλασης και μεταφοράς Ολυμπιάδας - Μντέμ Λάκκου*, s.l.: s.n.

Παυλίδης, Σ. και συν., 2010. *Σεισμοτεκτονική έρευνα στην περιοχή των σχεδιαζόμενων νέων εγκαταστάσεων της εταιρίας "Ελληνικός Χρυσός Α.Ε." παρά τα ρήγματα Στρατωνίου, Γοματίου - Μει. Παναγίας και Ολυμπιάδος (Αν. Χαλκιδική)*, Θεσσαλονίκη: s.n.