



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστολίθου
περιοχής Τριπόλεως με μηχανικά μέσα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστολίθου
περιοχής Τριπόλεως με μηχανικά μέσα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Δ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις __/__/2011

Θ.Μιχαλακόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ,

Γ.Παναγιώτου, Καθηγητής ΕΜΠ,

Α.Μπενάρδος, Λέκτορας ΕΜΠ,

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευχαριστίες

Έπειτα από πέντε μήνες εντατικής δουλειάς πέτυχα τον τελευταίο μου στόχο ως φοιτητής. Αυτός δεν είναι άλλος από την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Προτού ξεκινήσει η παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Επίκουρο Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Μιχαλακόπουλο Θεόδωρο, ο οποίος δέχτηκε να αναλάβει την διπλωματική μου εργασία αλλά και για την πολύ μεγάλη και σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διάρκεια συγγραφής της, δίνοντας μου πολύτιμο και χρήσιμο βιβλιογραφικό υλικό και αφιερώνοντάς μου μεγάλο μέρος του χρόνου του.

Επίσης και ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην κα. Μπασάνου Μαρία Δρ. Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργών για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της δυνατότητας εξόρυξης ασβεστολίθου με μηχανικά μέσα. Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν δείγματα από την περιοχή της Τρίπολης και συγκεκριμένα από το λατομείο με την επωνυμία Καγιάννης Χρήστος & Σια Ο.Ε. που βρίσκεται στο 3^ο χιλιόμετρο Τρίπολης – Καλαμάτας κοντά στο χωριό Βαλτέτσι.

Η δυνατότητα να εξορυχθεί ένα πέτρωμα με μηχανικά μέσα καθορίζεται από την εξορυξιμότητα του, δηλαδή την ευκολία ή την δυσκολία που παρουσιάζει στην εξόρυξή του. Εκφράζεται με οικονομικά και επιχειρησιακά χαρακτηριστικά της εξόρυξης όπως η απόδοση της μηχανικής εξόρυξης, η ειδική κατανάλωση ενέργειας εκσκαφής και η φθορά των κοπτικών εργαλείων.

Μεταξύ των παραμέτρων που την επηρεάζουν, οι ιδιότητες της μάζας του προς εξόρυξη πετρώματος είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτίμησή της. Προκειμένου να γίνει μια πλήρης περιγραφή των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του πετρώματος εκτελούνται μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές. Τέτοιες δοκιμές όπως η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, η δοκιμή σκληρότητας Shore, η δοκιμή κοπής και η δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar είναι δυνατό να δώσουν μια προκαταρκτική εκτίμηση της εξορυξιμότητας ενός πετρώματος.

Η φθορά των κοπτικών εργαλείων έχει σημαντική επίδραση στην εξορυξιμότητα των πετρωμάτων. Λόγω της σταδιακής απομάκρυνσης του μετάλλου από το κοπτικό και της μεταβολής της γεωμετρίας του, το κοπτικό πρέπει να αναπτύξει πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις για το ίδιο αποτέλεσμα με συνέπεια την μείωση της απόδοσης του εξορυκτικού εξοπλισμού και την αύξηση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας εκσκαφής.

Καθοριστικό κριτήριο βελτιστοποίησης της οικονομικότητας της μηχανικής εξόρυξης πετρωμάτων είναι η ελαχιστοποίηση της ειδικής ενέργειας εκσκαφής. Ειδική ενέργεια εκσκαφής ονομάζεται η ενέργεια που απαιτείται για την απόσπαση από τη φυσική του θέση πεπερασμένου όγκου πετρώματος. Προκειμένου να γίνει παραμετρική ανάλυση για την διαστασιολόγηση και την πρόβλεψη της απόδοσης μηχανήματος απαιτείται ενδελεχής γνώση των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κοπή. Τέλος, η ειδική ενέργεια εκσκαφής είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων σε μια κεφαλή ή ένα τύμπανο κοπής, το βάθος της κοπής κ.ά.

ABSTRACT

Subject of this thesis is the investigation of the excavability of limestone with mechanical means. For this purpose limestone samples have been prepared from the Kagiannis Christos quarry which is located near the 3rd kilometer of the Tripoli – Kalamata highway near the village Valtetsi, and an extensive laboratory investigation has been performed.

The excavability of a rock by mechanical means is a measure of the ease and energy requirements for the breakage and excavation of rock from its original, insitu location. Excavability can be expressed on the basis of financial and operational characteristics of the excavation as is the performance of the excavating machine, the specific energy required for the excavation and the wear of the cutting tools.

Among the parameters that influence excavability, the rock properties are of decisive importance for its estimate. In order to make a complete description of the mechanical and physical properties of the intact rock, a series of laboratory tests have been performed. With tests such as the uniaxial compressive strength test, Brazilian

test, Shore hardness test, core cuttability test and Cerchar abrasiveness test it is possible to determine a preliminary estimate of the excavability of a rock.

The wear of cutting tools has an important effect on the excavability of a rock. Due to the progressive removal of metal chips from the cutting edge and the change of its geometry, the cutting tool is expected to develop higher forces for the same result, reducing the performance of the excavating equipment and increasing the specific energy consumption of the excavation.

The lowest specific energy criterion is fundamental in the optimization process of an excavation project. Specific energy is defined as the energy required to excavate a unit volume of rock. In order to conduct parametric analysis to predict the performance of a given machine or define the machine required to achieve a certain advance – production rate, a thorough knowledge of the forces developing during rock cutting is required. Finally, specific energy is a function of many parameters such as spacing, depth of cut etc.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά για την Μεταλλευτική.....	1
1.2 Λατομεία αδρανών υλικών.....	2
1.2.1 Γενικά.....	2
1.2.2 Οφέλη από τη δραστηριότητα των λατομείων.....	3
1.2.3 Αδρανή υλικά.....	3
1.3 Μέθοδοι εξόρυξης πετρωμάτων.....	5
1.4 Αντικειμενικός σκοπός.....	6
1.5 Οργάνωση της διπλωματικής.....	7
1.6 Οριοθέτηση της διπλωματικής εργασίας.....	9
2. Γεωλογικά στοιχεία.....	10
2.1 Ιζηματογενή πετρώματα.....	10
2.2 Διαδικασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων.....	10
2.3 Γεωλογική περιγραφή και χαρακτηριστικά ασβεστόλιθων.....	11
2.4 Γεωτεκτονική θέση της ευρύτερης περιοχής λατομείου.....	15
2.5 Λιθοστρωματογραφική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής λατομείου.....	17
2.6 Γεωλογία της περιοχής του λατομείου.....	18
2.7 Κλιματολογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής.....	18

3. Εξορυξιμότητα των πετρωμάτων.....	20
3.1 Γενικά.....	20
3.2 Η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων από οικονομική και επιχειρησιακή σκοπιά.....	20
3.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την εξορυξιμότητα των πετρωμάτων.....	23
3.3.1 Χαρακτηριστικά του προς εξόρυξη πετρώματος.....	23
3.3.2 Χαρακτηριστικά του εξορυγμένου πετρώματος.....	27
3.4 Εκτίμηση της εξορυξιμότητας των πετρωμάτων.....	28
4. Μηχανική της κοπής των πετρωμάτων.....	31
4.1 Εισαγωγή.....	31
4.2 Συμπεριφορά του πετρώματος στην κοπή.....	32
4.3 Κοπτικά εργαλεία.....	36
4.4 Κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.....	40
4.5 Σχέσεις που αφορούν τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.....	43
4.5.1 Ταχύτητα κοπής.....	46
4.5.2 Εμπρόσθια γωνία κλίσης.....	46
4.5.3 Οπίσθια γωνία ελευθερίας.....	46
4.5.4 Απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κοπτικών άκρων.....	47
4.6 Σχεδιασμός κοπτικής κεφαλής ή τυμπάνου.....	48
4.7 Κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου υποβοηθούμενα από εκτοξευτήρες νερού.....	49
4.8. Υλικά κατασκευής κοπτικών συρόμενου τύπου και φθορά αυτών.....	50
4.8.1 Καρβίδιο του βολφραμίου.....	51
4.8.2 Οι μηχανισμοί φθοράς.....	53

5. Θεωρίες κοπής των πετρωμάτων.....	59
5.1 Γενικά.....	59
5.2 Θεωρίες κοπής υπό συνθήκες εφελκυσμού.....	60
5.2.1 Η θεωρία του Merchant.....	60
5.2.2 Η θεωρία του Evans.....	63
5.2.3 Η θεωρία του Nishimatsu.....	64
5.3. Η κατά Nishimatsu διαδικασία της αστοχίας κατά την κοπή πετρωμάτων.....	67
6. Εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων.....	70
6.1 Γενικά.....	70
6.2 Προδιαγραφές εκτέλεσης εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής.....	71
6.3 Δειγματοληψία πετρωμάτων και διαμόρφωση δοκιμίων.....	72
6.4 Φυσικές παράμετροι.....	77
6.5 Προσδιορισμός ξηρής πυκνότητας.....	78
6.5.1 Γενικά.....	78
6.5.2 Εκτέλεση μετρήσεων.....	80
6.5.3 Υπολογισμοί.....	80
6.6 Προσδιορισμός της ταχύτητας των υπερήχων διαμέσου βραχωδών δειγμάτων.....	82
6.6.1 Γενικά.....	82
6.6.2 Σκοπός της δοκιμής.....	86
6.6.3 Περιγραφή δοκιμής.....	86
6.6.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Υπολογισμοί.....	88
6.7 Προσδιορισμός σκληρότητας με τη χρήση του σκληροσκόπιο Shore.....	89
6.7.1 Γενικά.....	89

6.7.2 Σκοπός της δοκιμής.....	91
6.7.3 Πειραματική συσκευή.....	91
6.7.4 Περιγραφή δοκιμής.....	93
6.7.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Υπολογισμοί.....	95
6.8 Δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar.....	97
6.8.1 Γενικά.....	97
6.8.2 Σκοπός της δοκιμής.....	98
6.8.3 Πειραματική συσκευή.....	98
6.8.4 Περιγραφή δοκιμής.....	100
6.8.5 Αποτελέσματα - Υπολογισμοί.....	102
6.9 Προσδιορισμός της αντοχής των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη.....	103
6.9.1 Μηχανική αντοχή.....	103
6.9.2 Τρόπος θραύσης.....	107
6.9.3 Τύποι θραύσεως βραχώδους υλικού – Κριτήρια θραύσης.....	112
6.9.4 Περιγραφή δοκιμής.....	113
6.9.5 Αποτελέσματα - Υπολογισμοί.....	119
6.10 Έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη.....	120
6.10.1 Σκοπός της δοκιμής.....	120
6.10.2 Θεωρία της δοκιμής.....	121
6.10.3 Επίδραση των παραμέτρων.....	122
6.10.4 Πειραματική συσκευή.....	123
6.10.5 Περιγραφή δοκιμής.....	124
6.10.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Υπολογισμοί.....	126

7. Ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	129
7.1 Γενικά.....	129
7.2 Περιορισμοί στη χρήση μηχανικών κοπτικών άκρων σε σχέση με την ενέργεια.....	130
7.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	133
7.3.1 Ιδιότητες του πετρώματος.....	133
7.3.2 Παράμετροι που σχετίζονται με τα κοπτικά άκρα.....	136
7.4 Υπολογισμός ειδικής ενέργειας.....	142
7.4.1 Από τις θεωρίες κοπής.....	142
7.4.2 Από εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζονται με ιδιότητες του πετρώματος.....	143
7.4.3 Από εργαστηριακές δοκιμές κοπής.....	144
7.5 Εφαρμογές της ειδικής ενέργειας εκσκαφής.....	146
7.5.1 Σύγκριση αποδοτικότητας διαφορετικών μεθόδων εξόρυξης.....	146
7.5.2 Πρόβλεψη της απόδοσης μηχανής όρυξης.....	146
8. Εργαστηριακή δοκιμή κοπής για τον προσδιορισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας.....	147
8.1 Γενικά.....	147
8.2 Εργαστηριακή διάταξη.....	149
8.2.1 Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη.....	149
8.3 Πειραματική διαδικασία.....	152
8.3.1 Προετοιμασία - Ρυθμίσεις στην πλάνη.....	152
8.3.2 Ρυθμίσεις δυναμόμετρου και προγράμματος.....	152
8.3.3 Εκκίνηση πλάνης.....	152
8.3.4 Έναρξη παλινδρόμησης κεφαλής.....	153

8.3.5 Τερματισμός παλινδρόμησης κεφαλής.....	153
8.3.6 Καταγραφή αποτελεσμάτων.....	153
8.4 Επεξεργασία μετρήσεων.....	154
9. Εξόρυξη με χρήση Surface Miner.....	157
9.1 Γενικά.....	157
9.2 Συγκρότηση του Surface Miner.....	158
9.2.1 Υποδομή.....	159
9.2.2 Άνω δομή.....	159
9.2.3 Κοπτικό τύμπανο.....	160
9.2.4 Πρωτεύουσα μεταφορική ταινία.....	162
9.2.5 Βραχίονας του μηχανήματος.....	162
9.3 Τύποι Surface Miner.....	163
9.4 Διαδικασία εξόρυξης ασβεστόλιθου	164
9.5 Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	167
9.6. Διαγράμματα λειτουργίας του Surface Miner.....	169
9.7 Παραγωγική ικανότητα της μεθόδου.....	171
9.8 Τεχνικά προβλήματα από τη χρήση του Surface Miner.....	173
9.9 Περιβαλλοντικά προβλήματα.....	174
10. Συμπεράσματα.....	175
10.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα διαχρονικά αποτελέσματα.....	175
10.2. Διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστόλιθου περιοχής Τριπόλεως.....	179

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών.....	182
Συγκεντρωτικός πίνακας διαχρονικών αποτελεσμάτων Εργαστηρίου.....	183
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	184
Παράρτημα 1 (Φωτογραφίες δοκιμών).....	186
Παράρτημα 2 (Αποτελέσματα Cerchar).....	194
Παράρτημα 3 (Δοκιμή UCS).....	202
Παράρτημα 4 (Δοκιμή Brazilian).....	205
Παράρτημα 5 (Δοκιμή κοπής).....	212

Λίστα πινάκων

Πίνακας 4.1. Καταλληλότητα κοπτικών εργαλείων βάσει της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική.....	39
Πίνακας 4.2. Θεωρίες κοπής πετρωμάτων.....	39
Πίνακας 4.3. Σύμβολα και ορισμοί σε κοπτικά συρόμενου τύπου.....	44
Πίνακας 6.1. Σπουδαιότερες εκτελούμενες εργαστηριακές δοκιμές Βραχομηχανικής.....	71
Πίνακας 6.2. Ενδεικτικές τιμές ξηρής πυκνότητας για διάφορα πετρώματα.....	79
Πίνακας 6.3. Διακυμάνσεις των V_p και V_s για διάφορα πετρώματα.....	84
Πίνακας 6.4. Ταξινόμηση ακέραίου πετρώματος ανάλογα με τη σκληρότητα του.....	91
Πίνακας 6.5. Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον δείκτη φθοροποιού ικανότητας...102	
Πίνακας 6.6. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.....	104
Πίνακας 6.7. Εύρος τιμών παραμέτρων αντοχής από πετρώματα της Ελλάδας.....	106
Πίνακας 6.8. Χαρακτηρισμός ψαθυρότητας-πλαστικότητας πετρώματος.....	128
Πίνακας 8.1. Μάζες των δοκιμίων μετά τις διαδοχικές κοπές.....	155
Πίνακας 8.2. Διαφορά μάζας των δοκιμίων μετά τις διαδοχικές κοπές.....	155
Πίνακας 8.3. Όγκος εκσκαφής μετά τις διαδοχικές κοπές.....	156
Πίνακας 8.4. Συνολικό έργο WF_z	156
Πίνακας 8.5. Δείκτες ειδικής ενέργειας εκσκαφής.....	156
Πίνακας 8.6. Συντελεστής κοπής.....	156
Πίνακας 9.1. Χαρακτηριστικά του Surface Miner 2500 SM.....	163
Πίνακας 10.1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών.....	182
Πίνακας 10.2. Συγκεντρωτικός πίνακας διαχρονικών αποτελεσμάτων Εργαστηρίου.....	183

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1. Χάρτης της Ελλάδας με τα λατομεία αδρανών υλικών.....	4
Σχήμα 1.2. Περιοχή λατομείου δειγματοληψίας.....	7
Σχήμα 2.1. Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας.....	16
Σχήμα 3.1. Διάγραμμα γεωτεχνικής ταξινόμησης της μάζας του πετρώματος.....	24
Σχήμα 3.2. Ταξινόμηση της μάζας πετρώματος για μηχανική εξόρυξη.....	29
Σχήμα 3.3. Δυνατότητα εξόρυξης των πετρωμάτων με διάφορους τύπους μηχανημάτων, συναρτήσει της ταχύτητας του σεισμικού κύματος.....	29
Σχήμα 4.1. Τύποι αποσύνθεσης του πετρώματος κατά Deketh.....	33
Σχήμα 4.2. Διακύμανση της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου.....	34
Σχήμα 4.3. Μεταβολή ψαθυρότητας-πλαστικότητας πετρώματος συναρτήσει του εντατικού πεδίου.....	35
Σχήμα 4.4. Ανάλυση των δυνάμεων κατά την κοπή των πετρωμάτων.....	36
Σχήμα 4.5. Δυνάμεις που προκαλούν θραύση του πετρώματος στα κοπτικά.....	37
Σχήμα 4.6. Κοπτικά συρόμενου τύπου.....	37
Σχήμα 4.7. Κοπτικά τύπου δίσκου.....	38
Σχήμα 4.8. Τύποι κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου.....	40
Σχήμα 4.9. Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά Fowell.....	41
Σχήμα 4.10. Οι συνιστώσες της δύναμης που ασκείται σε κοπτικό άκρο.....	42
Σχήμα 4.11. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δυνάμεις κοπτικών άκρων.....	43
Σχήμα 4.12. Τυπικές σχέσεις για κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου κατά Fowell.....	45
Σχήμα 4.13. Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων κατά Fowell.....	47
Σχήμα 4.14. Παράγοντες που επηρεάζονται από την περιεκτικότητα σε κοβάλτιο.....	52

Σχήμα 4.15. Σκληρότητα καρβιδίου του βολφραμίου και χαλαζία συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	54
Σχήμα 4.16. Διαγράμματα δύναμης κοπής και κάθετης δύναμης συναρτήσει του πλάτους φθοράς του κοπτικού και της απόστασης.....	56
Σχήμα 4.17. Διαδοχικές φάσεις δημιουργίας επίπεδης επιφάνειας φθοράς σε κοπτικό εργαλείο τύπου σφήνας.....	57
Σχήμα 4.18. Επίδραση της επίπεδης επιφάνειας φθοράς του κοπτικού εργαλείου στην δύναμη κοπής.....	58
Σχήμα 5.1. Η κατανομή των τάσεων και των δυνάμεων κοπής στη θεωρία του Merchant.....	62
Σχήμα 5.2. Κατανομή τάσεων και δυνάμεις κοπής στη θεωρία του Evans για τη κοπή γαιανθράκων.....	64
Σχήμα 5.3. Κατανομή τάσεων και δυνάμεις κοπής στη θεωρία του Nishimatsu για την κοπή πετρωμάτων.....	65
Σχήμα 5.4. Η επίδραση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης στον παράγοντα διανομής των τάσεων κατά Nishimatsu.....	66
Σχήμα 5.5. Η φαινόμενη γωνία τριβής ως συνάρτηση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης του κοπτικού κατά Nishimatsu.....	67
Σχήμα 5.6. Μηχανισμός αστοχίας πετρώματος κατά την κοπή κατά Nishimatsu.....	68
Σχήμα 5.7. Παράδειγμα αυξομείωσης της δύναμης κοπής και της κάθετης δύναμης κατά την κοπή.....	69
Σχήμα 6.1. Διαγραμματική απεικόνιση των τριών φάσεων βραχώδους υλικού.....	78
Σχήμα 6.2. Σχέση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με την ξηρή πυκνότητα για ασβεστολιθικά πετρώματα του Ελληνικού χώρου.....	79
Σχήμα 6.3. Κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος	83

Σχήμα 6.4. Σχέση ταχυτήτων P και S κυμάτων για διάφορα πετρώματα.....	84
Σχήμα 6.5. Σχέση ξηρής πυκνότητας και ταχυτήτων υπερήχων για ασβεστολιθικά πετρώματα του Ελληνικού χώρου.....	85
Σχήμα 6.6. Σχέση πορώδους και ταχύτητας υπερήχων για διάφορα πετρώματα του Ελληνικού χώρου.....	85
Σχήμα 6.7. Σχέση ξηρής πυκνότητας και σκληρότητας για ασβεστολιθικά πετρώματα.....	90
Σχήμα 6.8. Σχέση ταχυτήτων υπερήχων και σκληρότητας για ασβεστολιθικά πετρώματα.....	90
Σχήμα 6.9 Σκληροσκόπιο Shore (μοντέλο D).....	92
Σχήμα 6.10. Τομή του αδαμάντινου άκρου του σκληροσκόπιου Shore.....	93
Σχήμα 6.11. Μεγέθυνση της τομής του κοπτικού άκρου πριν και μετά την δοκιμή Cerchar.....	98
Σχήμα 6.12. Πειραματική συσκευή δοκιμής φθοροποιού ικανότητας πετρώματος Cerchar.....	99
Σχήμα 6.13. Μεταβολή της αντοχής με το πορώδες.....	105
Σχήμα 6.14. Σχέση κύριων τάσεων κατά τη θραύση ασβεστολιθικών πετρωμάτων....	107
Σχήμα 6.15. Το πλήρες διάγραμμα τάσεως - βραχύνσεως.....	108
Σχήμα 6.16. Σχετικές μεταβολές στη δομή του δοκιμίου.....	108
Σχήμα 6.17. Σύγκριση του διαγράμματος τάσεως-βραχύνσεως ενός πετρώματος σε συνήθη και άκαμπτη μηχανή.....	110
Σχήμα 6.18. Διάγραμμα τάσεως-βραχύνσεως ασβεστόλιθου σε άκαμπτη μηχανή....	111
Σχήμα 6.19. Κύριοι τύποι θραύσης πετρωμάτων.....	112
Σχήμα 6.20. Τυπικό διάγραμμα τάσεως - παραμορφώσεων πετρώματος.....	117

Σχήμα 6.21. Γραφικός προσδιορισμός του μέτρου Ελαστικότητας.....	118
Σχήμα 6.22. Μεταβολή της εφελκυστικής και της θλιπτικής τάσεως κατά μήκος της διαμέτρου.....	121
Σχήμα 6.23. Οι σιαγώνες τοποθέτησης του δοκιμίου για την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	124
Σχήμα 7.1 Διάγραμμα Hood & Roxbourough.....	131
Σχήμα 7.2. Επίδραση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Barendsen.....	134
Σχήμα 7.3. Επίδραση της απόστασης των ασυνεχειών στην ειδική ενέργεια εκσκαφής ιλυολιθικών πετρωμάτων κατά McFeat-Smith.....	135
Σχήμα 7.4. Επίδραση της διεύθυνσης των ασυνεχειών ιλυολιθικών πετρωμάτων στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά McFeat-Smith.....	136
Σχήμα 7.5. Ειδική ενέργεια εκσκαφής συναρτήσει του βάθους κοπής κατά Fowell....	137
Σχήμα 7.6. Αλληλεπίδραση διαδοχικών κοπτικών κατά Poole.....	138
Σχήμα 7.7. Εντατικό πεδίο (κύρια τάση) υπό τη δράση ενός και δύο κομβίων.....	138
Σχήμα 7.8. Ανάπτυξη ρωγμής μεταξύ διαδοχικών κοπτικών κατά Liu.....	139
Σχήμα 7.9. Επίδραση της απόστασης διαδοχικών κοπτικών εργαλείων στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Roxborough.....	140
Σχήμα 7.10. Αύξηση της ειδικής ενέργειας εκσκαφής μετά την πρώτη κοπή λόγω μη αλληλεπίδρασης διαδοχικών κοπτικών κατά Fowell.....	140
Σχήμα 7.11. Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	141
Σχήμα 7.12. Παράμετροι κοπής που επηρεάζουν την ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	142
Σχήμα 7.13. Συσχέτιση αντοχής σε θλίψη με ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	144
Σχήμα 7.14. Γενική διάταξη δοκιμής κοπής.....	145

Σχήμα 7.15. Πρόβλεψη της απόδοσης Surface Miner από την ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Kramadibrata.....	146
Σχήμα 8.1. Προδιαγραφές εργαστηριακής δοκιμής κοπής για τον υπολογισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής κατά Fowell.....	148
Σχήμα 8.2. Κινήσεις κοπτικού και επιφάνειας κατεργασίας σε ένα πλήρη κύκλο εργασίας πλανίσματος.....	150
Σχήμα 8.3. Βασικά μέρη ταχυπλάνης.....	151
Σχήμα 8.4. Πρόγραμμα Dynoware για καταγραφή και επεξεργασία του σήματος...153	
Σχήμα 8.5. Διάγραμμα δυνάμεων κατά την κοπή συναρτήσει του χρόνου.....	154
Σχήμα 9.1. Χρήσεις του Surface Miner.....	158
Σχήμα 9.2. Κοπτικό άκρο κατά τη διάρκεια της κοπής.....	161
Σχήμα 9.3. Συγκρότηση του Surface Miner.....	163
Σχήμα 9.4. Περιοχή εκμετάλλευσης.....	164
Σχήμα 9.5. Εξόρυξη στρωματοειδούς κοιτάσματος με ελαφριά κλίση.....	167
Σχήμα 9.6. Διαδικασία κατασκευής ράμπας.....	168
Σχήμα 9.7. Δυνατότητα εξόρυξης πετρωμάτων ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων.....	170
Σχήμα 9.8. Σχέση οικονομικότητας και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.....	170
Σχήμα 9.9. Απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος.....	171
Σχήμα 9.10. Διάγραμμα ενεργού χρόνου κοπής συνάρτηση του μήκους εργασίας.....	172
Σχήμα 10.1. Ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	176
Σχήμα 10.2. Φθοροποιός ικανότητα για ακίδες σκληρότητας 55.....	176
Σχήμα 10.3. Φθοροποιός ικανότητα για ακίδες σκληρότητας 40.....	176
Σχήμα 10.4. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.....	177

Σχήμα 10.5. Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη.....	177
Σχήμα 10.6. Σκληρότητα Shore.....	178
Σχήμα 10.7. Δείκτης πλαστικότητας Shore.....	178
Σχήμα 10.8. Διαμήκης ταχύτητα V_p	178
Σχήμα 10.9. Δυνατότητα εξόρυξης πετρωμάτων ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων.....	179
Σχήμα 10.10. Σχέση οικονομικότητας και αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.....	180
Σχήμα 10.11. Απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος.....	181

Λίστα φωτογραφιών

Φώτο 6.1. Καροταρία του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων για τη διαμόρφωση κυλινδρικών δοκιμίων πετρώματος.....	75
Φώτο 6.2. Μηχάνημα κοπής δοκιμίων με αδαμαντοτροχό.....	76
Φώτο 6.3. Σύστημα συσκευής μέτρησης ταχύτητας υπερήχων.....	87
Φώτο 6.4. Λεπτομέρεια μετρητικού οργάνου σκληροσκόπιου Shore.....	92
Φώτο 6.5. Σκληροσκόπιο Shore του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων.....	94
Φώτο 6.6. Πειραματική συσκευή δοκιμής Cerchar του Εργαστηρίου Εξόρυξης.....	99
Φώτο 6.7. Κοπτικά εργαλεία (ακίδες) με κωνική ακμή 90°.....	100
Φώτο 6.8. Δοκιμή Cerchar.....	100
Φώτο 6.9. Αύλακες στην επιφάνεια του δοκιμίου Tb_02 έπειτα από την πραγματοποίηση της δοκιμής.....	101
Φώτο 6.10. Το δοκίμιο Ta_01 τοποθετημένο στη μηχανή μονοαξονικής θλίψης.....	114
Φώτο 6.11. Όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων.....	116
Φώτο 6.12. Το δοκίμιο Tb_03 τοποθετημένο στη μηχανή αντιδιαμετρικής θλίψης....	125
Φώτο 8.1. Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων....	151
Φώτο 9.1. Surface Miner.....	159
Φώτο 9.2. Surface Miner σε λειτουργία.....	160
Φώτο 9.3. Κοπτικό τύμπανο του Surface Miner.....	161
Φώτο 9.4. Διαδικασία φόρτωσης.....	165
Φώτο Π.1.1. Κάτοψη δοκιμίου Ta_01 όπου είναι εμφανές το μήκος του.....	187
Φώτο Π.1.2. Κάτοψη δοκιμίου Ta_01 όπου είναι εμφανής η διάμετρος του.....	187
Φώτο Π.1.3. Πλευρική όψη δοκιμίου Ta_01.....	188

Φώτο Π.1.4. Λεπτομέρεια ορυκτών δοκιμίου Ta_01.....	188
Φώτο Π.1.5. Κάτοψη δοκιμίου Ta_02 όπου είναι εμφανές το μήκος του.....	189
Φώτο Π.1.6. Κάτοψη δοκιμίου Ta_02 όπου είναι εμφανής η διάμετρος του.....	189
Φώτο Π.1.7. Πλευρική όψη δοκιμίου Ta_02.....	190
Φώτο Π.1.8. Λεπτομέρεια ορυκτών δοκιμίου Ta_02.....	190
Φώτο Π.1.9. Κάτοψη δοκιμίου Ta_03 όπου είναι εμφανές το μήκος του.....	191
Φώτο Π.1.10. Κάτοψη δοκιμίου Ta_03 όπου είναι εμφανής η διάμετρος του.....	191
Φώτο Π.1.11. Πλευρική όψη δοκιμίου Ta_03.....	192
Φώτο Π.1.12. Λεπτομέρεια δοκιμίου Ta_03.....	192
Φώτο Π.1.13. Κάτοψη δοκιμίου Ta_04 όπου είναι εμφανές το μήκος του.....	193
Φώτο Π.1.14. Κάτοψη δοκιμίου Ta_05 όπου είναι εμφανές το μήκος του.....	193
Φώτο Π.2.1. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1.....	199
Φώτο Π.2.2. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2.....	199
Φώτο Π.2.3. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1.....	200
Φώτο Π.2.4. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2.....	200
Φώτο Π.2.5. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1.....	200
Φώτο Π.2.6. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2.....	201
Φώτο Π.2.7. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1.....	201
Φώτο Π.2.8. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2.....	201
Φώτο Π.3.1. Το δοκίμιο Ta_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής.....	203
Φώτο Π.3.2. Το δοκίμιο Ta_02 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής.....	204
Φώτο Π.4.1. Κάτοψη των δοκιμίων όπου είναι εμφανείς οι διάμετροι τους.....	206
Φώτο Π.4.2. Κάτοψη των δοκιμίων όπου είναι εμφανή τα μήκη τους.....	206
Φώτο Π.4.3. Το δοκίμιο Tb_01 bts_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής.....	207

Φώτο Π.4.4. Το δοκίμιο Tb_02 bts_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής.....	208
Φώτο Π.4.5. Το δοκίμιο Tb_02 bts_02 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής.....	209
Φώτο Π.4.6. Το δοκίμιο Tb_03 bts_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής.....	210
Φώτο Π.4.7. Το δοκίμιο Tb_03 bts_02 που δεν αστόχησε.....	211
Φώτο Π.5.1. Πρώτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04.....	213
Φώτο Π.5.2. Δεύτερη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04.....	214
Φώτο Π.5.3. Τρίτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04.....	215
Φώτο Π.5.4. Τέταρτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04.....	216
Φώτο Π.5.5. Πρώτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05.....	217
Φώτο Π.5.6. Δεύτερη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05.....	218
Φώτο Π.5.7. Τρίτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05.....	219
Φώτο Π.5.8. Τέταρτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05.....	220

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά για την Μεταλλευτική

Μεταλλευτική είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα της εξόρυξης ορυκτών και πετρωμάτων για χρήση στην οικοδομή, την εξαγωγή μετάλλων και την παραγωγή αντικειμένων γενικότερα.

Ως επιστήμη, η μεταλλευτική αποτελεί τμήμα των επιστημών μηχανικού και συμπεριλαμβάνει την μεταλλευτική έρευνα, την εκμετάλλευση μεταλλείων, ορυχείων και λατομείων, και τέλος, το κλείσιμο των μεταλλευτικών/λατομικών χώρων μετά την εξάντληση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων.

Τα μεταλλεύματα ως ορυκτές ύλες είναι φυσικές πλουτοπαραγωγικές πηγές. Ο συμμετοχή μόνο του μεταλλευτικού τομέα στο Α.Ε.Π. είναι κατά μέσο όρο της τελευταίας 10ετίας 1,8%. Αν ληφθεί υπόψη και ο μεταποιητικός τομέας, στον οποίο περιλαμβάνονται οι μεταλλουργίες, καθώς και οι επιχειρήσεις κατεργασίας, τυποποίησης και παραγωγής ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων από ορυκτές πρώτες ύλες, υπολογίζεται ότι το παραπάνω ποσοστό συμμετοχής στο Α.Ε.Π. υπερδιπλασιάζεται.

Η Ελλάδα είναι σημαντική παραγωγός βασικών μετάλλων όπως νικέλιο, βωξίτη, μεικτά θειούχα και χρωμίτη. Παράγει επίσης αρκετά βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα όπως μπετονίτη, βαρύτη, κιμωλία, αστρίους, γύψο, περλίτη, χαλαζία και αργίλους. Ένα μεγάλο μέρος αυτών εξάγεται, κύρια σε επεξεργασμένη μορφή.

Ο μεταλλευτικός κλάδος, είναι ισχυρά εξωστρεφής, αφού οι εξαγωγές πρωτογενών και επεξεργασμένων υλικών αντιπροσωπεύουν πάνω από το 65% των πωλήσεών του, ενώ παράλληλα εταιρείες του κλάδου κατέχουν ηγετικές θέσεις στην ευρωπαϊκή αλλά και στην διεθνή αγορά σε προϊόντα όπως βωξίτης, αλουμίνα, αλουμίνιο, νικέλιο, καυστική μαγνησία, μπετονίτης, περλίτης, ελαφρόπετρα και μάρμαρα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η Ελλάδα, σε παγκόσμια κλίμακα, είναι η

μοναδική χώρα παραγωγής χουντίτη, πρώτη χώρα παραγωγής περλίτη, δεύτερη χώρα παραγωγής ελαφρόπετρας και μπεντονίτη καθώς και πρώτη στην εξαγωγή μαγνησίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η εκμετάλλευση του ορυκτού πλούτου της χώρας εκτός των άλλων συμβάλλει σημαντικά στην περιφερειακή ανάπτυξη, αφού η εξορυκτική βιομηχανία δραστηριοποιείται κυρίως στην περιφέρεια, απασχολεί σημαντικό αριθμό εργαζομένων από τις τοπικές κοινωνίες και αναπτύσσει διάφορες άλλες εργασίες στην περιφέρεια, υποστηρικτικές του παραγωγικού έργου της μεταλλείας. Μόνο στη Μακεδονία και Θράκη λειτουργούν 11 μεταλλεία. Στον τομέα των μεταλλευμάτων απασχολούνται ετήσια περίπου 3.000 άτομα.

1.2. Λατομεία αδρανών υλικών

1.2.1. Γενικά

Τα λατομεία αδρανών υλικών αποτελούν ένα σημαντικό κλάδο της εξορυκτικής δραστηριότητας παγκοσμίως αλλά και της χώρας μας. Καλύπτουν το 45-60%, περίπου της μεταλλευτικής δραστηριότητας στην Ελλάδα από πλευράς παραγόμενων ποσοτήτων. Πρόκειται για μικρές έως μεσαίου μεγέθους εκμεταλλεύσεις.

Στην Ελλάδα λειτουργούν λατομεία αδρανών υλικών είτε εντός των ορίων θεσμοθετημένων λατομικών περιοχών (όπου αυτό έχει καταστεί δυνατόν να γίνει) είτε σε μεμονωμένες θέσεις. Πριν την περίοδο της ύφεσης, είχαμε ένα συνολικό όγκο παραγωγής πάνω από 100 εκατομμύρια τόνους αδρανών (όλων των κλασμάτων συνολικά) που το 2009 έπεσε στα 70-80 εκατομμύρια τόνους. Στον χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα λατομεία αδρανών υλικών της Ελλάδας.

1.2.2. Οφέλη από τη δραστηριότητα των λατομείων

Η ορθολογική λειτουργία ενός λατομείου, αποφέρει οικονομικά οφέλη σε όλους τους εμπλεκόμενους, δηλαδή τους εργαζόμενους, μετόχους, εξωτερικούς συνεργάτες, πελάτες, προμηθευτές, στο κράτος και στις τοπικές κοινότητες, συμβάλλοντας στην οικονομική ανάπτυξη του τόπου.

Τα έσοδα του κράτους, πέραν των φόρων, προέρχονται και από μισθώματα στην περίπτωση που οι εκτάσεις των λατομείων είναι δημόσιες, ενώ τα έσοδα των τοπικών κοινοτήτων προέρχονται είτε από μισθώματα, εάν πρόκειται για δημοτικές εκτάσεις, είτε από ειδικά τέλη.

Επειδή τα αδρανή υλικά έχουν χαμηλή αξία πώλησης και σημαντικό κόστος μεταφοράς, τα λατομεία είναι διάσπαρτα στην ελληνική περιφέρεια συμβάλλοντας στην τοπική απασχόληση και στη μείωση της αστυφιλίας.

1.2.3. Αδρανή υλικά

Ως αδρανή υλικά καλούνται το σύνολο των άμμων, χαλικιών, θραυστών λίθων, σκωρίων και άλλων παρόμοιων υλικών ανόργανης σύστασης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης, που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με συγκολλητικά μέσα (τσιμέντο, άσφαλτος κ.λπ.) για σχηματισμό μιγμάτων όπως σκυροκονιάματα, ασφατικά σκυροδέματα και σκυρωτά οδοστρώματα ή και αυτούσια (π.χ. έρματα σιδηροδρομικών γραμμών). Ονομάζονται αδρανή γιατί η πλειονότητα τους δεν αντιδρά χημικά με τις διάφορες συγκολλητικές ύλες.

Η μεγαλύτερη ποσότητα αδρανών υλικών προέρχεται από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων (κυρίως ασβεστολιθικών) ή από φυσικές αποθέσεις (μίγμα κυρίως ασβεστολιθικών, ψαμιτικών και γρανιτικών πετρωμάτων) ποταμών, χειμάρρων, με σημαντικότερες τη συμμετοχή τους στην παραγωγή ασφάλτου (η άσφαλτος αποτελείται κατά 90% από αδρανή) και στην παραγωγή τσιμέντου (συμμετοχή κατά 80%). Παράλληλα κάποιες μικρότερες ποσότητες αδρανών

προέρχονται από σκωρίες, απορρίμματα ορυχείων, θραυστά υλικά παλαιών οδοστρωμάτων κ.λπ.

Το κύριο χαρακτηριστικό των αδρανών υλικών είναι η περιορισμένη ακτίνα εμπορίας, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πολλές διάσπαρτες εκμεταλλεύσεις πολύ κοντά ή και μέσα στον αστικό ιστό.



Σχήμα 1.1. Χάρτης της Ελλάδας με τα λατομεία αδρανών υλικών (πηγή www.latomet.gr)

1.3. Μέθοδοι εξόρυξης πετρωμάτων

Εξόρυξη των πετρωμάτων ονομάζεται ένα σύνολο εργασιών (unit operations) που πραγματοποιούνται προκειμένου να αποσπαστεί τμηματικά το πέτρωμα από τη φυσική του θέση. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μεθόδων και τεχνικών που αποσκοπούν στην κατάτμηση του επί τόπου (in situ) πετρώματος σε τεμάχια κατάλληλου μεγέθους, ώστε να γίνεται με ευχέρεια η φόρτωση, μεταφορά, απόθεση ή περαιτέρω επεξεργασία (π.χ. θραύση) του εξορυγμένου πετρώματος.

Η εξόρυξη των πετρωμάτων πραγματοποιείται σήμερα με δύο βασικές και εμπορικά συμφέρουσες μεθόδους οι οποίες είναι:

- Με τη χρήση εκρηκτικών υλών
- Με τη χρήση μηχανικών μέσων εξόρυξης

Όταν η εξόρυξη πραγματοποιείται με την χρήση εκρηκτικών υλών, η απαιτούμενη ενέργεια για τον τεμαχισμό και την απόσταση του πετρώματος από τη φυσική του θέση προέρχεται από τη χημική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης, η οποία απελευθερώνεται κατά την έκρηξή της, μετατρέπεται σε μηχανική και υπό την μορφή κρουστικού κύματος και αερίων υπό υψηλή πίεση, ασκεί τάσεις στην μάζα του προς εξόρυξη πετρώματος με αποτέλεσμα τη θραύση τους.

Στην περίπτωση της μηχανικής εξόρυξης των πετρωμάτων με τη χρήση μηχανικών μέσων ασκούνται τάσεις επί τμήματος της μάζας του πετρώματος οι οποίες όταν υπερβούν τις μηχανικές αντοχές του πετρώματος προκαλούν τον τεμαχισμό του και την απόσπαση τμημάτων αυτού από την φυσικής τους θέση.

Και οι δυο περιπτώσεις εμφανίζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επιλογή της μεθόδου εξόρυξης είναι περίπλοκη και υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες όπως οικονομικοί, περιβαλλοντικοί και τεχνικοί και είναι διαφορετικοί για κάθε λατομείο.

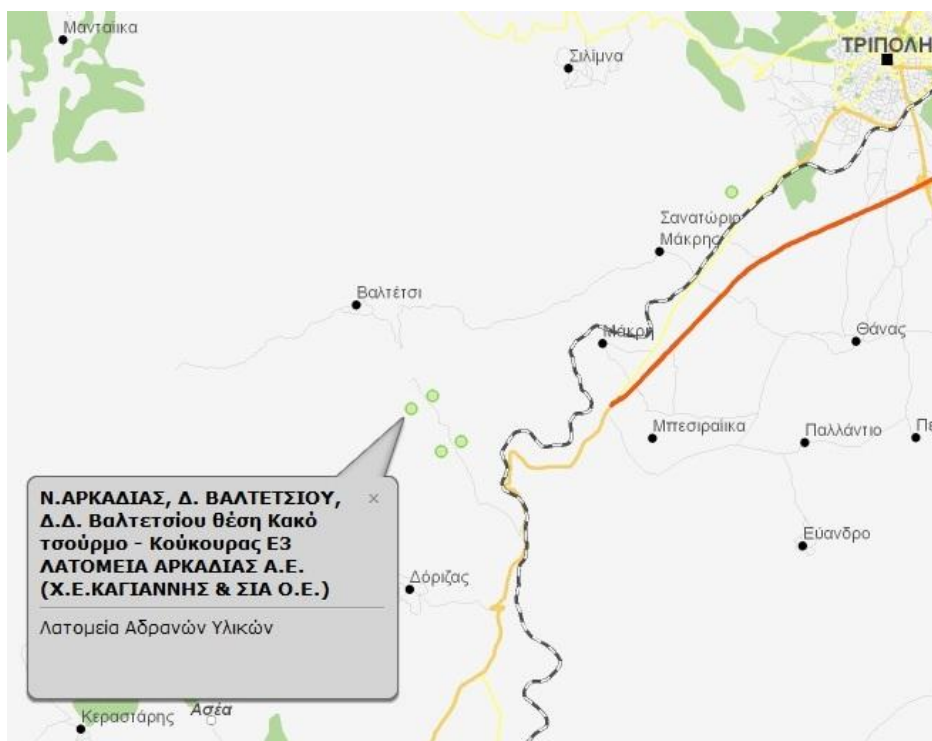
Η χρήση των εκρηκτικών είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και οικονομική. Όμως τα περισσότερα λατομεία βρίσκονται σε ευαίσθητες περιοχές, δηλαδή κοντά σε αστικές περιοχές όπου υπάρχουν εκκλησίες, σπίτια αλλά και αρχαιολογικοί χώροι και έτσι η χρήση τους δημιουργεί πολλά προβλήματα όπως θόρυβος, δονήσεις και σκόνη. Έτσι η χρήση των μηχανικών μέσων σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναπόφευκτη. Τα μηχανικά μέσα μπορεί να αποδειχθούν αρκετά αποτελεσματικά καθώς έχουν τη δυνατότητα της άμεσης προσβολής του πετρώματος, την διαχείριση των παραμέτρων της εκμετάλλευσης και της άμεσης αλλαγής του σχεδίου εξόρυξης.

1.4. Αντικειμενικός σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της δυνατότητας εξόρυξης ασβεστολίθου με μηχανικά μέσα. Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν δείγματα από την περιοχή της Τρίπολης και συγκεκριμένα από το λατομείο με την επωνυμία Καγιάννης Χρήστος & Σια Ο.Ε. που βρίσκεται στο 3^ο χιλιόμετρο Τρίπολης – Καλαμάτας (θέση Κακό Τσούρμο) κοντά στο χωριό Βαλτέτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.

Η δυνατότητα να εξορυχθεί ένα πέτρωμα με μηχανικά μέσα καθορίζεται από την εξορυξιμότητα του, δηλαδή την ευκολία ή την δυσκολία που παρουσιάζει στην εξόρυξή του. Μεταξύ των παραμέτρων που την επηρεάζουν, οι ιδιότητες της μάζας του προς εξόρυξη πετρώματος είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτίμησή της. Προκειμένου να γίνει μια πλήρης περιγραφή των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του πετρώματος θα εκτελεστούν μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές. Τέτοιες δοκιμές όπως η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, η δοκιμή σκληρότητας Shore και η δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar είναι δυνατό να δώσουν μια προκαταρκτική εκτίμηση της εξορυξιμότητας ενός πετρώματος. Η φθοροποιός ιδιότητα του ασβεστολίθου που θα υπολογιστεί, αποτελεί μια σημαντική παράμετρος καθώς είναι ένας δείκτης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

Έπειτα, θα πραγματοποιηθούν εργαστηριακές δοκιμές κοπής όπου θα προσδιοριστεί η ειδική ενέργεια εκσκαφής που απαιτείται για την εξόρυξη του ασβεστολίθου και θα διερευνηθεί η δυνατότητα εξόρυξης του με το μηχάνημα Surface Miner τύπου 2500 SM, του ομίλου της Wirtgen.



Σχήμα 1.2. Περιοχή λατομείου δειγματοληψίας (πηγή www.latomet.gr)

1.5. Οργάνωση της διπλωματικής

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από δέκα κεφάλαια και τέσσερα παραρτήματα.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα γενικά στοιχεία της μεταλλευτικής και των λατομείων αδρανών υλικών καθώς και τον αντικειμενικό σκοπό της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γεωλογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής αλλά και συγκεκριμένα της περιοχής του λατομείου. Επίσης γίνεται μια

γενική αναφορά για τα ιζηματογενή πετρώματα και τα χαρακτηριστικά των ασβεστόλιθων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια προσέγγιση της εξορυξιμότητας των πετρωμάτων και των παραμέτρων που την καθορίζουν. Επιπλέον αναφέρονται τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προς εξόρυξη αλλά και του εξορυγμένου πετρώματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου. Αναλύονται τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται και στη συνέχεια περιγράφονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την κοπή με κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου και οι σχέσεις μεταξύ τους. Τέλος εξετάζονται οι μηχανισμοί φθοράς των κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι κυριότερες θεωρίες κοπής που έχουν διατυπωθεί για την κοπή με κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος που μελετήσαμε και του τρόπου προσδιορισμού αυτών. Συγκεκριμένα οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι η δοκιμή αντοχής στη μονοαξονική θλίψη, η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, η δοκιμή σκληρομέτρησης πετρωμάτων με το σκληροσκόπιο Shore και η δοκιμή αποξεστικής ικανότητας πετρώματος Cerchar.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύεται η ειδική ενέργεια εκσκαφής, η χρησιμότητα της σαν παράμετρος που σχετίζεται με την μηχανική εξόρυξη και οι παράγοντες που σχετίζονται με αυτή και την επηρεάζουν. Τέλος γίνεται ιδιαίτερη μνεία στους τρόπους υπολογισμού της ειδικής ενέργειας εκσκαφής.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της δοκιμής κοπής του πετρώματος για τον προσδιορισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής. Αναλύεται τόσο το διαδικαστικό κομμάτι, όσο και ο μηχανικός εξοπλισμός που απαιτείται για την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση στην εξόρυξη του ασβεστόλιθου με χρήση του Surface Miner. Επιπλέον αναφέρονται τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος.

Τέλος στο δέκατο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τα παραρτήματα περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των δοκιμών.

1.6. Οριοθέτηση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συγκεντρώνει όλα εκείνα τα στοιχεία για την εμπειριστατωμένη γνώση της συμπεριφορά του πετρώματος και συγκεκριμένα του ασβεστόλιθου της περιοχής Τριπόλεως. Έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της δυνατότητας εξόρυξης ασβεστολίθου από την περιοχή της Τρίπολης με μηχανικά μέσα. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι δεν γίνεται προσπάθεια να προταθεί συγκεκριμένος τρόπος εξόρυξης κάτι που είναι αδύνατο καθώς η επιλογή της μεθόδου εξόρυξης είναι περίπλοκη και υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες όπως οικονομικοί, περιβαλλοντικοί και τεχνικοί και είναι διαφορετικοί για κάθε λατομείο.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1. Ιζηματογενή πετρώματα

Ιζηματογενή πετρώματα είναι τα πετρώματα εκείνα τα οποία σχηματίστηκαν από την απόθεση ή την καταβύθιση υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση μέσα σε ένα ρευστό μέσο και την μετέπειτα συγκόλληση των υλικών που αποτέθηκαν.

Τα υλικά αυτά προήλθαν από την αποσάθρωση άλλων πετρωμάτων εκρηξιγενών ή μεταμορφωμένων, τα οποία προϋπήρχαν σε άλλες περιοχές.

Χαρακτηριστικό των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι η στρώση των υλικών τους σε διαδοχικά επίπεδα και τα απολιθώματα, τα οποία βρίσκονται μόνο μέσα σε ιζήματα.

2.2. Διαδικασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων

Τα ιζηματογενή πετρώματα είναι μια από τις τρεις βασικές κατηγορίες ταξινόμησης των πετρωμάτων, ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους.

Για τον σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων λαμβάνουν χώρα οι εξής διεργασίες:

1. Διάβρωση και αποσάθρωση, οι οποίες είναι οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που υφίστανται τα προϋπάρχοντα πετρώματα με αποτέλεσμα την καταστροφή τους.
2. Μεταφορά των υλικών που προέκυψαν από την αποσάθρωση και την διάβρωση με τον άνεμο και το νερό των ποταμών και των θαλασσών.

3. Απόθεση των υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση. Η απόθεση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα.
4. Διαγένεση, είναι η διαδικασία με την οποία ένα χαλαρό ίζημα μετατρέπεται σε συμπαγές πέτρωμα, με τη βοήθεια της πίεσης των υπερκειμένων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης.

Με βάση τον τρόπο με τον οποίο ακολουθείται η πιο πάνω διαδικασία, τα ιζηματογενή πετρώματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Τα κλαστικά, που είναι ιζήματα που προκύπτουν από απόθεση υλικών αποσάθρωσης, που αιωρούνται στο νερό ή στον αέρα όπως είναι η άργιλος, η μάργα και ο ψαμμίτης.
2. Τα χημικά, τα οποία σχηματίστηκαν από συγκέντρωση ορυκτών που αποτέθηκαν κατευθείαν από υδατικά διαλύματα με ανόργανες χημικές διεργασίες όπως είναι ο ασβεστόλιθος.
3. Τα βιογενή, που είναι ιζήματα που δημιουργούνται όταν γίνεται συσσώρευση ή απόθεση ύλης προερχόμενης από ζωικούς ή φυτικούς οργανισμούς όπως είναι η κρητίν (κιμωλία) και ορυκτοί άνθρακες.

2.3. Γεωλογική περιγραφή και χαρακτηριστικά ασβεστόλιθων

Οι ασβεστόλιθοι μαζί με τα μάρμαρα και τους δολομίτες αποτελούν τα ανθρακικά πετρώματα. Ο ασβεστόλιθος, που προκύπτει από την ασβεστολιθική ύλη, μπορεί να περιέχει πλην του ασβεστίτη, σε μικρές ποσότητες, δολομίτη, σιδηρίτη, αιματίτη, λειμωνίτη, χαλαζία, οπάλιο, αργιλικά ορυκτά, άστριους, χλωρίτη, μαρμαρυγίες και συχνά οργανικές ουσίες. Οι ουσίες αυτές προκαλούν συνήθως το τεφρό ως μαύρο χρώμα, ο λειμωνίτης και ο σιδηρίτης δίνουν το ανοιχτοκίτρινο ως καστανό, ο αιματίτης το ροδόχρουν ως κεραμέρυθρο και ο χλωρίτης το τεφροπράσινο. Ο καθαρός ασβεστόλιθος είναι λευκός.

Οι ασβεστόλιθοι μπορεί να είναι είτε σχεδόν καθαρά χημικά ιζήματα (ωολιθικοί, τραβερίνες), είτε σχεδόν καθαρά βιογενή (κρητίς, κογχυλιογενής ασβεστόλιθος). Συνήθως όμως είναι μικτής προελεύσεως.

Υπάρχουν σπιφρές παραλλαγές ασβεστόλιθων καθώς και κρυσταλλικές. Αν περιέχουν άμμο, χαρακτηρίζονται σαν ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι, οι οποίοι με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άμμο μεταπίπτουν σε ασβεστολιθικούς ψαμμίτες. Μίγματα ασβεστόλιθου και αργιλίου καλούνται μάργες, πετρώματα που έχουν ιδιότητες ενδιάμεσες των ιδιοτήτων των ασβεστόλιθων και των αργίλων.

Οι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες αποτελούνται αντίστοιχα από ασβεστίτη και δολομίτη ή κατά το πλείστον από δολομίτη. Έχουν συχνά σακχαροκοκκώδη εμφάνιση και είναι ελαφρά σκληρότεροι, βαρύτεροι και πιο εύθραυστοι από τους ασβεστόλιθους, από τους οποίους και έχουν προκύψει. Αν δεν είναι σακχαρώδεις, μοιάζουν με τους ασβεστόλιθους και διακρίνονται από αυτούς, επειδή αναβράζουν ασθενέστερα δια επιδράσεως HCl.

Οι τριαδικοί ασβεστόλιθοι της Ελλάδας περιέχουν συχνά δολομίτες. Αναλόγως του ποσοστού και του τρόπου διανομής της περιεχόμενης αργίλου, οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες είναι περισσότερο ή λιγότερο επιρρεπείς στην διόγκωση και ανθεκτικοί στην αποσάθρωση.

Στις ασβεστολιθικές μάζες παρουσιάζεται συχνά μια εναλλαγή στρωμάτων καθαρότερων (τραπεζών) και στρωμάτων μαργαϊκού ασβεστόλιθου ή μάργας, συχνά λεπτών. Όταν επικρατούν τα λεπτά στρώματα έχουμε τους πλακώδεις ασβεστόλιθους.

Όταν δεν υπάρχουν οι μαργαϊκές ενστρώσεις, το πέτρωμα παρουσιάζει σπάνιες επιφάνειες διαχωρισμού παράλληλα προς την στρώση. Συνήθως υπάρχουν τότε κατατμήσεις ακανόνιστες ή με ορισμένη διεύθυνση, οι οποίες μερικές φορές δίνουν μια εσφαλμένη θέση της στρώσης.

Σημασία για την τεχνική συμπεριφορά έχουν και ορισμένες ανομοιογένειες μέσα στο πέτρωμα. Πρόκειται για τα αργιλικά υμένια, τις ραφές και τις φλεβώσεις. Τα

αργιλικά υμένια είναι λεπτότατα στρωματίδια πάχους 0,2 μέχρι 2 mm ή και λίγο μεγαλύτερου, τα οποία ως επί το πλείστον είναι παράλληλα προς τη στρώση. Όταν δεν συμβαίνει αυτό σχηματίζουν δίκτυα. Δια συμπίεσεως ή μεταμορφώσεως τα αργιλικά υμένια μετατρέπονται σε σχιστολιθικό υλικό ή χλωριτικά και μαρμαρυγιακά φλεβίδια.

Οι ραφές είναι ανώμαλες σχισμές. Μερικές φορές οδοντωτές, περισσότερο ή λιγότερο κάθετες προς τη στρώση, που περιέχουν εν μέρει αργιλικό ή λειμωνιτικό υλικό ή ανακρυσταλλωμένο ανθρακικό ορυκτό.

Οι φλεβώσεις προκύπτουν από την απόθεση ανθρακικού ορυκτού μέσα σε ρωγμές υπό μορφή χονδροκρυσταλλική. Οι φλεβώσεις είτε είναι παράλληλες, περισσότερο ή λιγότερο, προς ορισμένες διευθύνσεις, είτε είναι ακανόνιστες.

Η τεχνική συμπεριφορά των ασβεστόλιθων και δολομιτών ποικίλει σημαντικά εξαιτίας του ποικίλλοντος μεγέθους των κόκκων ή των κογχυλίων ή των θραυσμάτων τους, της διαφορετικής συμφύσεως αυτών και του διαφόρου πορώδους.

Οι στιφρές παραλλαγές με ελάχιστο πορώδες έχουν αντοχή σε θλίψη συνήθως 1-2 MPa/cm², σπανίως δε και περισσότερο. Η παρουσία αργιλικών υμενίων, ραφών και φλεβώσεων μειώνει την αντοχή στη θλίψη.

Ασβεστόλιθοι πλούσιοι σε απολιθώματα και με ποικίλο μέγεθος κόκκων, όταν έχουν καλή σύνδεση, δεν υστερούν σε αντοχή των στιφρών. Όταν όμως τα ανθρακικά πετρώματα υποστούν ανακρυστάλλωση (μάρμαρα), η αντοχή τους μειώνεται αυξανόμενου του μεγέθους των κόκκων.

Οι πορώδεις ασβεστόλιθοι έχουν μειωμένη αντοχή. Οι στιφροί είναι εύθραυστοι και μάλιστα περισσότερο από τους απολιθωματοφόρους. Επίσης με ορισμένη, σχετικώς υψηλή τιμή του πορώδους γίνονται λιγότερο εύθραυστοι. Ασβεστόλιθοι με λεπτό πυριτικό σκελετό έχουν αυξημένη αντοχή σε θλίψη και σε κρούση. Αντίθετα η περιεχόμενη στους ασβεστόλιθους άργιλος μειώνει την αντοχή τους.

Οι καθαροί ασβεστόλιθοι και δολομίτες λειαινόνται και σπιλβώνονται εύκολα, όταν δεν έχουν πόρους, και ανήκουν στα μαλακά πετρώματα (σκληρότητα ασβεστίτη 3 Mohs). Οι δολομίτες ανήκουν στα μαλακά ως ημίσκληρα πετρώματα. Ορισμένοι πυριτικοί και ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι με μεγάλη αντοχή μπορούν να υπαχθούν στα σκληρά πετρώματα.

Οι συμπαγείς καθαροί ασβεστόλιθοι παρά την υψηλή διαλυτότητα του ασβεστίτη, είναι πετρώματα ανθεκτικά στην αποσάθρωση. Οι φθορές που εμφανίζονται (ιδίως δια παγετού) αρχίζουν από τα αργιλικά υμένια, τις ραφές και τις φλεβώσεις ή από τις λεπτότατες ρωγμές που προκαλούνται κατά την εξόρυξη και επεξεργασία των δομικών λίθων.

Στους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους η αντοχή σε αποσάθρωση είναι μειωμένη. Με αυξημένη περιεκτικότητα σε άργιλο το πέτρωμα διαβροχής διογκώνεται και μετά την ξήρανση παρουσιάζει σχισμές.

Εξαιτίας της διαλυτότητας των ασβεστόλιθων και των δολομιτών, η επιφάνειά τους με τη βροχή γίνεται γρήγορα τραχεία. Γι' αυτό οι σπιλπνές επιφάνειες των πλακών επενδύσεως από ανθρακικά πετρώματα χάνουν σχετικά γρήγορα τη σπιλπνότητα και το χρώμα τους, όταν είναι εκτεθειμένα στη βροχή.

Η διαλυτότητα των ανθρακικών πετρωμάτων διαπιστώνεται εύκολα στη φύση από την παρουσία των χαρακτηριστικών μορφών διαλύσεων, όπως είναι οι δακτυλογλυφές και οι αμαξοτροχιές. Επίσης από χαίνουσες ρωγμές γεμάτες με ερυθρογή, η οποία είναι το αδιάλυτο υπόλειμμα των πετρωμάτων αυτών. Τα όμβρια νερά εισδύοντα δια των ρωγμών στο εσωτερικό του πετρώματος συνεχίζουν την διαλυτική τους δράση και διευρύνουν τις ρωγμές σε ευρείς οχετούς, κοιλότητες και σπήλαια, δια μέσου των οποίων το νερό κυκλοφορεί άνετα προς βαθύτερους ορίζοντες. Για το λόγο αυτό οι περιοχές που αποτελούνται από τέτοια πετρώματα είναι επιφανειακώς άνυδρες. Η διάβρωση αυτή των πετρωμάτων καλείται καρστική διάβρωση και έχει μεγάλη σημασία για τις υδρογεωλογικές συνθήκες και συνεπώς για την αναζήτηση υπόγειων νερών, για τη στεγανοποίηση λιμνών και τη θεμελίωση

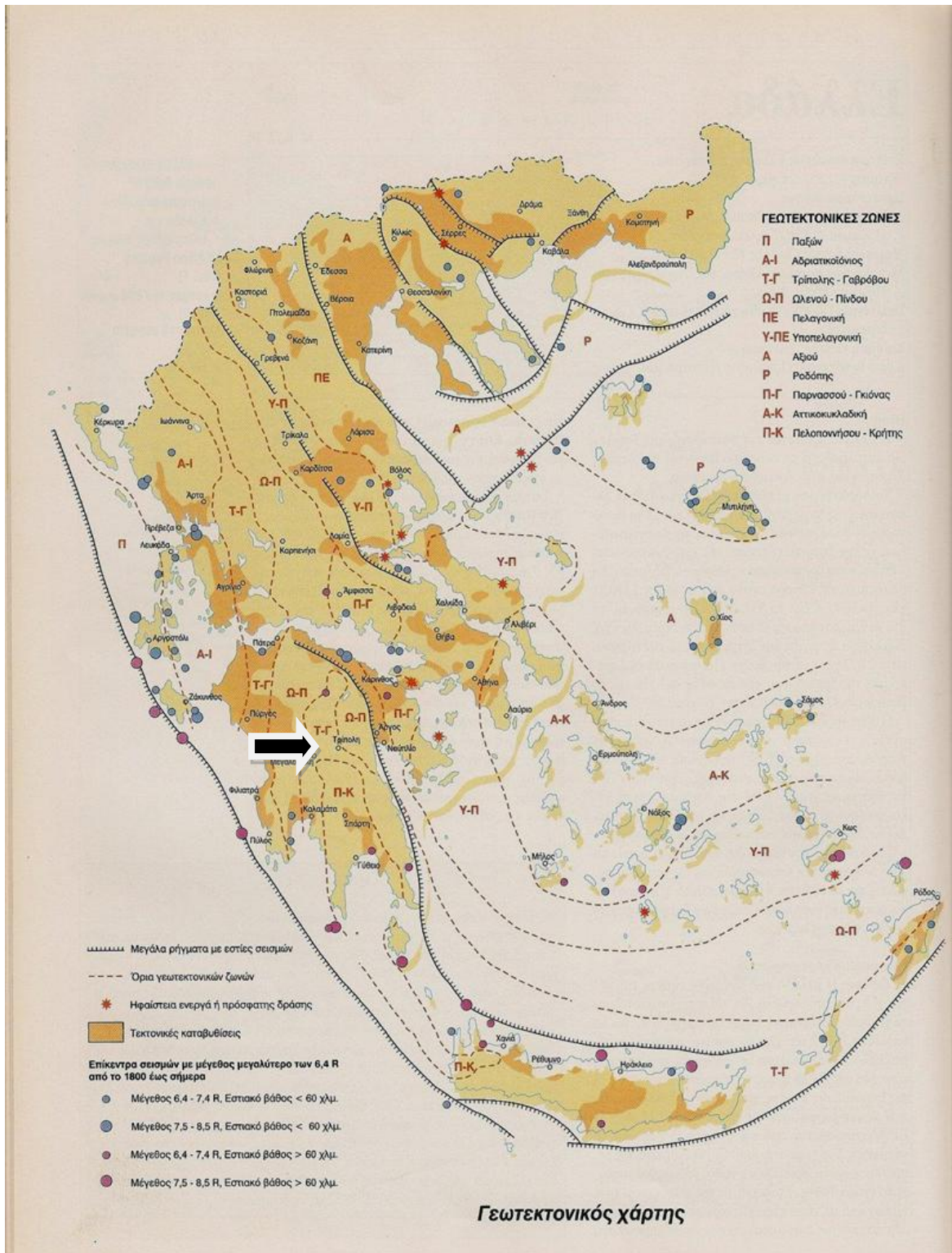
φραγμάτων και γενικά για την αντοχή του εδάφους θεμελιώσεως βαριών τεχνικών έργων.

Οι περισσότεροι ασβεστόλιθοι είναι δυνατό να υποστούν εύκολα επεξεργασία με εργαλεία χειρός. Δύσκολος είναι ο διαχωρισμός κατά επιθυμητές διευθύνσεις εξ αιτίας της ευθραυστότητάς τους και των αργιλικών υμενίων, ραφών και φλεβώσεων. Οι πολύ πορώδεις ασβεστόλιθοι (π.χ. τραβερίνες) σχίζονται δυσκολότερα των συμπαγών, αλλά επιτρέπουν μια εύκολη και λεπτή γλυπτική επεξεργασία. Τα ανακρυσταλλωμένα πετρώματα (γνήσια μάρμαρα) επιτρέπουν ευχερέστερη επεξεργασία επειδή με την ανακρυστάλλωση εξαφανίζονται τα αργιλικά υμένια και οι ραφές.

Όταν οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες περιέχουν ενστρώσεις, φακούς και κονδύλους κερατόλιθου ή πυριτόλιθου η επεξεργασία τους γίνεται πολύ δύσκολη.

2.4. Γεωτεκτονική θέση της ευρύτερης περιοχής λατομείου

Το λατομείο όπου έγινε η δειγματοληψία του ασβεστόλιθου ανήκει στην αυτόχθονη σειρά της ζώνης Τριπόλεως όπως φαίνεται στον χάρτη που ακολουθεί. Η ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης βρίσκεται δυτικά της ζώνης Πίνδου και προεκτείνεται με διεύθυνση ΒΒΔ - ΝΝΑ από την Ήπειρο προς την Πελοπόννησο όπου εμφανίζεται να περιβάλλεται τεκτονικά από τη ζώνη Ωλονού - Πίνδου. Στο γεωγραφικό χώρο Ηπείρου - Στερεάς Ελλάδας η ζώνη κατέχει λωρίδα μήκους 250 km περίπου και μέσου πλάτους 10 km με μέγιστο πλάτος εμφανίσεων περίπου 20 km. Αντίθετα στην Πελοπόννησο η έκταση των εμφανίσεων της ζώνης είναι πολύ μεγαλύτερη. Τα βουνά Τύμφη, Γάβροβο, Χελμός, Μαίναλο και Πάρνων περιλαμβάνονται στη ζώνη αυτή. Μεγάλα τμήματα της Κρήτης και της Ρόδου κατέχονται επίσης από τους σχηματισμούς της ζώνης.



Σχήμα 2.1. Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας

(Το λατομείο είναι στη περιοχή που δείχνει το βελάκι)

Η ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης καθορίστηκε σαν ύβωμα, που είχε συνεχή νηριτική ιζηματογένεση και χώριζε το ευγεωσύγκλινο της ζώνης Ωλονού - Πίνδου από το μειογεωσύγκλινο της Αδριατικοϊονίου ζώνης. Παλιότερα θεωρούνταν σαν δύο ανεξάρτητα υβώματα. Το ύβωμα Γαβρόβου στον κορμό της ηπειρωτικής Ελλάδας και το ύβωμα Τρίπολης στην Πελοπόννησο. Τα δύο αυτά υβώματα εντάχθηκαν σε μια ζώνη (Γαβρόβου - Τρίπολης) από τον Dercourt (1964) παρόλο που ορισμένοι θεωρούν ακόμη τις δύο περιοχές παλαιογεωγραφικά ανεξάρτητες. Με τις σύγχρονες αντιλήψεις της παγκόσμιας τεκτονικής η ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει παλιά, αλπική ηπειρωτική πλατφόρμα με νηριτική ανθρακική ιζηματογένεση.

Όσον αφορά το θέμα της σχέσης μεταξύ Γαβρόβου και Τρίπολης είναι γεγονός ότι υπάρχουν υπόνοιες για κάποια διαφοροποίηση στις συνθήκες ιζηματογένεσης μεταξύ των δύο περιοχών αλλά το πρόβλημα είναι πού μπορεί να βρίσκεται, αν βέβαια βρίσκεται, ένα τέτοιο όριο μεταξύ Γαβρόβου και Τρίπολης. Έχει εκφραστεί η υπόνοια ότι ίσως το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου καλύπτει πιθανόν το υποτιθέμενο αυτό όριο.

2.5. Λιθοστρωματογραφική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής λατομείου

Προαλπικό υπόβαθρο της ζώνης αναφέρεται μόνο στην Πελοπόννησο και την Κρήτη. Συγκεκριμένα πρόκειται για ημιμεταμορφωμένα πετρώματα, η ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων ή "Plattenkalk". Τα πετρώματα αυτά έχουν συχνές εμφανίσεις στα βουνά της Πελοποννήσου (Ταΰγετος, Πάρνωνας, Αρκαδία, Χελμός).

Η σειρά των "Plattenkalk" αποτελείται από αλληπάλληλα στρώματα πλακωδών ασβεστόλιθων. Από τη στρωματογραφική διάρθρωση της ζώνης προκύπτει μία ομοιότητα με την Ιόνια ζώνη, αλλά και σημαντικές διαφορές, όπως η απουσία του φλύσχη.

Όσον αφορά την τεκτονική τους δομή αυτή χαρακτηρίζεται από συστολή με επωθήσεις, μεγάλης κλίμακας αναστροφές και λεπιώσεις. Επίσης πιστοποιήθηκε χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση η οποία μειώνεται από Ανατολή προς Δύση.

Η ζώνη Γαβρόβου - Τριπόλεως είναι γνωστή για την συνεχή νηριτική ιζηματογένεσή της κατά τους αλπικούς χρόνους, που έδωσε μια σειρά ανθρακικών πετρωμάτων συνολικού πάχους 1800 m, αν και ορισμένοι υπολογίζουν το πάχος πάνω από 4000 m.

Η ιζηματογένεση άρχισε το Άνω Τριαδικό με δολομίτες και συνεχίστηκε αδιάκοπα όλο το Μεσοζωικό και Τριτογενές μέχρι το Άνω Ηώκαινο, αποκλειστικά με ασβεστόλιθους. Οι ασβεστόλιθοι που αποτέθηκαν είναι τεφροί μέχρι υπόλευκοι, λεπτοστρωματώδεις ως παχυστρωματώδεις, συχνά ωλιθικοί που περιέχουν τρηματοφόρα και κομμάτια γαστερόποδων και εχινόδερμων.

2.6. Γεωλογία της περιοχής του λατομείου

Κατά πλειονότητα υπάρχουν νηριτικοί ασβεστόλιθοι που είναι τεφροί έως σκουρότεφοι, μαύροι βιτουμενιούχοι, συχνά δολομιτωμένοι και συνήθως παχυστρωματώδεις. Κατά θέσεις σε ορίζοντες που έχει προσδιοριστεί το Λουτήσιο παρατηρούνται περιορισμένες συγκεντρώσεις λατεριτού υλικού. Είναι Παλαιόκαινης και Λουτήσιας ηλικίας και έχουν πάχος 450m περίπου (γεωλογικός χάρτης Τριπόλεως, κλίμακα 1:250000).

2.7. Κλιματολογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής

Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 έως 37 °C το καλοκαίρι και από 2 έως 14 °C το χειμώνα. Ελάχιστες είναι οι μέρες με αρνητική θερμοκρασία. Ο πιο θερμός μήνας

είναι ο Ιούλιος και ο πιο ψυχρός ο Ιανουάριος. Η μέση ετήσια θερμοκρασία μεταβάλλεται περίπου 14 °C.

Το μέσο ετήσιο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σύμφωνα με τον ορεινό σταθμό της Τρίπολης είναι τα 780 mm. Οι περισσότερες βροχές πέφτουν κατά τη χειμερινή και εαρινή περίοδο. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένο φαινόμενο και λαμβάνουν χώρα κατά την περίοδο Σεπτεμβρίου - Απριλίου. Οι χαλαζοπτώσεις είναι σπάνιες.

Ο αριθμός των αίθριων ημερών είναι από 100 ως 120 ετησίως, ενώ ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών βροχής είναι 100. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών χιονιού είναι πάνω από 9. Αντίστοιχα ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών ομίχλης είναι πάνω από 30. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία λαμβάνει τιμές 45–50% το χειμώνα και 65–80% το καλοκαίρι.

3. ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1. Γενικά

Το πέτρωμα ορίζεται ως μια σύνθετη φυσική ύλη χωρίς σταθερή χημική σύσταση από την οποία συνίσταται ο φλοιός της γης. Η έννοια του πετρώματος, όπως χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή, είναι ευρεία και καλύπτει όλο το φάσμα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στις εκμεταλλεύσεις και τα τεχνικά έργα, όπου πραγματοποιείται μηχανική εξόρυξη.

Τα πετρώματα λόγω των διαφορετικών τρόπων που σχηματίστηκαν, της διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης και των διαφορετικών μεταγενετικών επιδράσεων που έχουν υποστεί κατά την διάρκεια της γεωλογικής τους ιστορίας παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ως προς τις μηχανικές και τις φυσικές τους ιδιότητες με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ποικίλη συμπεριφορά κατά την εξόρυξη τους.

Η εξορυξιμότητα του πετρώματος, εξαρτάται άμεσα από τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί για την εξόρυξη του. Γενικά όμως ένα πέτρωμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως “μαλακό” όταν αυτό μπορεί να εξορυχτεί με μηχανικά μέσα ή ως “σκληρό” όταν αυτό δεν μπορεί να εξορυχτεί με μηχανικά μέσα παρά μόνο με την χρήση εκρηκτικών υλών.

3.2. Η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων από οικονομική και επιχειρησιακή σκοπιά

Η εξόρυξη των πετρωμάτων, η τμηματική δηλαδή απόσπαση του πετρώματος από την φυσική του θέση, πραγματοποιείται μεταξύ των άλλων τρόπων (π.χ.

ανατίναξη με χρήση εκρηκτικών υλών) και με την βοήθεια διάφορων μηχανικών μέσων εξόρυξης, τα οποία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από τα πλέον απλά, π.χ. από την εκσκαπτική αερόσφυρα, μέχρι τα πλέον ισχυρά και ογκώδη όπως είναι ο υδραυλικός μετωπικός εκσκαφέας (shovel) ή ο καδοφόρος εκσκαφέας.

Η εκσκαπτική αερόσφυρα έχει την δυνατότητα να εξορύξει πρακτικά κάθε πέτρωμα, που για την εξόρυξή του δεν απαιτείται η χρήση εκρηκτικών υλών. Την ίδια δυνατότητα έχει και ένας υδραυλικός εκσκαφέας. Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στο γεγονός ότι:

α) Το κόστος ανά μονάδα όγκου πετρώματος θα είναι πολύ μεγαλύτερο στην περίπτωση της εκσκαπτικής αερόσφυρας και

β) Η παραγωγική ικανότητα του υδραυλικού εκσκαφέα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη της εκσκαπτικής αερόσφυρας

Συνεπώς, για την επίτευξη χαμηλού κόστους εξόρυξης και μεγάλης παραγωγής το πρώτο σύστημα (εκσκαπτική αερόσφυρα) δεν μπορεί πρακτικά να εφαρμοσθεί, ενώ είναι προφανές ότι η εφαρμογή του δεύτερου συστήματος εξόρυξης (υδραυλικός εκσκαφέας) πρέπει περαιτέρω να διερευνηθεί έτσι ώστε να επιλεγεί το πλέον κατάλληλο μηχάνημα εκσκαφής από ένα ευρύ φάσμα μηχανημάτων που υπάρχουν στην αγορά.

Κατά την διερεύνηση αυτή πρέπει να εξετασθούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ανά μονάδα εξορυγμένου όγκου πετρώματος: χαρακτηριστικά του πετρώματος, τρόπος προσβολής, χαρακτηριστικά του μηχανήματος, καθώς και η καταναλισκόμενη ενέργεια από το μηχάνημα για την παραγωγή μιας μονάδας εξορυγμένου όγκου πετρώματος.

Το δεύτερο μέγεθος, που συσχετίζεται με την εξόρυξη των πετρωμάτων, είναι η απαιτούμενη απόδοση του μηχανήματος εξόρυξης, η οποία προσδιορίζεται από την ζητούμενη παραγωγή της εκμετάλλευσης ή την ταχύτητα προχώρησης του τεχνικού έργου (π.χ. διάνοιξη οδικής σήραγγας). Μια μικρής έκτασης εξόρυξη - εκσκαφή (π.χ. θεμέλια τεχνικού έργου) δικαιολογεί χρησιμοποίηση εξοπλισμού μικρής

απόδοσης, ενώ μεγάλης κλίμακας εξόρυξη (π.χ. υπαίθριο ορυχείο) επιβάλλει την χρησιμοποίηση εξοπλισμού υψηλής απόδοσης, του οποίου η χρήση στην πρώτη περίπτωση δεν θα ήταν συμφέρουσα.

Τόσο η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα εξορυγμένου όγκου, όσο και η απόδοση των μηχανημάτων εξόρυξης εξαρτώνται, εκτός των άλλων παραγόντων, άμεσα από την φθορά των κοπτικών εργαλείων. Αυξημένη φθορά των κοπτικών εργαλείων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης, με παράλληλη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Όταν η φθορά των κοπτικών εργαλείων λάβει μεγάλες τιμές και οι άκρες τους από αιχμηρές γίνουν αμβλείες, τότε καθίσταται αδύνατη η περαιτέρω εξόρυξη και απαιτείται αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων με καινούργια.

Από τα παραπάνω μπορεί να λεχθεί ότι, η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων είναι δυνατόν να συνδεθεί με οικονομικά και επιχειρησιακά χαρακτηριστικά της εξόρυξης, εάν εκφραστεί με την βοήθεια των εξής παραμέτρων:

$$F = f(X, Y, Z)$$

Όπου:

X: Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εκσκαφής, που ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή ενός μέτρου εξορυγμένου πετρώματος (kWh/m^3)
(Σημείωση: m^3 =κυβικό μέτρο χαλαρού πετρώματος)

Y: Η επιτεύξιμη ή η πραγματική απόδοση του μηχανήματος εξόρυξης (m^3/h)

Z: Η φθορά των κοπτικών εργαλείων

3.3. Παράμετροι που επηρεάζουν την εξορυξιμότητα των πετρωμάτων

Η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα επηρεάζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Τα χαρακτηριστικά του προς εξόρυξη πετρώματος (άρρηκτο πέτρωμα – μάζα πετρώματος)
- Τα χαρακτηριστικά του εξορυγμένου πετρώματος
- Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος εξόρυξης
- Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος
- Την μέθοδο εκσκαφής που εφαρμόζεται
- Την γεωμετρία του μετώπου εκσκαφής

3.3.1. Χαρακτηριστικά του προς εξόρυξη πετρώματος

Τα χαρακτηριστικά του προς εξόρυξη πετρώματος (άρρηκτο πέτρωμα – μάζα πετρώματος) επηρεάζουν καθοριστικά την εξορυξιμότητα των πετρωμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος.

Επισημαίνεται ότι, σε ότι αφορά την εξόρυξη, οι ιδιότητες της μάζας του πετρώματος είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτίμηση της εξορυξιμότητας. Ένα πέτρωμα που παρουσιάζει υψηλές τιμές μηχανικής αντοχής (χαρακτηριστικό του άρρηκτου πετρώματος) αλλά είναι έντονα κατακερματισμένο (χαρακτηριστικό της μάζας του πετρώματος), εξορύσσεται σχετικά εύκολα με μηχανικά μέσα, σε αντίθεση με ένα άλλο το οποίο έχει μικρότερες τιμές αντοχής, πλην όμως είναι συμπαγές.

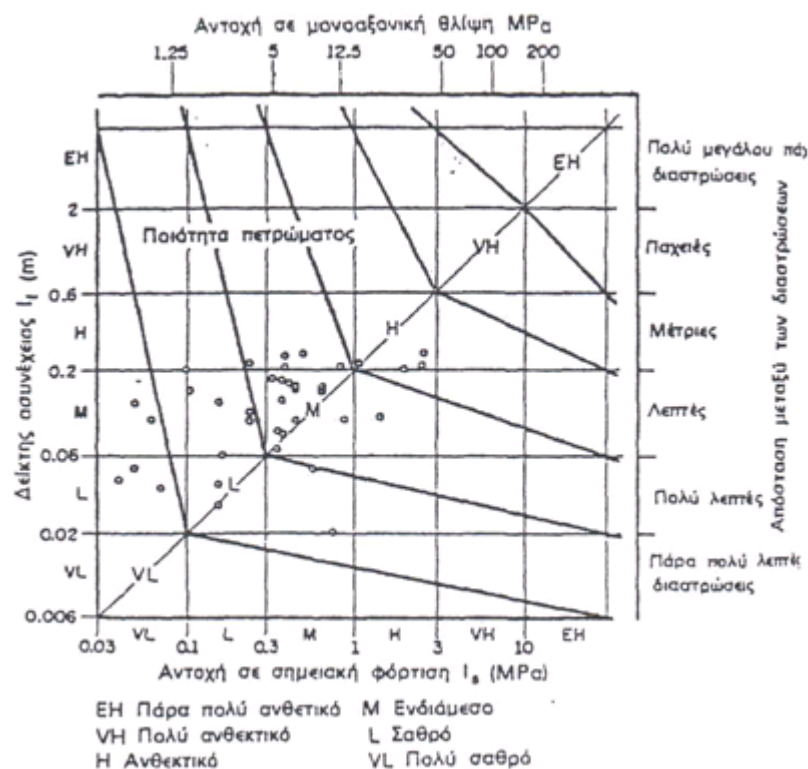
Την εξόρυξη του πετρώματος με μηχανικά μέσα επηρεάζουν οι παρακάτω ιδιότητες (παράμετροι) του πετρώματος:

1. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ή εναλλακτικά η αντοχή σε σημειακή φόρτιση προκύπτει μέσω της κλασσικής δοκιμής ή μέσω του δείκτη σημειακής φόρτισης I_s . Ο δείκτης σημειακής φόρτισης χρησιμοποιείται από την ταξινόμηση του Franklin.

Ο Franklin λαμβάνει υπόψη δυο παραμέτρους του πετρώματος:

- Τον δείκτη ασυνέχειας της μάζας του πετρώματος I_f που ορίζεται ως το μέσο μήκος πυρήνα, που δίνει μια γεώτρηση σε κάθε πέτρωμα, αφού αγνοηθούν τυχόν θραύσεις του πυρήνα λόγω της διάτρησης
- Την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη ή εναλλακτικά την αντοχή του πετρώματος σε σημειακή φόρτιση I_s

Ανάλογα με τις τιμές I_f και I_s που θα προκύψουν, το πέτρωμα λαμβάνει ένα γενικό ποιοτικό γεωτεχνικό χαρακτηρισμό όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα γεωτεχνικής ταξινόμησης της μάζας του πετρώματος

2. Η αντοχή σε εφελκυσμό. Ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος είναι πολύ σημαντικός παράγοντας αφού τα πετρώματα έχουν πολύ μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό από ότι σε θλίψη. Επίσης, η δύναμη κοπής που πρέπει να αναπτύξουν τα κοπτικά εργαλεία τύπου σφήνας και σημειακής προσβολής, για την εξόρυξη ψαθυρών πετρωμάτων, είναι συνάρτηση της αντοχής του πετρώματος σε εφελκυσμό.

3. Η αντοχή σε διάτμηση. Ως διατμητική αντοχή ορίζεται συνήθως η διατμητική τάση που προκαλεί αστοχία κατά μήκος ενός επιπέδου του πετρώματος όταν δεν ασκείται κάθετη προς το επίπεδο αυτό δύναμη. Η διατμητική αντοχή αποτέλεσε την βάση για την διατύπωση θεωριών αστοχίας των πετρωμάτων, όπως η θεωρία του Coulomb και Mohr καθώς επίσης και την θεωρία κοπής των πετρωμάτων του Merchant και του Nishimatsu.

Η θεωρία του Coulomb διατυπώνεται ως εξής: «Η αστοχία ενός υλικού σε διάτμηση, όταν αυτό υποβάλλεται σε θλίψη, οφείλεται στο γεγονός ότι στο επίπεδο αστοχίας του ικανοποιείται την στιγμή της αστοχίας η εμπειρική σχέση:

$$|\tau| = S_0 + \mu \sigma_n$$

όπου τ = η μέγιστη διατμητική τάση ή διατμητική αντοχή

S_0 και μ = σταθερές του υλικού

σ_n = η κάθετη τάση στο επίπεδο αστοχίας

4. Η σκληρότητα των πετρωμάτων. Ως σκληρότητα των πετρωμάτων προσδιορίζεται η σκληρότητα διείδυσης και η σκληρότητα κατά Shore και κατά Schmidt. Με την βοήθεια της σκληρότητας κατά Shore που προσδιορίζεται με την βοήθεια του ομώνυμου σκληρόμετρου υπολογίζεται ο συντελεστής πλαστικότητας από την σχέση:

$$K = [(H_{20} - H_1) / H_{20}] * 100$$

όπου K = συντελεστής πλαστικότητας

H_{20} = τελική τιμή σκληρότητας έπειτα από 20 ανακρούσεις στο ίδιο σημείο

H_1 = τιμή σκληρότητας μετά από μια ανάκρουση

5. Η τριβή μεταξύ του πετρώματος και των μετάλλων. Ο συντελεστής τριβής πετρώματος / χάλυβα υπολογίζεται με την βοήθεια του συντελεστή εσωτερικής τριβής του πετρώματος, ο οποίος προκύπτει από την δοκιμή διάτμησης σύμφωνα με την σχέση:

$$\tan \varphi' = 0,75 * \tan \varphi$$

όπου φ' = η γωνία τριβής πετρώματος χάλυβα

φ = η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος

6. Η αντίσταση στην κοπή. Ως αντίσταση κοπής του πετρώματος ορίζεται η δύναμη που πρέπει να αναπτύξει η κοπτική ακμή του κοπτικού εργαλείου έτσι ώστε το πέτρωμα να αστοχήσει κατά την εκσκαφή του.

Παράλληλα όμως ως ειδική αντίσταση κοπής ή εκσκαφής ονομάζεται η ανηγμένη αντίσταση κοπής στην μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής του κοπτικού εργαλείου (kg/cm) ή στην μονάδα επιφάνειας του αποκοπτόμενου τμήματος του πετρώματος (kg/cm^2).

Οι τιμές της ειδικής αντίστασης κοπής εξαρτώνται από την μορφή του κοπτικού εργαλείου και από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος.

7. Τα συστήματα ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος. Ως ασυνέχεια του πετρώματος ορίζεται η οποιαδήποτε μακροσκοπική ή μικροσκοπική διακοπή στην συνέχεια του υλικού ανεξάρτητα από την μορφή, έκταση και τον τρόπο σχηματισμού της, που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Στην εξόρυξη των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα μας ενδιαφέρει πάρα πολύ εάν το πέτρωμα το οποίο

θα εξορύξουμε έχει ασυνέχειες, για τον λόγο ότι το πέτρωμα αυτό μπορεί να εξορυχτεί πιο εύκολα αφού η ασυνέχεια έχει μηδενική ή χαμηλά αντοχή σε εφελκυσμό ή διάτμηση.

8. Φθοροποιές ιδιότητες. Οι φθοροποιές ιδιότητες είναι ένας από τους καθοριστικότερους παράγοντες στην εξόρυξη του πετρώματος με μηχανικά μέσα τόσο από οικονομικής όσο και από τεχνικής σκοπιάς.

3.3.2. Χαρακτηριστικά του εξορυγμένου πετρώματος

Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά του εξορυγμένου πετρώματος, που επηρεάζουν την επίδοση του συστήματος εξόρυξης – φόρτωσης – αποκομιδής, τα πλέον σημαντικά είναι:

1. Ο συντελεστής επιπλήσματος, που ορίζεται ως ο λόγος του βάρους της μονάδας όγκου του συμπαγούς (in situ) πετρώματος, προς το βάρος της μονάδας του όγκου του χαλαρού (εξορυγμένου) πετρώματος. Ο συντελεστής επιπλήσματος προσδιορίζει τον όγκο του πετρώματος που γεμίζει τους κάδους των μηχανημάτων εξόρυξης.

2. Το μέγεθος των παραγόμενων τεμαχίων. Το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος εξαρτάται από τις διαστάσεις της εντομής που πραγματοποιεί το μηχάνημα εξόρυξης στο μέτωπο, τα συστήματα ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος, την ταχύτητα κοπής και την διάταξη των κοπτικών εργαλείων. Το σχήμα και το μέγεθος των τεμαχίων επηρεάζει άμεσα τον βαθμό πλήρωσης των κάδων, ενώ μεγάλα και αιχμηρά τεμάχια δημιουργούν σοβαρά προβλήματα και καθυστερήσεις στα μηχανήματα και τις διατάξεις φόρτωσης και μεταφοράς.

3. Η τάση προσκόλλησης στις μεταλλικές επιφάνειες. Πετρώματα γαιώδους μορφής, ορισμένοι άργιλοι και μάργες, έχουν την τάση να προσκολλώνται στις μεταλλικές επιφάνειες των κάδων των μηχανημάτων εξόρυξης, μειώνοντας έτσι την ωφέλιμη χωρητικότητα τους, καθώς και στις επιφάνειες των μηχανημάτων και

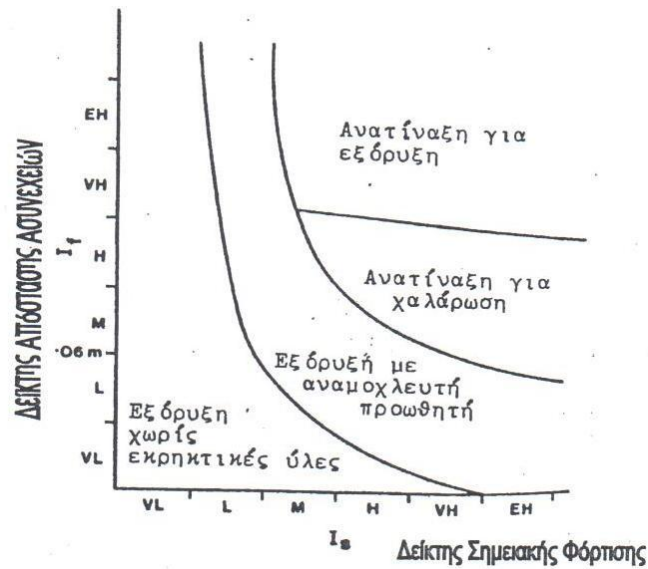
διατάξεων φόρτωσης – μεταφοράς. Η τάση προσκόλλησης εξαρτάται από την φύση του πετρώματος και το ποσοστό της υγρασίας του.

3.4. Εκτίμηση της εξορυξιμότητας των πετρωμάτων

Η ιδανική μέθοδος για τον προσδιορισμό της εξορυξιμότητας των πετρωμάτων είναι η πραγματοποίηση δοκιμαστικής εξόρυξης, σε αντιπροσωπευτικό τμήμα της προς εξόρυξη μάζας του πετρώματος, με τον τύπο του μηχανήματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και με την μέθοδο με την οποία πρόκειται να γίνει η εξόρυξη. Κατά την δοκιμαστική εξόρυξη, με κατάλληλες διατάξεις, μπορούν να μετρηθούν: η απαιτούμενη για την εκσκαφή του πετρώματος δύναμη, η καταναλισκόμενη ενέργεια κατά την εκσκαφή, η πραγματική απόδοση του μηχανήματος και η φθορά των κοπτικών εργαλείων. Με βάση τα στοιχεία αυτά είναι δυνατόν να υπολογιστούν στην συνέχεια βασικοί παράμετροι του μηχανήματος, όπως είναι η ισχύς των κινητήρων, η διάταξη και ο τύπος των κοπτικών εργαλείων, η γεωμετρία της εκσκαφής, η χωρητικότητα των κάδων, η ταχύτητα κοπής κ.α.

Επειδή η μέθοδος που αναφέρθηκε παραπάνω, στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι ανέφικτη, έχει επικρατήσει η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων να εκτιμάται με την βοήθεια διαφόρων κριτηρίων, που συσχετίζουν γεωλογικές και γεωτεχνικές παραμέτρους του προς εξόρυξη πετρώματος.

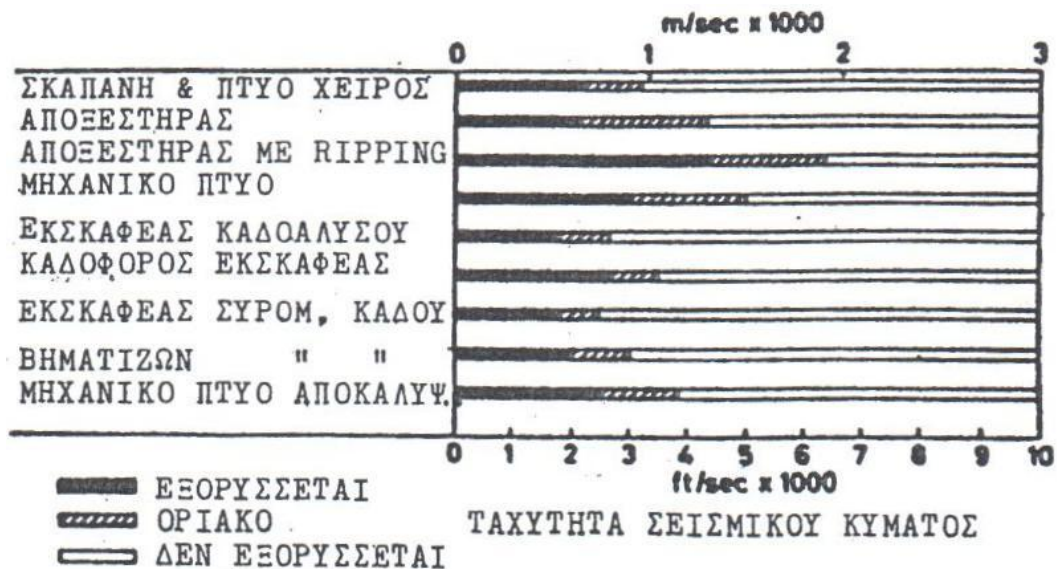
Ο Franklin το 1971 κάνοντας χρήση δύο παραμέτρων του προς εξόρυξη πετρώματος, ήτοι του Δείκτη Απόστασης Ασυνεχειών (If) και του Δείκτη Σημειακής Φόρτισης (Is), κατατάσσει την μάζα του πετρώματος, από πλευράς εξορυξιμότητας, στις περιοχές του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.2. Ταξινόμηση της μάζας πετρώματος για μηχανική εξόρυξη

Κλίμακα αξόνων: VL = πολύ μικρός, L = μικρός, M = μέσος, H = υψηλός, VH = πολύ υψηλός και EH = εξαιρετικά υψηλός

Ο Atkinson το 1971 πρότεινε το διάγραμμα του σχήματος 3.3, στο οποίο παρουσιάζεται η δυνατότητα εξόρυξης των πετρωμάτων, συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης του σεισμικού κύματος, από διάφορους τύπους μηχανημάτων.



Σχήμα 3.3. Δυνατότητα εξόρυξης των πετρωμάτων με διάφορους τύπους μηχανημάτων, συναρτήσει της ταχύτητας του σεισμικού κύματος

Ο γεωλογικός χαρακτηρισμός των πετρωμάτων έχει χρησιμοποιηθεί, επίσης, για μια πρώτη εκτίμηση της εξορυξιμότητά τους. Ο Fung το 1981 αναφέρει ότι τα πετρώματα μπορούν να ταξινομηθούν, σε ότι αφορά την εξόρυξή τους με μηχανικά μέσα, στις εξής κατηγορίες:

1. Πετρώματα που εξορύσσονται με πτύο χειρός, π.χ. μη συνεκτικοί σχηματισμοί, εδάφη, άμμοι, χάλικες, άργιλοι κ.ά.

2. Πετρώματα που εξορύσσονται με σκαπάνη π.χ. συνεκτικοί σχηματισμοί, μάργες, σκληροί άργιλοι, έντονα ρωγματομένα πετρώματα κ.ά.

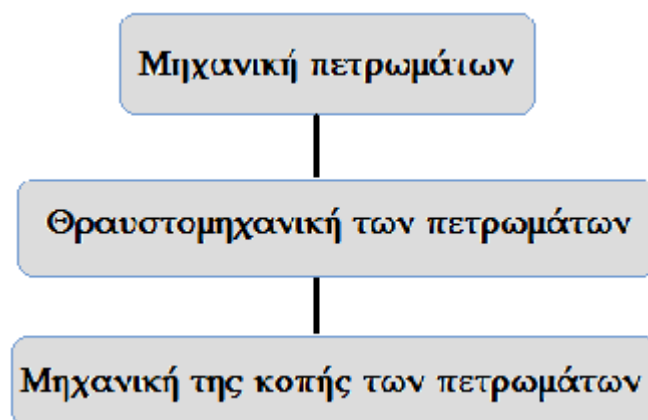
3. Πετρώματα που απαιτούν χαλάρωση με εκρηκτικές ύλες πριν εξορυχθούν με μηχανικά μέσα π.χ. σκληρές μάργες, ψαμμίτες κ.ά.

4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο της θραύσεως των πετρωμάτων έχει απασχολήσει έντονα τον κλάδο της μηχανικής των πετρωμάτων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του κλάδου της θραυστομηχανικής των πετρωμάτων. Εργαστηριακές παρατηρήσεις, θεωρίες θραύσεως (Griffith) και εμπειρικά κριτήρια (Hoek-Brown) έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την κατανόηση του μηχανισμού θραύσεως και την πρόβλεψη της αντοχής του πετρώματος συναρτήσει της φόρτισής του ή αλλιώς της επιβολής εντατικού πεδίου.

Μία μορφή φόρτισης και θραύσεως του πετρώματος είναι η ανάπτυξη δυνάμεων στο πέτρωμα και η αποσύνθεσή του κατά την διαδικασία κοπής του με μηχανικά μέσα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κοπής του πετρώματος σε σχέση με την κλασσική μελέτη της θραύσεως του πετρώματος οδήγησε σε ξεχωριστή μελέτη της “μηχανικής της κοπής των πετρωμάτων”, εξαιτίας της ολοένα μεγαλύτερης ανάγκης για αποδοτικότερη εξόρυξη των πετρωμάτων.



Οι ιδιαιτερότητες που κατέστησαν την κοπή του πετρώματος ένα ξεχωριστό αντικείμενο μελέτης είναι:

α) η επιβολή στο πέτρωμα τρισδιάστατου, ανομοιομορφου εντατικού πεδίου λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας των μηχανικών μέσων επιβολής του φορτιού (κοπτικά εργαλεία)

β) μεταβλητό φορτίο συναρτήσει του χρόνου και της θέσης του κοπτικού

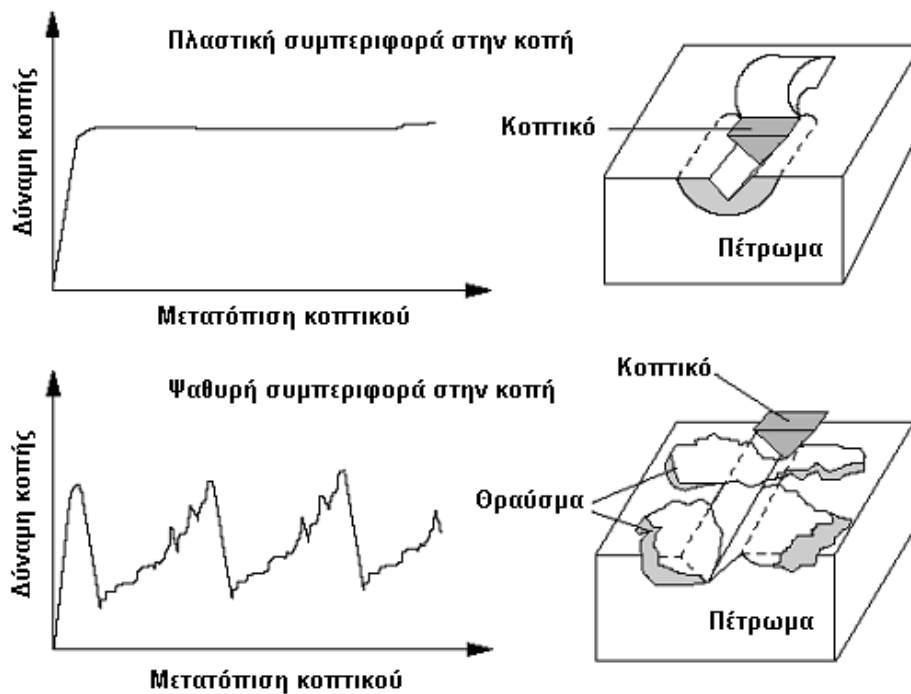
γ) εμφάνιση δυναμικών φαινομένων λόγω της μεταβλητής διεπιφάνειας πετρώματος-κοπτικού εργαλείου

Από τη μελέτη της κοπής των πετρωμάτων προέκυψαν οι θεωρίες κοπής που σκοπό έχουν την ερμηνεία του μηχανισμού της κοπής των πετρωμάτων και την πρόβλεψη των δυνάμεων και κατά συνέπεια των ενεργειακών απαιτήσεων των μηχανικών μέσων για την αποσύνθεση των πετρωμάτων.

Ερευνητές με παρατηρήσεις της αστοχίας των πετρωμάτων κατά την κοπή, θεωρήσεις για την μορφή του εντατικού πεδίου και χρήση κριτηρίων αντοχής των πετρωμάτων ανέπτυξαν θεωρίες κοπής για διάφορους τύπους πετρωμάτων και κοπτικών εργαλείων από τα οποία προσβάλλονται. Οι θεωρίες αυτές θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.

4.2. Συμπεριφορά του πετρώματος στην κοπή

Κατά την κοπή των πετρωμάτων δύο κυρίως τύποι αποσύνθεσης του είναι δυνατόν να παρατηρηθούν: α) πλαστική ροή και β) ψαθυρή αστοχία, καθώς και ενδιάμεσες περιπτώσεις οι οποίες είναι πιο δύσκολα διακριτές.



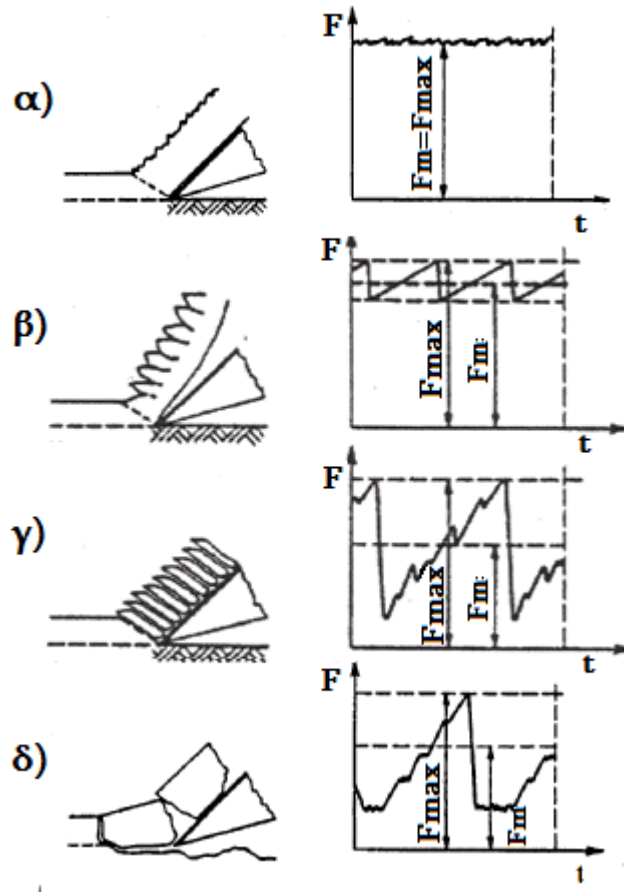
Σχήμα 4.1. Τύποι αποσύνθεσης του πετρώματος κατά Deketh (Αναγνώστου 2006)

Κατά την πλαστική ροή η μάζα που αστοχεί (απόκομμα-chip) απομακρύνεται με ομοιογένεια, συνδεδεμένη με την μάζα που αμέσως πριν και μετά αστοχεί και σε συνεχή επαφή με το κοπτικό. Αντίθετα κατά την ψαθυρή αστοχία η μάζα θραύεται ασυνεχώς και θραύσματα υλικού (chips) απομακρύνονται γρήγορα, ακόμα και βίαια από το κοπτικό.

Πλαστική ροή εμφανίζεται κατά την κοπή πλαστικών, μετάλλων και ορισμένων πετρωμάτων και ειδικά των μη συνεκτικών κοκκωδών μαζών των οποίων η αστοχία εξηγείται από την θεωρία της διατμητικής θραύσης (Coulomb). Τα υλικά αυτά αστοχούν σε διάτμηση βάσει εμπειρικών κριτηρίων (Mohr-Coulomb) και μπορούν γενικά να χαρακτηριστούν ως πλαστικά.

Ψαθυρή αστοχία εμφανίζουν τα περισσότερα πετρώματα κατά την κοπή τους. Η αστοχία γενικά των πετρωμάτων εξηγείται από τη θεωρία της ψαθυρής θραύσης του Griffith λόγω υπέρβασης της αντοχής τους σε εφελκυσμό. Η αντοχή τους υπολογίζεται από εμπειρικά κριτήρια (Hoek-Brown και Mohr-Coulomb) και μπορούν γενικά να χαρακτηριστούν ως ψαθυρά.

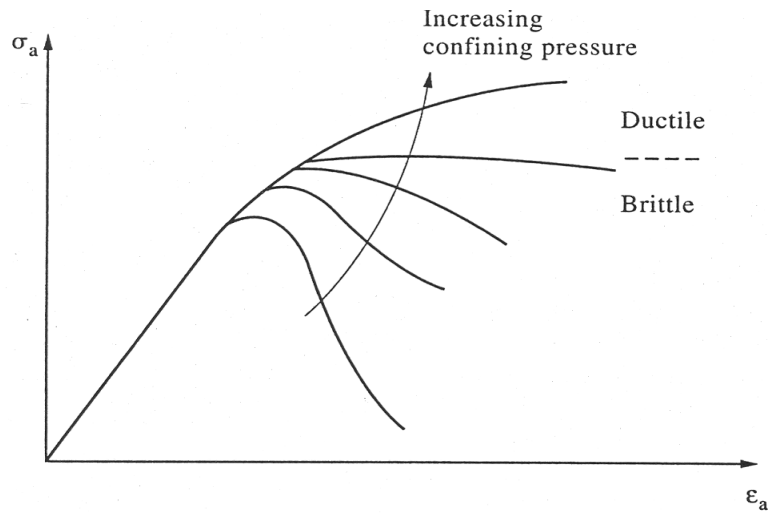
Βάσει των παραπάνω θα μπορούσαμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά ενός πετρώματος στην κοπή γνωρίζοντας πόσο ψαθυρό ή πλαστικό είναι. Αυτό είναι σημαντικό γιατί όπως φαίνεται από το σχήμα 4.2 όσο περισσότερο ψαθυρό είναι ένα πέτρωμα τόσο μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρατηρούνται στο μέγεθος της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου. Οι διακυμάνσεις αυτές γίνονται αντιληπτές ως δονήσεις του μηχανικού μέσου εξόρυξης.



όπου F_{max} είναι η μέγιστη δύναμη κοπής και F_m η μέση δύναμη κοπής

Σχήμα 4.2. Διακύμανση της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου για α) πολύ πλαστικό β) πλαστικό γ) ψαθυρό δ) πολύ ψαθυρό πέτρωμα (Παναγιώτου 2003)

Φυσικά θα πρέπει να δίνεται προσοχή στον ορισμό ενός πετρώματος ως ψαθυρού ή πλαστικού επειδή η ψαθυρότητα δεν είναι χαρακτηριστική ιδιότητα ενός πετρώματος αλλά εξαρτάται από τη φόρτιση στην οποία υποβάλλεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Μεταβολή ψαθυρότητας-πλαστικότητας πετρώματος συναρτήσει του εντατικού πεδίου (Αναγνώστου 2006)

Η συνισταμένη δύναμη κοπής F , που αναπτύσσεται από την δράση – αντίδραση μεταξύ εργαλείου κοπής και πετρώματος αναλύεται σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων στις εξής συνιστώσες (βλέπε σχήμα 4.4).

1. Την δύναμη κοπής ή εφαπτομενική δύναμη F_C , που έχει διεύθυνση παράλληλη προς την διεύθυνση κίνησης του εργαλείου κοπής.
2. Την ορθή δύναμη F_N , που έχει διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση κίνησης του εργαλείου κοπής
3. Την πλευρική δύναμη F_s , που έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της ορθής και της εφαπτομενικής δύναμης

Από τις πιο πάνω δυνάμεις η μόνη δύναμη που παράγει έργο είναι η δύναμη κοπής F_s .



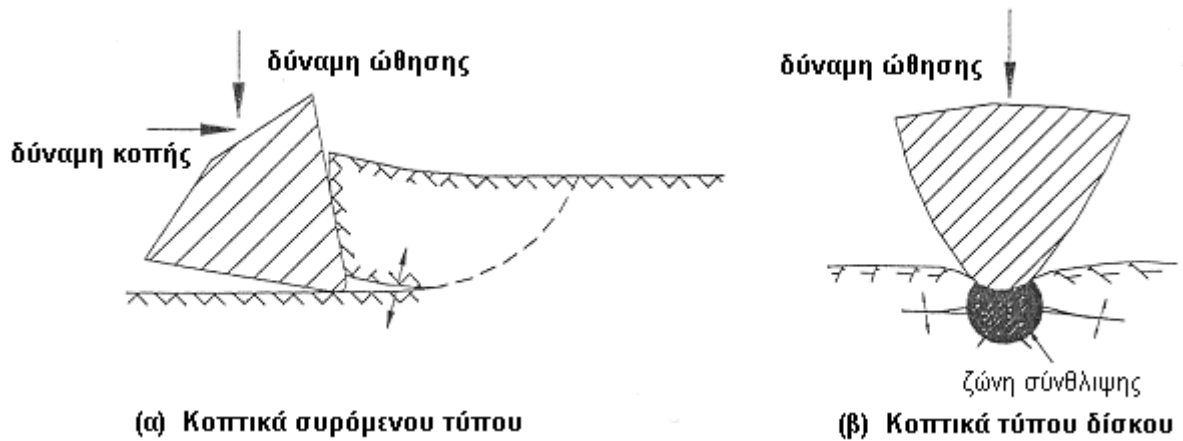
Σχήμα 4.4. Ανάλυση των δυνάμεων κατά την κοπή των πετρωμάτων

4.3. Κοπτικά εργαλεία

Υπάρχουν δύο κατηγορίες κοπτικών εργαλείων για την μηχανική όρυξη των πετρωμάτων. α) τα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου (drag picks) και β) τα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου (disc cutters).

Η διαφορά τους πέραν της γεωμετρίας τους βρίσκεται στον τρόπο προσβολής του πετρώματος και συνεπώς στον μηχανισμό αποσύνθεσης του. Για το λόγο αυτό αντιμετωπίζονται διαφορετικά από τις θεωρίες κοπής.

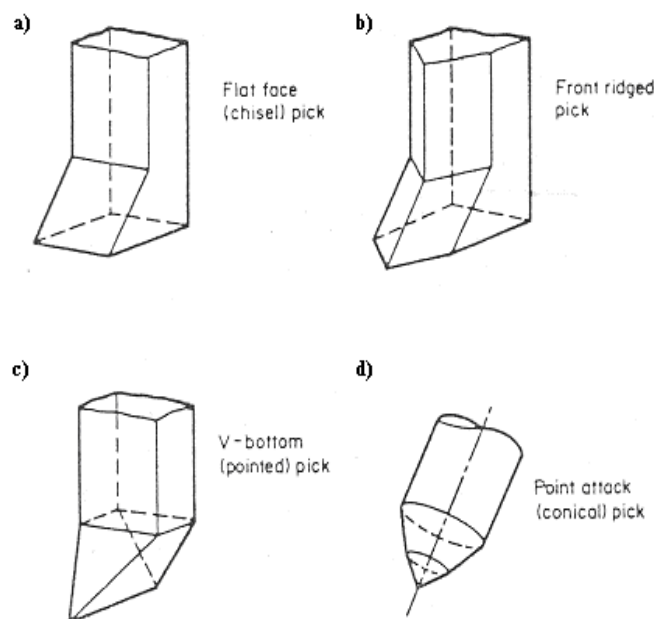
Τα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου θραύουν το πέτρωμα εφαρμόζοντας σε αυτό δύναμη η οποία είναι παράλληλη στην επιφάνεια του (δύναμη κοπής). Η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια του πετρώματος (ώθηση) διατηρεί το κοπτικό στο επιθυμητό βάθος κοπής. Αντίθετα στα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου η κύρια δύναμη που προκαλεί την θραύση του πετρώματος είναι η ώθηση. Οι δυνάμεις αυτές είναι σχεδιασμένες στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5. Δυνάμεις που προκαλούν θραύση του πετρώματος στα κοπτικά α) συρόμενου τύπου, β) τύπου δίσκου (Αναγνώστου 2006)

Τα κοπτικά συρόμενου τύπου διακρίνονται περαιτέρω σε:

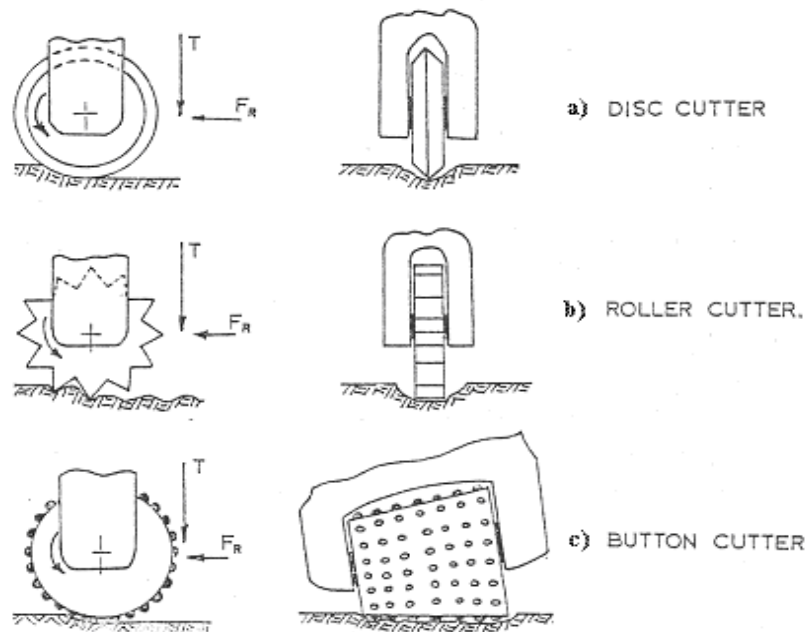
- α) κοπτικά τύπου σμίλης (chisel picks) και
- β) κοπτικά σημειακής προσβολής (point attack picks)



Σχήμα 4.6. Κοπτικά συρόμενου τύπου: a), b), c) κοπτικά τύπου σμίλης d) κοπτικό σημειακής προσβολής (Αναγνώστου 2006)

Τα κοπτικά τύπου δίσκου διακρίνονται περαιτέρω σε:

- α) κοπτικά δίσκου (disc cutters)
- β) κοπτικά οδοντωτού δίσκου (disc rollers ή roller cutters) και
- γ) κοπτικά περιστρεφόμενου τύμπανου με κομβία (button cutters)



Σχήμα 4.7. Κοπτικά τύπου δίσκου: α) κοπτικό δίσκου, β) κοπτικό οδοντωτού δίσκου, γ) κοπτικό περιστρεφόμενου τύμπανου με κομβία (Αναγνώστου 2006)

Μία γενική κατηγοριοποίηση της εφαρμογής του κάθε τύπου κοπτικού εργαλείου δίνεται στον πίνακα 4.1, που γίνεται βάσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος το οποίο μπορούν “αποτελεσματικά” να προσβάλλουν. Η αποτελεσματικότητα ενός κοπτικού έχει να κάνει τόσο με την απόδοση του (ενέργεια για την εξόρυξη μονάδας όγκου πετρώματος) όσο και με τη διατήρηση των χαρακτηριστικών του (γεωμετρία, μάζα) κατά τη διάρκεια της χρήσης του.

Γενικά τα κοπτικά συρόμενου τύπου είναι αποδοτικότερα έναντι των κοπτικών τύπου δίσκου. Αυτό οφείλεται στον αποδοτικότερο μηχανισμό με τον οποίο προκαλούν αστοχία στο πέτρωμα. Σε υψηλές όμως αντοχές του πετρώματος

φθείρονται ευκολότερα, χάνουν τα αρχικά τους χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν αποδοτικά και επομένως γίνονται μη αποτελεσματικά.

Πίνακας 4.1. Καταλληλότητα κοπτικών εργαλείων βάσει της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Αναγνώστου 2006)

Κοπτικό εργαλείο	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
Τύπου σφήνας	<20
Σημειακής προσβολής	<124
Τύπου δίσκου	5-310
Τύπου δίσκου με κομβία	>240

Στον πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι θεωρίες κοπής των πετρωμάτων σε σχέση με τον τύπο του κοπτικού που χρησιμοποιείται και την συμπεριφορά του πετρώματος που αντίστοιχα αντιμετωπίζουν.

Πίνακας 4.2. Θεωρίες κοπής πετρωμάτων

Θεωρία κοπής	Κοπτικό εργαλείο	Συμπεριφορά πετρώματος
Merchant	Συρόμενου τύπου (σμίλη)	πλαστική
Evans	Συρόμενου τύπου (σμίλη)	ψαθυρή
Nishimatsu	Συρόμενου τύπου (σμίλη)	ψαθυρή
Evans	Συρόμενου τύπου (σημειακής προσβολής)	ψαθυρή
Roxborough	Τύπου δίσκου	ψαθυρή
Ozdemir	Τύπου δίσκου	ψαθυρή
Sanio	Τύπου δίσκου	ψαθυρή

4.4. Κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου

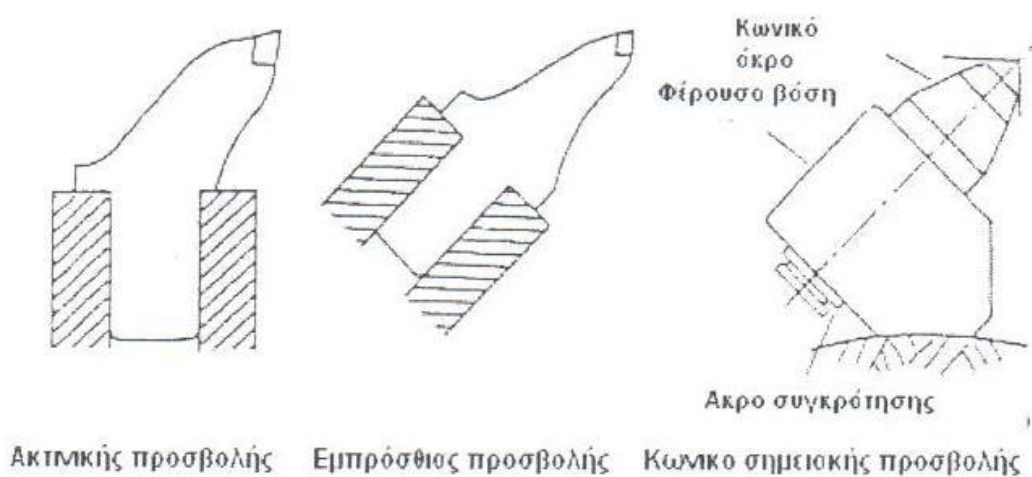
Τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου χρησιμοποιούνται σε όλα τα μηχανήματα εκσκαφής γαιάνθρακα και “μαλακών” πετρωμάτων και έχουν διάφορα σχήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Συνίσταται από ένα σώμα από χαλύβδινο κράμα με προσθήκη μιας κοπτικής ακμής από καρβίδιο του βολφραμίου.

Το κοπτικά σημειακής προσβολής είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σε παγκόσμια κλίμακα διότι έχει το πλεονέκτημα ότι το κοπτικό άκρο περιστρέφεται κατά τη χρήση διατηρώντας σταθερά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καθώς η επαφή με το πέτρωμα φθείρει το καρβίδιο και την περιβάλλουσα αυτό χαλύβδινη μήτρα.

Το ακτινικής προσβολής κοπτικό άκρο διατηρεί την ίδια επιφάνεια επαφής κοπτικού άκρου – πετρώματος γεγονός που, με την πρόοδο της φθοράς του αυξάνει την απαιτούμενη για την εκσκαφή δύναμη.

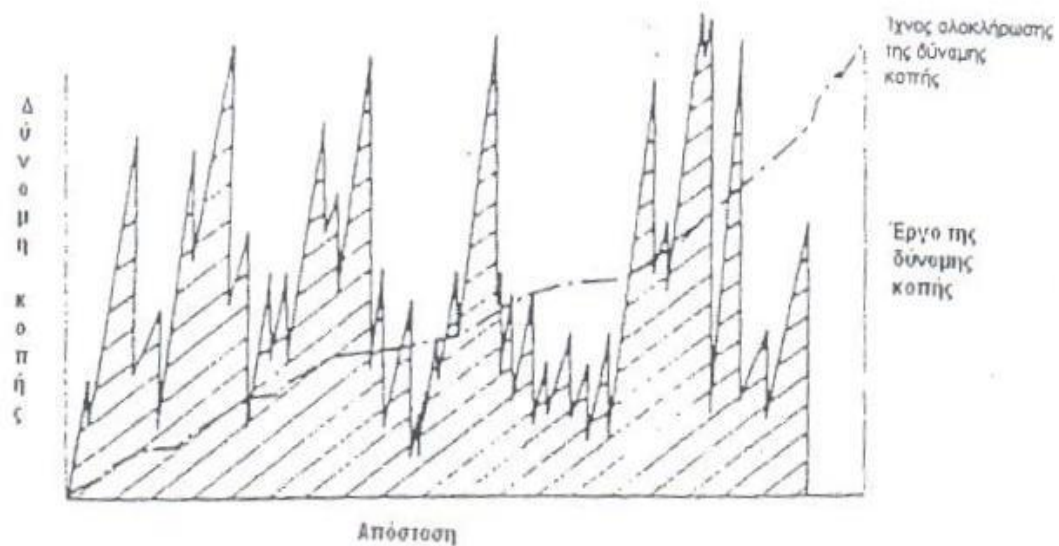
Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι ενός κοπτικού άκρου συρόμενου τύπου είναι:

- Οι δυνάμεις που απαιτούνται για την προώθηση του άκρου μέσα στο πέτρωμα σε δεδομένο βάθος
- Η ποσότητα εξορυγμένου πετρώματος και η διάρκεια ζωής του



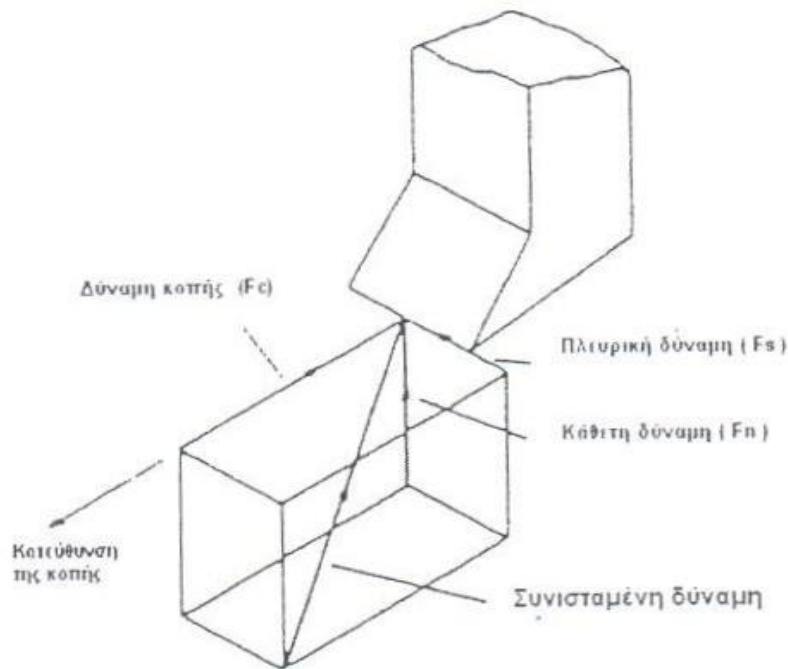
Σχήμα 4.8. Τύποι κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου (Αναγνώστου 2006)

Οι δυνάμεις που ασκούνται επί του κοπτικού παρουσιάζουν συχνές αλλαγές στο μέτρο τους λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς των περισσότερων πετρωμάτων. Το κοπτικό άκρο διεισδύει στο πέτρωμα μέχρι σχηματισμού ενός “κυρίως” θραύσματος. Δευτερογενής σύνθλιψη και δημιουργία θραυσμάτων λαμβάνουν επίσης χώρα κατά τη διάρκεια της κοπής.



Σχήμα 4.9. Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά Fowell (Αναγνώστου 2006)

Στο σχήμα 4.9 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα δύναμης κοπής – μετατόπισης κατά την κοπή με κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου σε σταθερό βάθος. Για την ασκούμενη επί του κοπτικού δύναμη, είναι συνήθης η ανάλυση σε τρεις ορθογωνικές συνιστώσες όπως αναλύονται στο σχήμα 4.10: τη δύναμη κοπής, τη δύναμη ώσης και τις πλευρικές συνιστώσες. Λόγω της μεταβλητής φύσης των δυνάμεων αυτών, οι συνιστώσες μπορούν να εκφραστούν με περισσότερους από έναν τρόπους.



Σχήμα 4.10. Οι συνιστώσες της δύναμης που ασκείται σε κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου

Για δεδομένο βάθος κοπής, η μέση συνισταμένη δύναμη είναι η μέση δύναμη που δρα κατά την κοπή και προσδιορίζεται ολοκληρώνοντας το μέτρο της ασκούμενης δύναμης και διαιρώντας με τον χρόνο κοπής. Οι μέσες δυνάμεις συνδέονται με την απαιτούμενη ισχύ ενός μηχανήματος που κάνει μηχανική εξόρυξη.

Μια διαφορετική διαγραμματική απεικόνιση από αυτήν που παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.9 αποτελεί η απεικόνιση του μέσου όρου των τοπικών μέγιστων που παρουσιάζει η δύναμη κοπής για μια δεδομένη κατάσταση κοπής. Η παραπάνω απεικόνιση είναι πολύ σημαντική για την επιλογή κοπτικού άκρου. Οι υψηλές τιμές στα τοπικά μέγιστα μπορούν να καταλήξουν σε θραύση της κοπτικής ακμής από καρβίδιο του βολφραμίου ή πρόσκληση βλάβης σε άλλα υποσυστήματα του μηχανήματος.

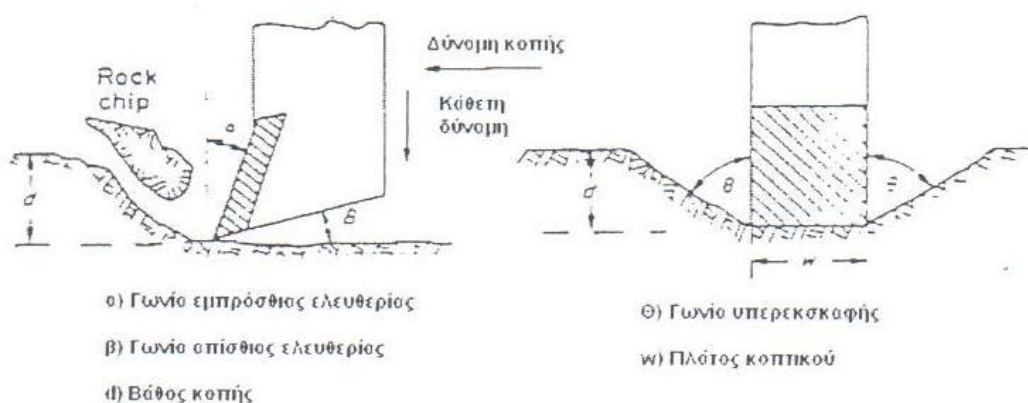
Μια πολύτιμη παράμετρος για τη μηχανική κοπή πετρωμάτων είναι η ειδική ενέργεια κοπής, η οποία είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη εκσκαφή ορισμένου όγκου πετρώματος. Η ειδική ενέργεια είναι ένα αντίστροφο μέτρο της

αποδοτικότητα της κοπής. Υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας υποδηλώνουν χαμηλή αποδοτικότητα της κοπής.

Κατά τη χρήση κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου ο κυρίαρχος μηχανισμός θραύσης του πετρώματος θεωρείται πως είναι η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων για ψαθυρά πετρώματα και η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων για πετρώματα με πιο πλαστική συμπεριφορά. Πρακτικά υφίστανται και οι δυο μηχανισμοί. Οι Evans, Nishimatsu, Roxborough και Deliac έχουν προτείνει μοντέλα που περιγράφουν το μηχανισμό αστοχίας του πετρώματος υπό τη δράση κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου. Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι πλέον συνήθεις μεταβλητές που αφορούν την κοπή με κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.

4.5. Σχέσεις που αφορούν τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου

Αν και υπάρχουν αρκετά κοπτικά άκρα με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (βλέπε σχήμα 4.11), όλα έχουν κοινό τύπο σε όρους σχέσεων με το βάθος κοπής, την εμπρόσθια γωνία κλίσης, την ταχύτητα κοπής και την απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων. Στο σχήμα 4.12 φαίνονται οι τυπικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών σε επίπεδες επιφάνειες πετρώματος.



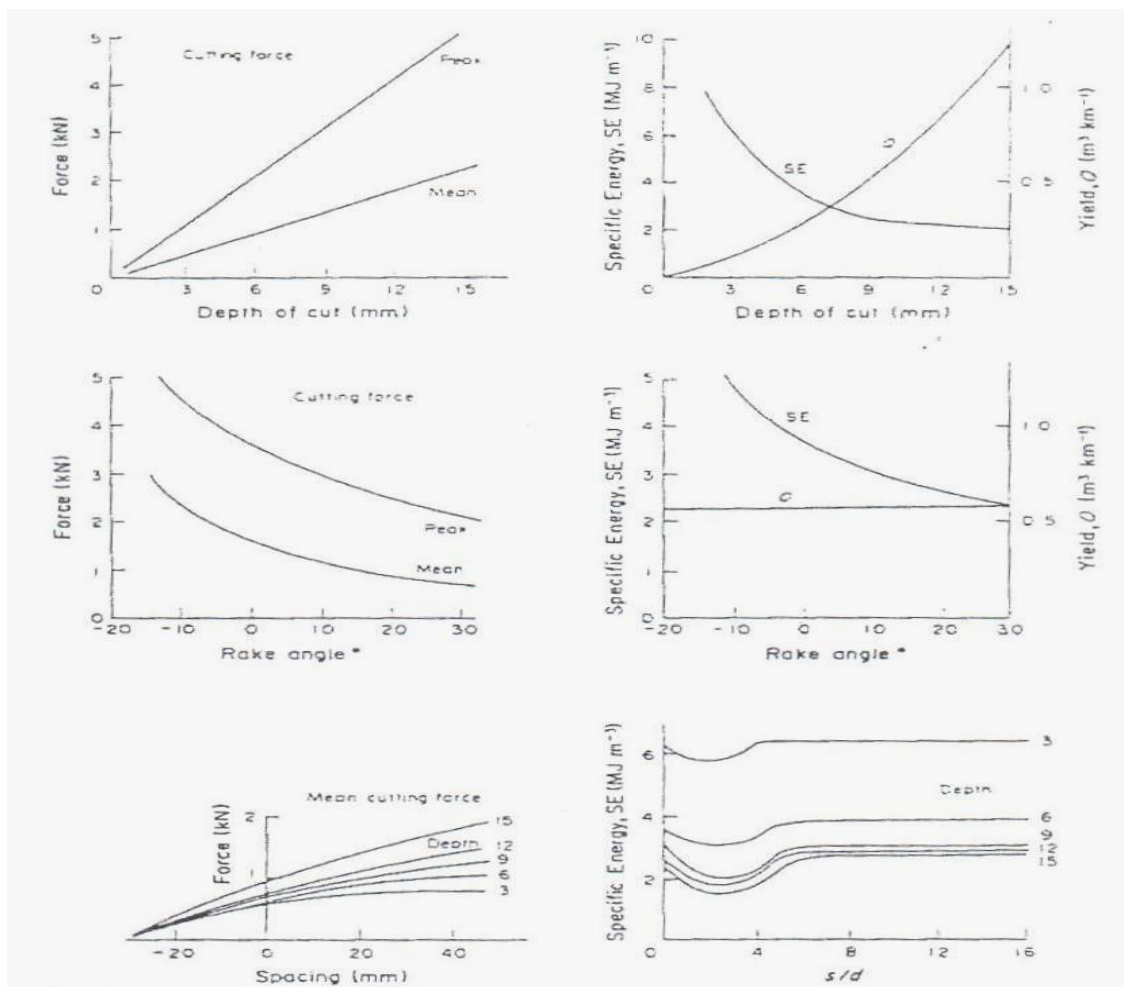
Σχήμα 4.11. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και δυνάμεις κοπτικών άκρων

Πίνακας 4.3. Σύμβολα και ορισμοί σε κοπτικά συρόμενου τύπου

Κοπτικά συρόμενου τύπου			
Σύμβολο	Παράμετρος	Μονάδα	Ορισμός
F_C	Δύναμη κοπής (cutting force)	kN	Δύναμη η οποία ασκείται στο κοπτικό παράλληλα προς τη διεύθυνση της κοπής. Η μοναδική δύναμη η οποία παράγει έργο.
F_N ή F_T	Κάθετη δύναμη ή ώθηση (normal-thrust force)	kN	Δύναμη η οποία ασκείται στο κοπτικό κάθετα προς τη διεύθυνση της κοπής. Αντιστοιχεί στην ώθηση που διατηρεί το κοπτικό στο επιθυμητό βάθος κοπής.
F_L ή F_S	Πλάγια δύναμη (lateral-sideways force)	kN	Δύναμη η οποία ασκείται στο πέτρωμα από τα πλευρικά τοιχώματα του κοπτικού. Έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζουν οι δύο προηγούμενες δυνάμεις
α	γωνία εμπρόσθιας ελευθερίας (rake angle)	ακτίνια	Γωνία που σχηματίζεται από την κάθετο στην διεύθυνση της κοπής και την εμπρόσθια επιφάνεια του κοπτικού. Επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των δυνάμεων κατά την κοπή.
β	γωνία οπίσθιας ελευθερίας (clearance angle)	ακτίνια	Γωνία που σχηματίζεται από την οριζόντιο και την κάτω επιφάνεια του κοπτικού. Σκοπός της είναι να μην τριβεται η κάτω επιφάνεια του κοπτικού με το πέτρωμα.
ω	γωνία υπερεκσκαφής (breakout angle)	ακτίνια	Γωνία που σχηματίζεται από την πλευρική επιφάνεια του κοπτικού και την επιφάνεια υπερεκσκαφής του πετρώματος.

Αφού ένα κοπτικό άκρο έχει διεισδύσει σε βάθος περίπου 5 mm οι δυνάμεις αυξάνονται σχεδόν γραμμικά σε σχέση με το βάθος τόσο για τη συνιστώσα της μέσης δύναμης όσο και για τη συνιστώσα του μέσου όρου των μέγιστων τιμών. Η συνιστώσα της μέσης δύναμης παίρνει τιμές που ισούνται με το ένα τρίτο έως το μισό της συνιστώσας του μέσου όρου των μέγιστων τιμών για κοπτικά άκρα που δεν έχουν υποστεί φθορά. Με την έναρξη της φθοράς η κάθετη δύναμη (δύναμη ώσης) αυξάνει με ταχύτερους ρυθμούς απ' ότι η δύναμη κοπής και ενδέχεται να φτάσει να έχει πολλαπλάσια τιμή από την κάθετη δύναμη για άφθαρτο κοπτικό άκρο.

Ο όγκος των παραγόμενων θραυσμάτων για συνεχή κοπή αυξάνεται με ρυθμούς τετραγωνικής συνάρτησης, ως εκ τούτου η ειδική ενέργεια μειώνεται με την αύξηση του βάθους κοπής. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου να λαμβάνουν ένα εύλογο βάθος κοπής για το κυρίως τμήμα του κύκλου της κοπής διαφορετικά παρουσιάζεται το φαινόμενο της μη αποδοτικής τριβής του κοπτικού άκρου με το πέτρωμα η οποία, το φθείρει σε πολύ σύντομο χρόνο.



Σχήμα 4.12. Τυπικές σχέσεις για κοπτικό συρόμενου τύπου κατά Fowell (Αναγνώστου 2006)

Φαίνεται η επιρροή των παρακάτω παραμέτρων: α) Βάθος κοπής, β) Εμπρόσθια γωνία κλίσης και γ) Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών

4.5.1. Ταχύτητα κοπής

Η ταχύτητα κοπής έχει διαπιστωθεί ότι δεν επηρεάζει το μέτρο των ασκούμενων στο κοπτικό δυνάμεων δεδομένου όμως του αποκλεισμού της επίδρασης της φθοράς. Η ταχύτητα θραύσης του πετρώματος είναι κατά πολύ υψηλότερη από τις ταχύτητες κοπής των μηχανημάτων εκσκαφής. Ο ρυθμός φθοράς των κοπτικών άκρων αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Αυτός είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη όταν δουλεύουμε σε σκληρά αποξεστικά πετρώματα.

4.5.2. Εμπρόσθια γωνία κλίσης (Front rake angle)

Οι συνιστώσες της δύναμης αυξάνονται με τη μείωση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης του κοπτικού άκρου. Υψηλότερες τιμές δυνάμεων έχουν καταγραφεί για κοπτικά με αρνητική εμπρόσθια γωνία κλίσης. Η αρνητική εμπρόσθια γωνία κλίσης χρησιμοποιείται στην πράξη για τη διαμόρφωση ενός ισχυρού γεωμετρικού σχήματος του καρβιδίου, το οποίο θα έλθει σε επαφή με το πέτρωμα. Οι υψηλές θετικές τιμές της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης αν και μας διασφαλίζουν μικρότερες απαιτήσεις σε δύναμη για την κοπή του πετρώματος, καθιστά το κοπτικό επιρρεπές σε θραύση της κοπτικής ακμής του καρβιδίου. Συνεπώς υψηλές θετικές τιμές της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης χρησιμοποιούνται μόνο σε κοπτικά άκρα μηχανημάτων που εκσκάπτουν γαιάνθρακα ή πολύ μαλακά πετρώματα.

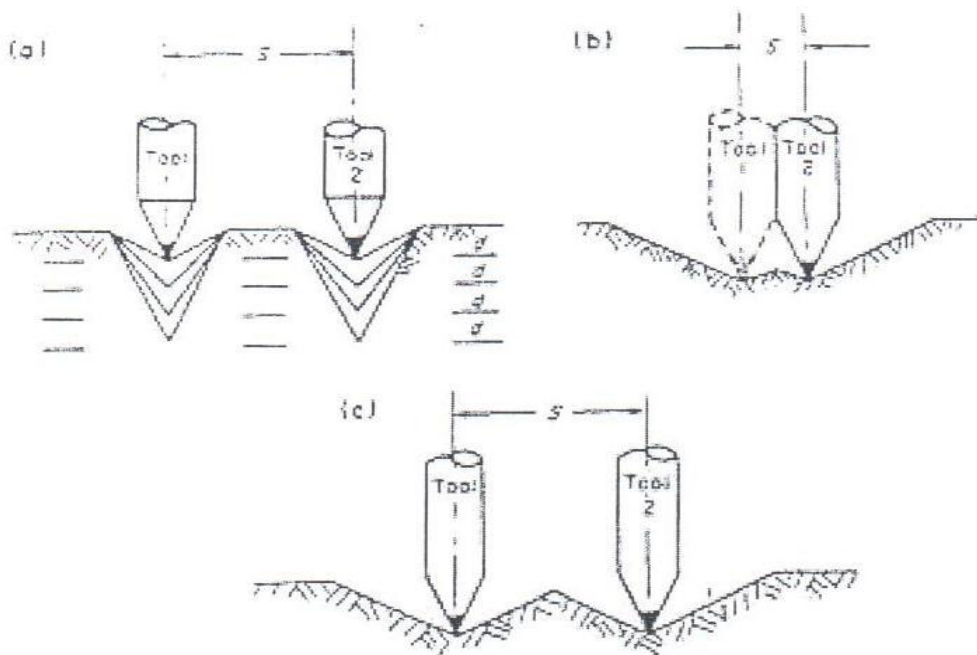
4.5.3. Οπίσθια γωνία ελευθερίας (Back clearance angle)

Η επίδραση της οπίσθιας γωνίας ελευθερίας του κοπτικού έχει διαπιστωθεί ότι δεν έχει καμία επίδραση στη δύναμη κοπής, δεδομένου του ότι έχει τιμή τουλάχιστον 10° και η επίδραση που έχει για τιμές ανάμεσα σε 5° έως 10° είναι πολύ μικρή.

4.5.4. Απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κοπτικών άκρων

Πρακτικά, η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κοπτικών άκρων είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας για την εξόρυξη με μηχανικά μέσα. Τα κοπτικά άκρα ενός μηχανήματος είναι διατεταγμένα έτσι ούτως ώστε να κόβουν διαδοχικά. Τα προηγούμενα κατά σειρά κοπτικά άκρα προετοιμάζουν το πέτρωμα και μειώνουν τις δυνάμεις που απαιτούνται σε σύγκριση με την κοπή υπό συνεχείς συνθήκες.

Υπάρχουν τρεις τρόποι διάταξης διαδοχικών κοπτικών άκρων για δεδομένο βάθος κοπής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κοπτικών άκρων σημαίνει ότι τα κοπτικά άκρα δεν αλληλεπιδρούν. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία μιας αύλακας, η οποία σταδιακά βαθαίνει οδηγώντας στον σχηματισμό ενός στύλου πετρώματος ανάμεσα σε δυο διαδοχικές αύλακες. Η δημιουργία και η εκβάθυνση αυλακών κατά την κοπή απαιτεί την άσκηση ισχυρών δυνάμεων και ως εκ τούτου αυξάνει την τιμή της ειδικής ενέργειας.



Σχήμα 4.13. Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων κατά Fowell (Αναγνώστου 2006)

α) πολύ μεγάλη απόσταση, β) πολύ μικρή απόσταση και γ) ιδανική απόσταση

Ο δεύτερος δυνατός τρόπος είναι τα δυο διαδοχικά κοπτικά να έχουν πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους. Δεδομένης αυτής της κατάστασης το κοπτικό άκρο εξορύσσει μόνο ένα πολύ μικρό κομμάτι πετρώματος, οι τιμές ειδικής ενέργειας παρουσιάζονται υψηλές και η λειτουργία του κοπτικού άκρου κρίνεται μη αποδοτική.

Για δεδομένο βάθος κοπής, καθώς μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων, οι απαιτούμενες δυνάμεις αυξάνονται έως ότου λάβουν μια μέγιστη τιμή, η οποία αντιστοιχεί στην κοπή χωρίς την αλληλεπίδραση των κοπτικών. Η ποσότητα θραυσμάτων που παράγεται αυξάνει με την αύξηση της απόστασης παίρνοντας μέγιστη τιμή όταν η αλληλεπίδραση μεταξύ διαδοχικών αυλακών είναι έντονη και στην συνέχεια ακολουθεί πτωτική πορεία όπου στο τέλος λαμβάνει μια τυπική τιμή, η οποία συνδέεται με την κοπή χωρίς την αλληλεπίδραση των κοπτικών.

Η ειδική ενέργεια, ούσα το πηλίκο της μέσης ασκούμενης δύναμης δια την ποσότητα θραυσμάτων που παράγονται, λαμβάνει μια ελάχιστη τιμή. Η ελάχιστη αυτή τιμή έχει βρεθεί ότι κυμαίνεται σε μια αναλογία απόστασης – βάθους κοπής περίπου 1:2 για όλα τα δοκιμασμένα βάθη κοπής.

Κοπτικά άκρα διατεταγμένα σε μια περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή, η οποία προσβάλλει εγκάρσια το πέτρωμα, θα κόβουν ρηχά αρχικά αυλάκια που στη συνέχεια θα λαμβάνουν μέγιστο βάθος και τέλος το βάθος κοπής θα ελαττώνεται στο μηδέν καθώς το κοπτικό άκρο αφήνει το αυλάκι.

4.6. Σχεδιασμός κοπτικής κεφαλής ή τυμπάνου

Οι κοπτικές κεφαλές είναι εξοπλισμένες με κοπτικά άκρα διατεταγμένα υπό μορφή σπειρών για να προβάλλουν μια λογική αλληλουχία κοπτικών στο πέτρωμα και επιπλέον να απομακρύνουν τα θραύσματα από το μέτωπο της κοπής.

Έχει διαπιστωθεί ότι είναι σημαντικό τα κοπτικά να είναι διατεταγμένα έτσι ώστε να αποφεύγονται διακυμάνσεις στην απαιτούμενη ροπή και τις απαιτούμενες δυνάμεις που δρουν οριζόντια και κάθετα στην κοπτική κεφαλή ή τύμπανο.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αθροίζοντας όλες τις συνιστώσες της δύναμης για κάθε κοπτικό άκρο σε κάθε βαθμίδα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής. Υπάρχουν εξειδικευμένα προγράμματα που κάνουν τους συγκεκριμένους υπολογισμούς και παρέχουν πρότυπα εκσκαφής για δεδομένο σχεδιασμό κοπτικής κεφαλής.

Μια καλοσχεδιασμένη κοπτική κεφαλή, θα παρουσιάζει ισοκατανεμημένη επιφάνεια για κάθε κοπτικό άκρο και οι συνιστώσες της ροπής και των δυνάμεων επί της κεφαλής θα πρέπει να μην παρεκκλίνουν σημαντικά.

Αδυναμία εφαρμογής των παραπάνω θα έχει ως αποτέλεσμα ανάπτυξη δονήσεων και χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής λόγω ανισοκατανομής έργου στα κοπτικά άκρα. Τα κοπτικά άκρα επιφορτισμένα με την πλειονότητα του έργου θα φθαρούν σύντομα ενώ τα λιγότερα φορτισμένα κοπτικά άκρα θα αναλώνονται σε ανεπαρκή τριβή με το πέτρωμα χωρίς να επιτυγχάνουν αποτελεσματική κοπή.

Για δεδομένες συνθήκες κοπής, η κοπτική κεφαλή θα πρέπει να σχεδιαστεί με γνώμονα τις χειρότερες πιθανές συνθήκες. Σε μαλακά πετρώματα μπορεί να υιοθετηθεί το πρότυπο της βαθιάς διείσδυσης του κοπτικού άκρου στο πέτρωμα με ταυτόχρονη αύξηση της απόστασης μεταξύ δυο κοπτικών άκρων. Για σκληρότερα πετρώματα, απαιτείται μικρότερη απόσταση των κοπτικών και συνήθως η δεύτερη σειρά κοπτικών άκρων εκσκάπτει ανάμεσα στα αυλάκια που δημιουργούνται από την πρώτη σειρά καθώς έχει αποδειχτεί πως είναι προτιμότερη αυτή η προσέγγιση από το να επαναλαμβάνεται το κοπτικό της πρώτης σειράς.

4.7. Κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου υποβοηθούμενα από εκτοξευτήρες νερού υψηλής πίεσης

Η πρόσθεση εκτοξευτήρων νερού υψηλής πίεσης για υποβοήθηση του κοπτικού έργου έχει διερευνηθεί και έχει αποδειχθεί αποτελεσματική.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος είναι:

- Ψύξη των κοπτικών
- Βελτίωση της διάρκειας ζωής των κοπτικών άκρων
- Απομάκρυνση των θραυσμάτων από το μέτωπο της κοπής
- Μείωση στις δονήσεις της κοπτικής κεφαλής
- Μείωση των επιπέδων έκλυσης σκόνης στο μέτωπο
- Υπό συγκεκριμένες συνθήκες μείωση των απαιτούμενων για την κοπή δυνάμεων

Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα όσον αφορά τη μείωση της φθοράς των κοπτικών άκρων επιτυγχάνονται για πιέσεις της τάξης των 20 – 30 MPa και εξετάζεται κατά πόσον η βελτιωμένη απόδοση της κοπής και η μειωμένη φθορά των κοπτικών αντισταθμίζουν το κόστος παροχής της υψηλής πίεσης. Η φθορά του πατώματος της εκσκαφής λόγω υπερβολικής ποσότητας νερού στο μέτωπο είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να συνυπολογιστεί ειδικά εάν το μηχάνημα που εκτελεί την κοπή είναι ερπυστριοφόρο.

Τα ακροφύσια μπορούν να τοποθετηθούν μπροστά από το κοπτικό άκρο ή πίσω από αυτό. Τα ακροφύσια που είναι τοποθετημένα πίσω από τα κοπτικά χρησιμοποιούνται για να ψύχουν το υλικό στην αύλακα, όπου υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης από πιθανή διαρροή αερίου μεθανίου κατά την όρυξη γαιανθράκων. Για όλες τις υπόλοιπες εφαρμογές προτιμάται η τοποθέτηση των ακροφύσιων μπροστά από τα κοπτικά άκρα.

4.8. Υλικά κατασκευής κοπτικών συρόμενου τύπου και φθορά αυτών

Σχεδόν το σύνολο των κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου είναι εξοπλισμένα με κοπτική ακμή από καρβίδιο βολφραμίου αν και άλλα υλικά έχουν δοκιμαστεί ως εναλλακτικές. Τα συνθετικά διαμάντια αναπτύσσονται δυναμικά αλλά, λόγω του υψηλού κόστους τους, δύσκολα θα ανταγωνιστούν το καρβίδιο του βολφραμίου.

Γενικά υπάρχει ανάγκη για χρήση νέων υλικών για την κατασκευή κοπτικών που θα έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν μεγαλύτερες δυνάμεις από την κοπτική κεφαλή στο πέτρωμα. Οι επιθυμητές ιδιότητες για ένα τέτοιο υλικό είναι:

- Σκληρότητα για αντίσταση στην αποξεστική δράση του πετρώματος
- Αντοχή για την αποφυγή αστοχίας στα υψηλά φορτία
- Καλή εν θερμώ σκληρότητα για τη διατήρηση της σκληρότητας του κοπτικού σε υψηλές θερμοκρασίες

4.8.1. Καρβίδιο του βολφραμίου

Το καρβίδιο του βολφραμίου συντίθεται από κόκκους καρβιδίου του βολφραμίου πακτωμένους σε μια μήτρα από κοβάλτιο. Έχει γίνει απόπειρα χρησιμοποίησης και άλλων υλικών ως μήτρες αλλά το κοβάλτιο παραμένει το μοναδικό υλικό που χρησιμοποιείται έως σήμερα. Επίσης προσπάθειες έχουν γίνει για την προσθήκη καρβιδίων άλλων υλικών όπως το ταντάλιο και το τιτάνιο αλλά η χρήση τους περιορίζεται κυρίως στην κοπή μετάλλων. Για την κοπή πετρωμάτων, το κατά βάρος ποσοστό του κοβαλτίου είναι μια σημαντική μεταβλητή. Τυπικές τιμές κυμαίνονται από 7% έως 15% με τιμές για γενική χρήση γύρω στο 10%. Μείωση του ποσοστού του κοβαλτίου αυξάνει τη σκληρότητα του καρβιδίου και συνεπώς βελτιώνει τη συμπεριφορά του στο φαινόμενο της απόξεσης. Αύξηση του ποσοστού του κοβαλτίου αυξάνει την αντοχή του καρβιδίου, σε βάρος της αντοχής του φυσικά (σχήμα 4.14). Στην πράξη υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που συνυπολογίζονται όπως το μέγεθος και η κατανομή των κόκκων του καρβιδίου, η ύπαρξη ακαθαρσιών στο κρυσταλλικό του πλέγμα και η περιεκτικότητα του σε άνθρακα.

Το καρβίδιο του βολφραμίου λαμβάνεται από σεελίτη ή βολφραμίτη και επεξεργάζεται έως ότου πάρει μορφή σκόνης. Η έλλειψη ακαθαρσιών και ο ποιοτικός έλεγχος του προϊόντος είναι απαραίτητα για την αξιοπιστία του. Οι σκόνες κοβαλτίου και καρβιδίου λειοτριβούνται μαζί για να διαμορφωθεί ισοκατανομή των κόκκων στο σύνολο της μάζας της κοπτικής ακμής. Στη συνέχεια οι σκόνες “πρεσάρονται” στο

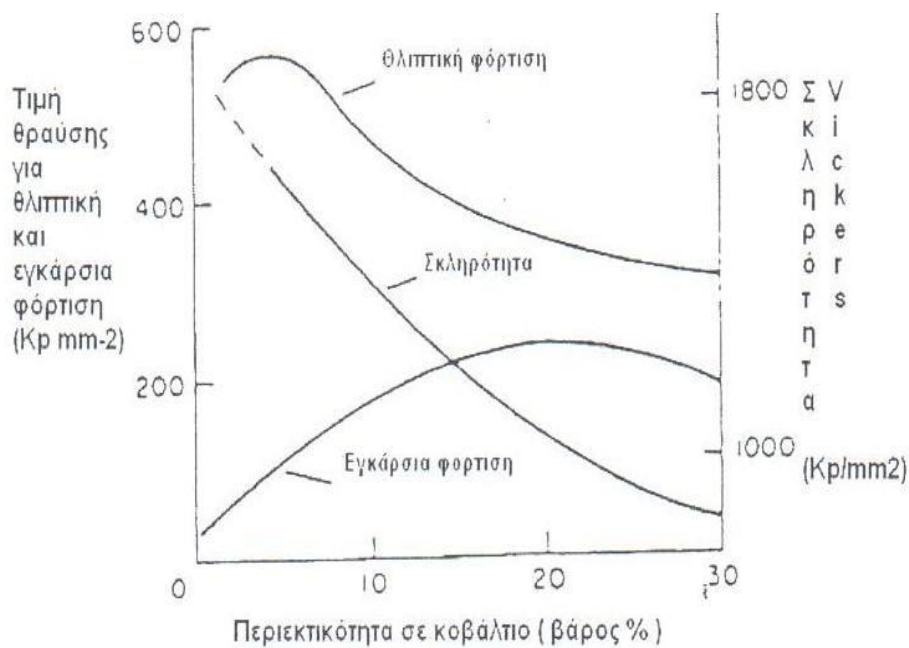
τελικό γεωμετρικό σχήμα της κοπτικής ακμής επιτρέποντας βέβαια μια γραμμική συστολή της τάξης του 20% που θα λάβει χώρα κατά τα στάδια της πυροσυσσωμάτωσης των δυο υλικών.

Κατά την πυροσυσσωμάτωση, οι ακμές υποβάλλονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε αδρανές περιβάλλον όπου κατά την ψύξη παράγεται η τελειοποιημένη κοπτική ακμή από καρβίδιο του βολφραμίου έτοιμη να συγκολληθεί στη χαλύβδινη μήτρα και να σχηματίσει το τελειωμένο πλέον κοπτικό άκρο.

Διακυμάνσεις στη διαδικασία παραγωγής μπορούν να παράξουν διαστρωματωμένο καρβίδιο που έχει κάποια επιπλέον θετικά χαρακτηριστικά:

- Ένα σκληρό εξωτερικό στρώμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε καρβίδιο που προσφέρει αντοχή στην απόξεση
- Ένα μεγάλης αντοχής υποστηρικτικό στρώμα
- Ένας σκληρός πυρήνας

Αυτού του τύπου το καρβίδιο έχει βρει εφαρμογή ως υλικό για πρεσαριστά κομβία και εξετάζεται η πιθανή χρήση του για κατασκευή κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου.



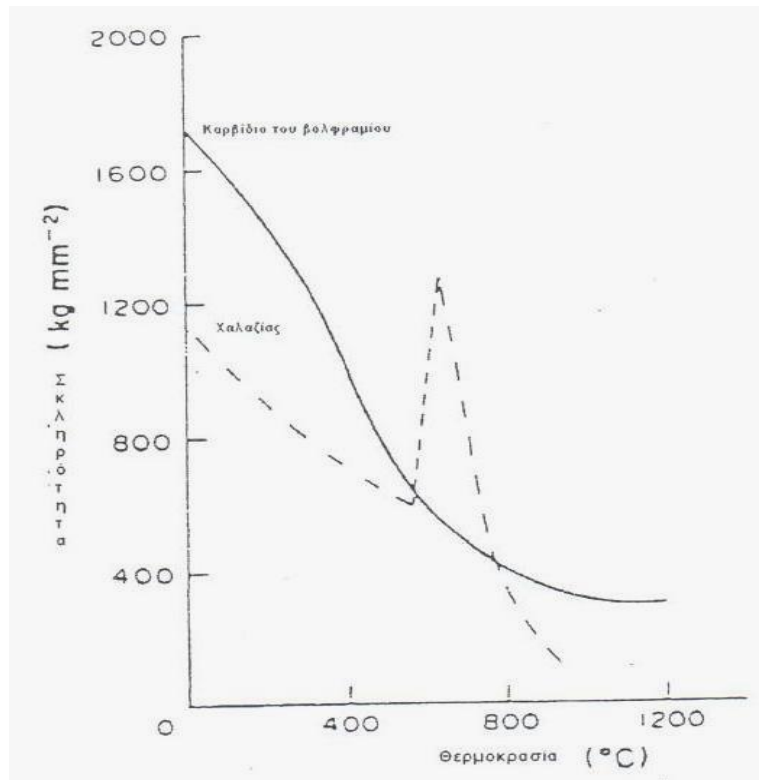
Σχήμα 4.14. Παράγοντες που επηρεάζονται από την περιεκτικότητα σε κοβάλτιο

4.8.2. Οι μηχανισμοί φθοράς

Όλα τα κοπτικά άκρα υπόκεινται σε μια μορφή φθοράς. Οι πλέον προφανείς μορφές είναι η απόξεση, ο σχηματισμός ρωγμών λόγω υψηλών θερμοκρασιών, η θραύση λόγω ανάπτυξης υπερβολικών τάσεων αν και, υπάρχουν και αρκετές άλλες μορφές φθοράς που διαδραματίζουν ρόλο κατά τη διάρκεια της μηχανικής εκσκαφής. Η φθορά λόγω απόξεσης μπορεί να ειπωθεί ως μικροεπεξεργασία της επιφάνειας του κοπτικού από τους κόκκους του πετρώματος. Αυτή η μορφή φθοράς έχει ως κατάληξη το σχηματισμό μιας επίπεδης φθαρμένης επιφάνειας στην κοπτική ακμή του κοπτικού άκρου, η οποία αυξάνει τις απαιτούμενες δυνάμεις για την κοπή σε συγκεκριμένο βάθος.

Για να είναι ανθεκτικό στην απόξεση, το κοπτικό θα πρέπει να έχει υψηλή σκληρότητα την οποία θα διατηρεί και στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κοπής.

Το καρβίδιο του βολφραμίου, αν και θεωρείται ότι παρουσιάζει αρκετά καλή σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζει μια πτώση στη σκληρότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας σε σημείο που η σκληρότητα του χαλαζία είναι η ίδια με του καρβιδίου στους 400 °C όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.15. Συνεπώς γρήγορη φθορά των επιμέρους θερμών σημείων είναι αναμενόμενη. Η ψύξη του κοπτικού με νερό είναι επομένως ευεργετική δεδομένου ότι μπορεί να αποφευχθεί το θερμικό σοκ.



Σχήμα 4.15. Σκληρότητα καρβιδίου του βολφραμίου και χαλαζία συναρτήσει της θερμοκρασίας (Αναγνώστου 2006)

Η ταχύτητα του κοπτικού άκρου είναι ένας σημαντικός παράγοντας αφού η συσσώρευση θερμότητας στο κοπτικό είναι συνάρτηση της δύναμης που μεταφέρεται μέσω αυτού στο πέτρωμα, δηλαδή των δυνάμεων που ασκούνται στο κοπτικό, και της ταχύτητας κίνησης του. Η θερμότητα που δημιουργείται κατά την εκσκαφή, δεν απομακρύνεται μέσω των θραυσμάτων όπως συμβαίνει με την κοπή των μετάλλων, αλλά συσσωρεύεται στο κοπτικό άκρο. Τα φυσικά διαμάντια υφίστανται γραφίτιωση στους 600 °C και ως εκ τούτου δεν είναι κατάλληλο υλικό για την κοπτική ακμή των κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου.

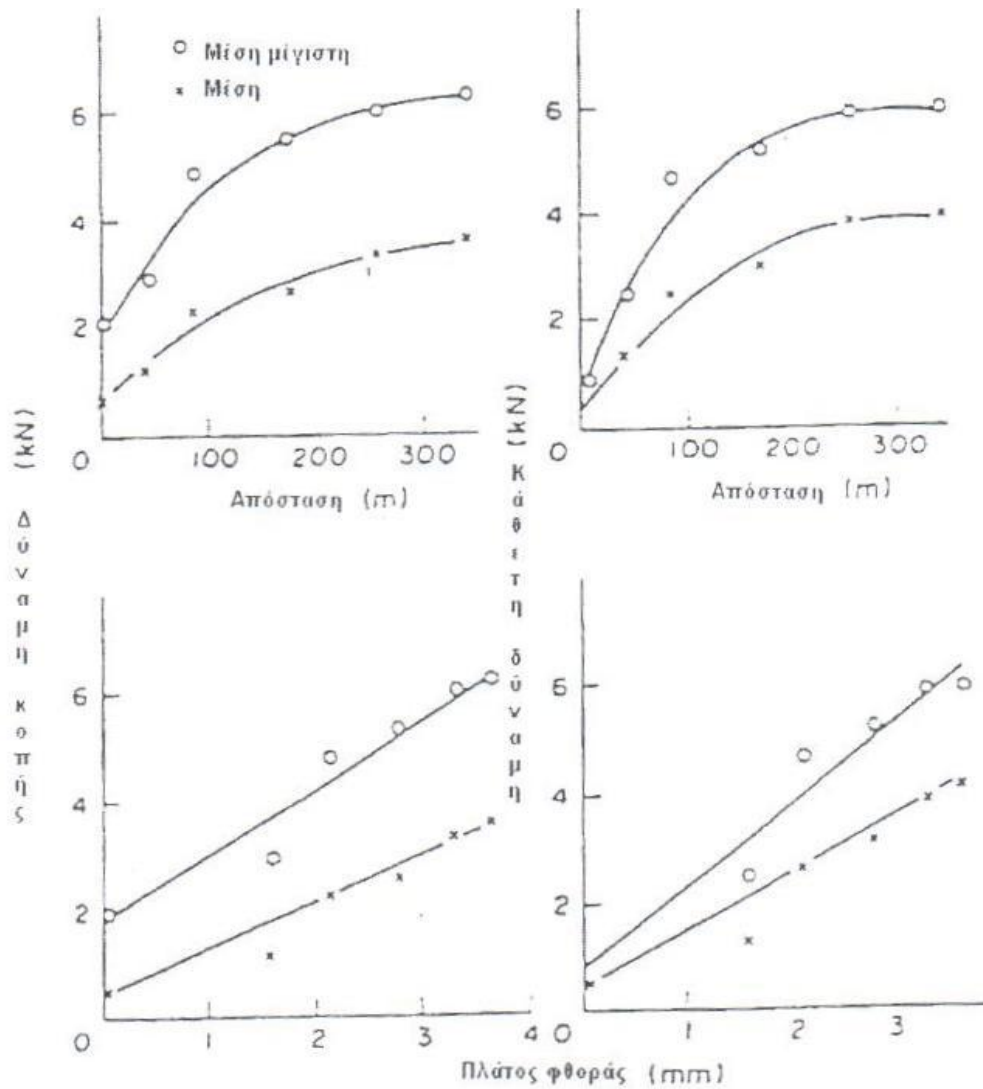
Για την κοπή ιδιαίτερα αποξεστικών πετρωμάτων, μικρές ταχύτητες κοπής σε συνδυασμό με υδρόψυξη των κοπτικών άκρων συμβάλλουν σημαντικά στην οικονομικότητα της εκσκαφής και θεωρούνται απαραίτητες συνθήκες.

Για πετρώματα με μικρή αποξεστική δράση, η θερμική κόπωση μπορεί να παρουσιαστεί ως μικρορωγμές στην επιφάνεια του κοπτικού άκρου. Το φαινόμενο

αυτό λαμβάνει χώρα λόγω της επαναλαμβανόμενης αύξησης και πτώσης της θερμοκρασίας του καρβιδίου κατά την κοπή.

Η θραύση του κοπτικού συνήθως είναι απόρροια της πρόσκρουσης του σε ανθεκτικό πέτρωμα, αν και θραύση μπορεί να επέλθει και από τη διεύρυνση των ρωγμών που προκαλούνται από τη θερμική κόπωση του κοπτικού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού άκρου, καθώς και η σύσταση του θα πρέπει να αναθεωρηθούν σε περίπτωση που η θραύση είναι συχνό φαινόμενο. Αύξηση του μεγέθους των κόκκων του καρβιδίου καθώς και της περιεκτικότητας της κοπτικής ακμής σε κοβάλτιο είναι τα ενδεικνύόμενα μέτρα.

Από πρακτικής απόψεως, ο τύπος καρβιδίου που επιλέγεται είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε σκληρότητα και αντοχή. Η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού άκρου είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Καθώς το κοπτικό άκρο φθείρεται, οι απαιτούμενες για την κοπή δυνάμεις αυξάνονται επίσης. Η συνιστώσα της κάθετης δύναμης αυξάνεται έως και τέσσερις φορές σε σχέση με την αντίστοιχη για άφθαρτο κοπτικό άκρο (βλέπε σχήμα 4.16). Το μηχάνημα που εκτελεί την κοπή θα πρέπει να έχει ικανή ισχύ προκειμένου να διατηρήσει το βάθος της κοπής σταθερό με την πρόοδο της φθοράς των κοπτικών άκρων.



Σχήμα 4.16. Διαγράμματα δύναμης κοπής και κάθετης δύναμης συναρτήσει του πλάτους φθοράς του κοπτικού και της απόστασης

Οι λατομικές, μεταλλευτικές και χωματουργικές εταιρείες που χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για την εξόρυξη του πετρώματος επιβαρύνονται με ένα πολύ υψηλό και σημαντικό κόστος εξαιτίας της φθοράς που υφίσταται το κοπτικό από τα πετρώματα. Το κόστος αυτό αποτελεί στοιχείο του λειτουργικού κόστους του μηχανήματος.

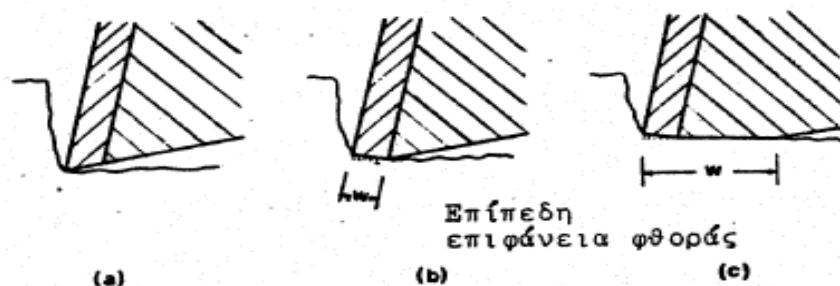
Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η εξόρυξη, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην διαμόρφωση του μηχανισμού και του βαθμού φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εξόρυξη, αν δηλαδή είναι συνεχούς εκσκαφής τότε η φθορά των κοπτικών θα είναι μεγαλύτερη από ότι θα ήταν, αν η εκσκαφή για το ίδιο πέτρωμα δεν ήταν συνεχής.

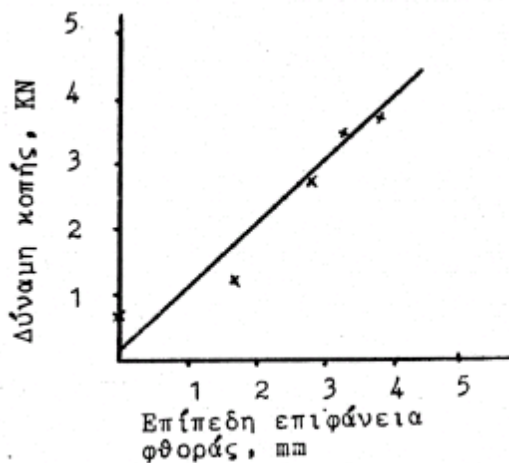
Η φθορά λόγω τριβής με το πέτρωμα εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τις δυνάμεις που ασκούνται επί του κοπτικού
- Την ταχύτητα κοπής
- Την σύσταση και μεταλλουργία του κοπτικού εργαλείου
- Την σκληρότητα του εξορυσσόμενου πετρώματος
- Την φθοροποιό ικανότητα του εξορυσσόμενου πετρώματος

Από μελέτη διαπιστώνεται ότι η κύρια επίπτωση της φθοράς στο κοπτικό εργαλείο είναι η απομάκρυνση ενός πρίσματος μετάλλου από την κάτω επιφάνεια του κοπτικού και η δημιουργία μιας επιφάνειας πλάτους W που δείχνεται στο σχήμα 4.17. Η επιφάνεια αυτή σχηματίζει μια αρνητική γωνία οπίσθιας ελευθερίας και το θραυσμένο πέτρωμα, που εγκλωβίζεται στην περιοχή αυτή, αυξάνει λόγω τριβών την δύναμη κοπής.



Σχήμα 4.17. Διαδοχικές φάσεις δημιουργίας επίπεδης επιφάνειας φθοράς σε κοπτικό εργαλείο τύπου σφήνας



Σχήμα 4.18. Επίδραση της επίπεδης επιφάνειας φθοράς του κοπτικού εργαλείου στην δύναμη κοπής

Το κοπτικό εργαλείο θα πρέπει να αυξήσει σημαντικά την δύναμη κοπής εάν στην ακμή του κοπτικού εργαλείου δημιουργηθεί ελάχιστη επίπεδη επιφάνεια.

Η φθορά λόγω της αποκόλλησης τεμαχίων μετάλλου από το κοπτικό εργαλείο είναι συνάρτηση της σκληρότητας του εξορυσσόμενου πετρώματος και του τρόπου προσβολής του πετρώματος. Κατά την εξόρυξη των πετρωμάτων με μηχανήματα συνεχούς εξόρυξης παρατηρείται τέτοιας μορφής φθορά στα κοπτικά εργαλεία των κοπτικών κεφαλών ή των κάδων, όταν κατά την περιστροφή τους προσκρούουν σε σκληρές ενστρώσεις πετρωμάτων που απαντώνται στους σχηματισμούς που εξορύσσονται.

Ρωγμάτωση λόγω υπερθέρμανσης έχει παρατηρηθεί σε κοπτικά εργαλεία, που εξορύσσουν πολύ σκληρούς σχηματισμούς. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 600° C έχουν μετρηθεί σε κοπτικά εργαλεία τύπου σφήνας που εξορύσσουν χαλαζίτη σε μεταλλεία της Ν. Αφρικής.

5. ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

5.1. Γενικά

Η μηχανική της κοπής των πετρωμάτων υιοθετεί ως έναν από τους απώτερους στόχους της, την πρόβλεψη της δύναμης κοπής για ένα δεδομένο κοπτικό άκρο σε ποικίλους γεωλογικούς σχηματισμούς και υπό διάφορες λειτουργικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία σχηματισμού θραυσμάτων και τη φθορά του κοπτικού άκρου.

Υπάρχουν τρεις τύποι κοπτικών άκρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη των πετρωμάτων και για τη διάτρηση αυτών. Τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου, οι περιστρεφόμενοι κοπείς (π.χ. δίσκοι κοπής, κοπτικά τύμπανα με κομβία) καθώς και το κρουστικό διατρητικό κοπτικό άκρο. Τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου είναι πολύ σημαντικά για την εξόρυξη γαιάνθρακα καθώς και για τη διάτρηση και διάνοιξη στοών σε περιβάλλον γαιανθράκων ή άλλων “μαλακών” πετρωμάτων. Τα περιστρεφόμενα κοπτικά άκρα είναι τα πιο σημαντικά κοπτικά άκρα για τη διάνοιξη στοών σε σκληρά πετρώματα καθώς και για την εκτέλεση περιστροφικής διάτρησης σε μεγάλα βάθη. Τα κρουστικά διατρητικά κοπτικά άκρα είναι τα παλιότερα κοπτικά άκρα που χρησιμοποιήθηκαν για θραύση πετρωμάτων και διάτρηση. Παρόλο όλα τα παραπάνω, τα κοπτικά συρόμενου τύπου είναι τα μόνα που ουσιαστικά κόβουν το πέτρωμα και για αυτό το λόγο το ακόλουθο κεφάλαιο ασχολείται μόνο με αυτά.

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση της απόδοσης της κοπής του πετρώματος. Είναι η δύναμη κοπής, η διάρκεια ζωής του κοπτικού άκρου και η ειδική ενέργεια εκσκαφής. Η ειδική ενέργεια εκσκαφής και η διάρκεια ζωής του κοπτικού συχνά έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο από τη δύναμη κοπής στη λειτουργική απόδοση των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων από τεχνικής και οικονομικής άποψης. Παρόλο αυτά, οι θεωρίες κοπής ασχολούνται

κυρίως με τον προσδιορισμό της δύναμης κοπής ενώ οι δυο άλλες παράμετροι αναφέρονται συνήθως σε όρους συσχέτισης με την κύρια παράμετρο.

5.2. Θεωρίες κοπής υπό συνθήκες εφελκυσμού

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει ένας ξεκάθαρος διαχωρισμός ανάμεσα σε ένα φαινομενολογικό κριτήριο αστοχίας και ένα γενετικό μηχανισμό αστοχίας (Bieniawsky 1967). Ένα κριτήριο αστοχίας απλά παρέχει μια διατύπωση, η οποία μας επιτρέπει την πρόβλεψη της αντοχής για όλες τις συνθήκες πολυαξονικής φόρτισης από μια κρίσιμη ποσότητα/τιμή η οποία προσδιορίζεται από κάποιον τύπο δοκιμής (π.χ. δοκιμή UCS).

Ένας μηχανισμός αστοχίας, περιγράφει τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υλικό κατά τη διάρκεια της φόρτισης του, οι οποίες τελικά οδηγούν στην αστοχία του.

Είναι επιθυμητό, ένα κριτήριο αστοχίας να βασίζεται στη γνώση του μηχανισμού αστοχίας, αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Αντιθέτως αρκετές υποθέσεις αστοχίας, προτάθηκαν ως προϊόντα θεωρητικής και μόνο αιτιολόγησης και δεν στάθηκε δυνατό να επαληθευθούν με πειραματικά δεδομένα.

5.2.1. Η θεωρία του Merchant

Από τεχνολογικής απόψεως, θα ήταν αναμενόμενο ότι η θεωρία κοπής των πετρωμάτων θα μπορούσε να προβλέπει τη δύναμη κοπής ως μια αναλυτική συνάρτηση των ιδιοτήτων του πετρώματος, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κοπτικού άκρου και διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων.

Προκειμένου να το επιτύχει αυτό, κάθε θεωρία χρειάζεται γνώση, ή λογικές παραδοχές, για το κριτήριο αστοχίας του πετρώματος και την κατάσταση φόρτισης στις γεινιάζουσες με την κοπτική ακμή περιοχές. Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος,

εάν ληφθεί υπόψη η απλότητα της θεωρητικής ανάλυσης καθώς και η απλούστερη περίπτωση που λαμβάνει χώρα ως επί το πλείστον στην πράξη, οι περισσότερες θεωρητικές αναλύσεις για τη δύναμη κοπής με τη χρήση κοπτικών άκρων με τη μορφή σφήνας προβάλλουν ως αξίωμα ότι το πλάτος της κοπτικής ακμής είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάθος της κοπής. Αυτό συνεπάγεται ότι η κατανομή των τάσεων σε ένα πέτρωμα που φορτίζεται από ένα κοπτικό άκρο με τη μορφή σφήνας υποδηλώνει ότι το πέτρωμα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εφελκυσμού.

Εάν λοιπόν, ο σκοπός της θεωρίας είναι να δώσει μια αναλυτική εξίσωση της δύναμης κοπής, τότε η πρώτη θεωρία κοπής που διατυπώθηκε ήταν αυτή του Merchant για τη κοπή μετάλλων με τη χρήση κοπτικού άκρου με τη μορφή σφήνας.

Σε αυτή τη θεωρία, γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Το κριτήριο αστοχίας του πετρώματος δίνεται από την εξίσωση του Coulomb που εκφράζεται ως εξής:

$$\tau = \tau_0 - \sigma_n * \tan k \quad (1)$$

Όπου, τ και σ_n είναι η διατμητική και η κάθετη δύναμη αντίστοιχα και k η γωνία εσωτερικής τριβής

- Η κατάσταση φόρτισης είναι σταθερή και ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας που έχει τεθεί από την εξίσωση (1) στο επίπεδο διάτμησης που δημιουργείται και διευρύνεται από την ακμή του κοπτικού άκρου έως και την επιφάνεια του δείγματος όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.

Με βάση τις δυο παραπάνω παραδοχές και με τις δυνάμεις και τις τάσεις σε ισορροπία, η δύναμη κοπής P δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \tau_0 * t * B * \frac{\cos(\varphi - \chi)}{\sin\theta * \cos(\theta + \varphi - \chi)} \quad (2)$$

Όπου, t είναι το βάθος της κοπής, B είναι το πλάτος της κοπτικής ακμής, θ είναι η γωνία διάτμησης (η γωνία μεταξύ του διατμητικού επιπέδου και της επιφάνειας που δημιουργείται), φ είναι η γωνία τριβής μεταξύ της εμπρόσθιας ακμής του κοπτικού και του δείγματος και χ η εμπρόσθια γωνία κλίσης του κοπτικού.

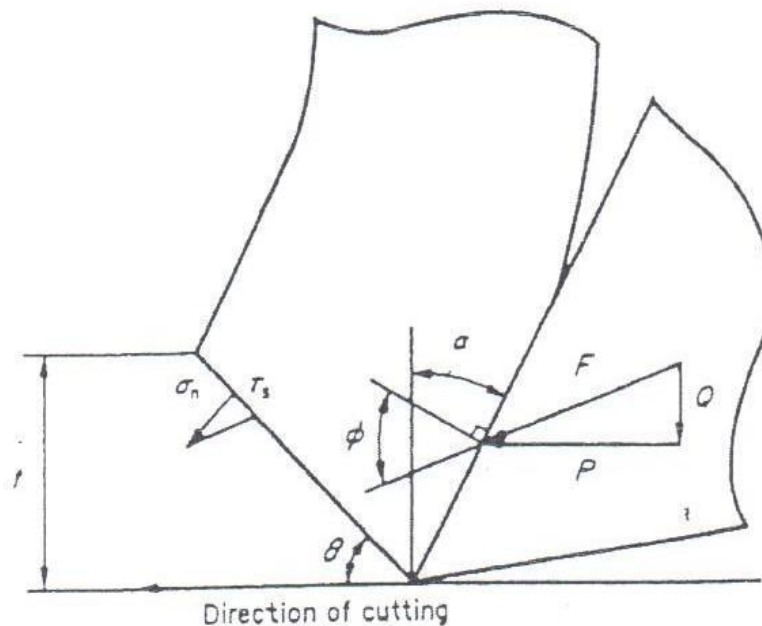
Όπως προκύπτει από το σχήμα 5.1, η κάθετη δύναμη Q δίνεται από τη σχέση (3):

$$Q = P * \tan(\varphi - \chi) \quad (3)$$

Προκειμένου να προσδιοριστεί η γωνία διάτμησης εφαρμόζεται η αρχή της ελάχιστης ενέργειας όπου δίνει:

$$2\theta = \left(\frac{\pi}{2} - \kappa\right) - (\varphi - \chi) \quad (4)$$

Αν και η θεωρία του Merchant είχε αρχικά προταθεί για την κοπή μετάλλων και θεωρεί ως δεδομένη την πλαστική αστοχία του δείγματος, κάποιοι συγγραφείς συνέκριναν τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους με τη θεωρία και υπέδειξαν ότι συμφωνούν για κάποια είδη γαιάνθρακα και κρητιδικού ασβεστόλιθου.



Σχήμα 5.1. Η κατανομή των τάσεων και των δυνάμεων κοπής στη θεωρία του Merchant

5.2.2. Η θεωρία του Evans

Λαμβάνοντας υπόψη την ψαθυρή κατά τη θραύση συμπεριφορά του γαιάνθρακα, ο Evans παρουσίασε μια θεωρία για την κοπή του γαιάνθρακα με τη χρήση κοπτικού άκρου τύπου σφήνας.

Αν και σε αργότερη δημοσίευση του βελτίωσε κάποια τμήματα, οι βασικές παραδοχές της θεωρίας του είναι:

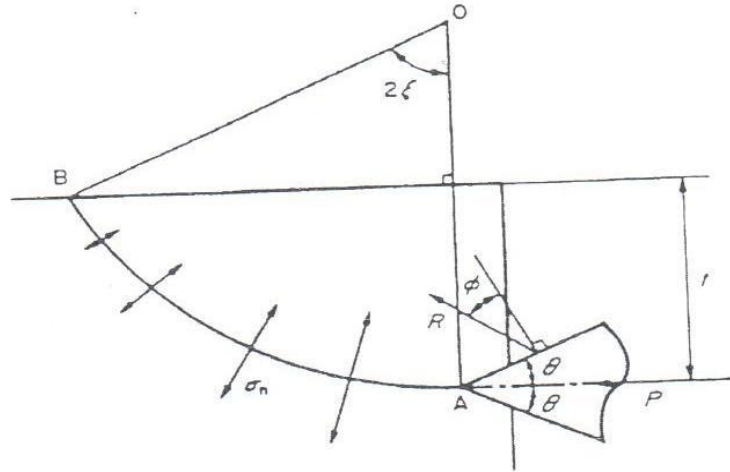
- Η ρωγμή που ξεκινά από την κορυφή της σφήνας A διευρύνεται σχηματίζοντας κυκλικό τόξο έως το σημείο B στην επιφάνεια του δοκιμίου όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.
- Μια εφαπτομένη του τόξου της ρωγμής, συμπίπτει με τη διχοτόμο της γωνίας της κοπτικής ακμής στην κορυφή της σφήνας A
- Η εφελκυστική τάση που δρα κάθετα στο τόξο της ρωγμής είναι ανάλογη της απόστασης από το σημείο B της επιφάνειας υψώμενης σε κάποια δύναμη n
- Η ρωγμή σχηματίζεται και διευρύνεται όταν οι εφελκυστικές τάσεις στην κορυφή της σφήνας A φθάσουν την τιμή St του γαιάνθρακα (όπου St η αντοχή του γαιάνθρακα σε εφελκυσμό)
- Το άθροισμα των ροπών γύρω από το σημείο B των εφελκυστικών δυνάμεων που δρουν κάθετα στην ρωγμή, ισούται με τη ροπή της δύναμης R που δρα στην εμπρόσθια ακμή της σφήνας.

Με βάση αυτές τις παραδοχές και σε ισορροπία των ροπών γύρω από το σημείο B , η εξίσωση για τη δύναμη κοπής είναι:

$$P = 2R\sin(\theta + \varphi) = \frac{2St * t * B}{n + 2} * \frac{\sin(\theta + \varphi)}{\sin\xi * \cos(\xi + \theta + \varphi)} \quad (5)$$

Προκειμένου να προσδιοριστεί η γωνία ξ , η οποία ορίζει και το μήκος της κυκλικής ρωγμής, εφαρμόζοντας την αρχή της ελάχιστης ενέργειας τελικά παίρνουμε:

$$P = \frac{4}{n+2} * St * t * B * \frac{\sin(\theta + \varphi)}{1 - \sin(\theta + \varphi)} \quad (6)$$



Σχήμα 5.2. Κατανομή τάσεων και δυνάμεις κοπής στη θεωρία του Evans για τη κοπή γαιανθράκων

5.2.3. Η θεωρία του Nishimatsu

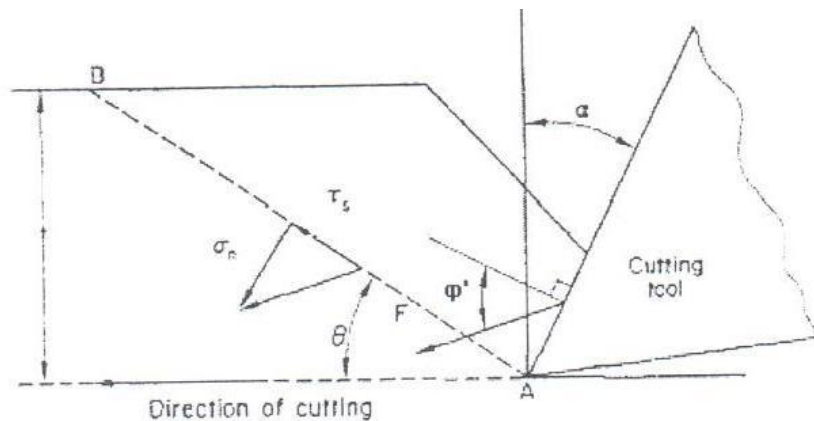
Ο Nishimatsu παρουσίασε μια θεωρία για την κοπή των πετρωμάτων και πρότεινε μια εξίσωση για τη δύναμη κοπής με τη χρήση κοπτικού άκρου με τη μορφή σφήνας. Σε αυτήν τη θεωρία γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Η συνιστάμενη των τάσεων ρ , η οποία δρα κατά μήκος της αυθαίρετης γραμμής AB είναι ανάλογη της απόστασης από το σημείο της επιφάνειας B υψωμένης σε κάποια δύναμη n και σταθερή σε κατεύθυνση (σχήμα 5.3). Ο παράγοντας n καλείται παράγοντας κατανομής των τάσεων
- Η ρωγμή δημιουργείται και διευρύνεται προς την επιφάνεια σχηματίζοντας μια αυθαίρετη γραμμή όταν οι τάσεις που ασκούνται στην κορυφή της σφήνας A ικανοποιούν το κριτήριο αστοχίας του Coulomb όπως δίνεται στη σχέση 7
- Η συνιστάμενη τάση ρ , η οποία δρα κατά μήκος της γραμμής AB ισούται με τη συνισταμένη δύναμη κοπής F

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και σε ισορροπία τάσεων και δυνάμεων, η εξίσωση για τη δύναμη κοπής P δίνεται παρακάτω:

$$P = F * \cos(\varphi - \alpha) = \frac{-1}{n + 1} * \frac{t * B}{\sin\theta} * \frac{t_0 * \cos(\varphi - \alpha)}{\tan k * \sin(\theta - \alpha + \varphi) - \cos(\theta - \alpha + \varphi)} \quad (7)$$

Όπου με θ συμβολίζεται η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης κοπής και της γραμμής AB και φ είναι η φαινόμενη γωνία τριβής μεταξύ της εμπρόσθιας ακμής του κοπτικού και του υπό κοπή πετρώματος.



Σχήμα 5.3. Κατανομή τάσεων και δυνάμεις κοπής στη θεωρία του Nishimatsu για την κοπή πετρωμάτων

Προκειμένου να προσδιορίσουμε την άγνωστη γωνία θ , εφαρμόζοντας την αρχή της ελάχιστης ενέργειας, τελικά παίρνουμε:

$$P = \frac{2}{n + 1} * t_0 * t * B * \frac{\cos k * \cos(\varphi - \alpha)}{1 - \sin(k - \alpha + \varphi)} \quad (8)$$

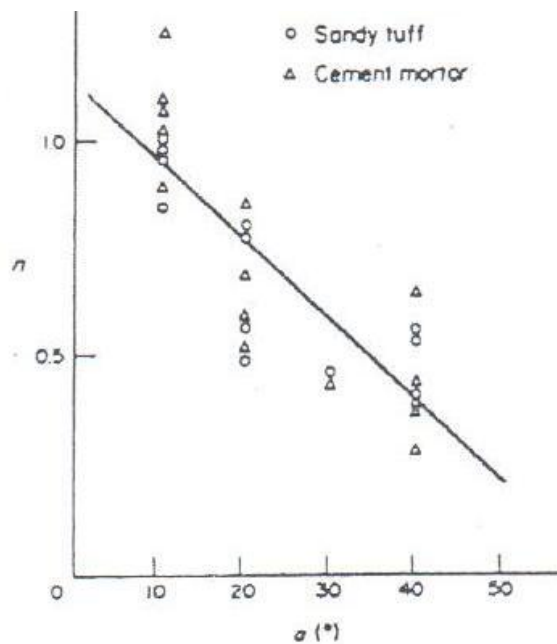
Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα κοπής πετρωμάτων με ορθογώνιο κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου, η φαινόμενη γωνία τριβής και ο παράγοντας κατανομής των τάσεων εξαρτώνται από την εμπρόσθια γωνία κλίσης του κοπτικού όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.4 και 5.5. Είναι ευνόητο το γιατί ο παράγοντας κατανομής των τάσεων εξαρτάται από τη εμπρόσθια γωνία κλίσης του κοπτικού,

εφόσον η κατανομή των τάσεων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού άκρου συμπεριλαμβανόμενης και της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης.

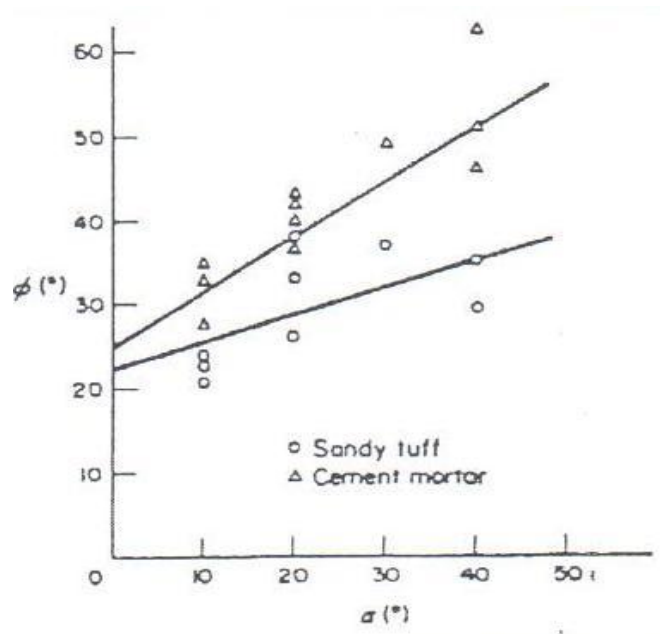
Είναι προφανές από τη σύγκριση του σχήματος 5.1 με το σχήμα 5.3, ότι η φαινόμενη γωνία τριβής σε αυτή θεωρία είναι ταυτόσημη με τη γωνία τριβής στη θεωρία του Merchant. Ωστόσο, η φαινόμενη γωνία τριβής δεν είναι σταθερή, αλλά είναι συνάρτηση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης στη κοπή πετρωμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Αυτό υποδηλώνει ότι η φαινόμενη γωνία τριβής στην κοπή των πετρωμάτων, είναι μια παράμετρος που ελέγχει την αναλογία ανάμεσα στη δύναμη κοπής και την κάθετη δύναμη όπως φαίνεται παρακάτω (σχέση 9):

$$\frac{Q}{P} = \tan(\varphi - \alpha) \quad (9)$$

Αυτή η αναλογία, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με την κατάσταση επαφής μεταξύ των επιφανειών του κοπτικού άκρου και του πετρώματος.



Σχήμα 5.4. Η επίδραση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης στον παράγοντα διανομής των τάσεων κατά Nishimatsu (Αναγνώστου 2006)



Σχήμα 5.5. Η φαινόμενη γωνία τριβής ως συνάρτηση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης του κοπτικού κατά Nishimatsu (Αναγνώστου 2006)

5.3. Η κατά Nishimatsu διαδικασία της αστοχίας κατά την κοπή πετρωμάτων

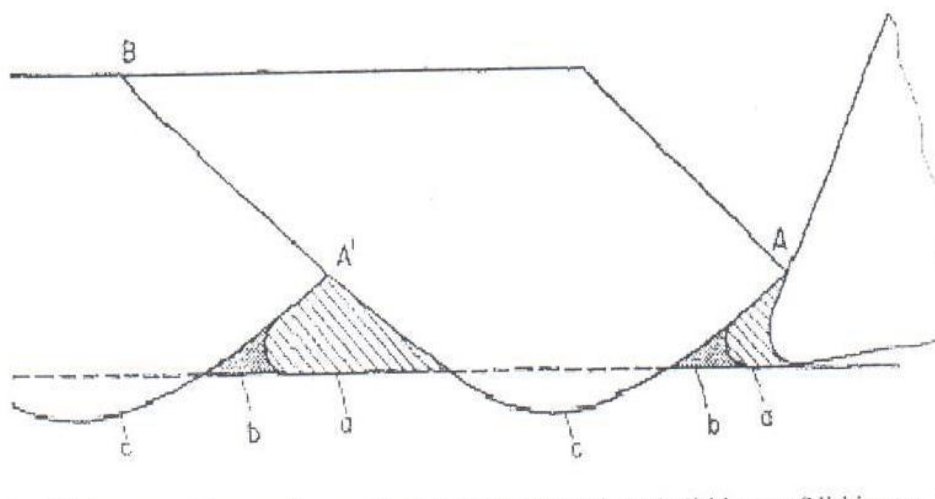
Όπως είναι γνωστό, η αστοχία των πετρωμάτων λαμβάνει χώρα με ψαθυρό τρόπο και τα θραύσματα που προκύπτουν από την κοπή δείχνουν ελάχιστα σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης. Το σχήμα 5.6 απεικονίζει σχηματικά την παρατηρηθείσα από τον Nishimatsu διαδικασία κοπής πετρώματος με κοπτικό άκρο μορφής σφήνας.

Μόλις η ακμή του κοπτικού άκρου έλθει σε επαφή με το πέτρωμα, δημιουργείται μια ζώνη σύνθλιψης γύρω από τη κοπτική ακμή. Καθώς η κοπτική ακμή πιέζεται βαθύτερα στο πέτρωμα, η ζώνη σύνθλιψης πιέζεται ενάντια στο μέτωπο του κοπτικού όπου επανασυνθλίβεται και συσσωματώνεται στο κοπτικό (βλέπε σχήμα 5.6 ζώνη α). Έτσι σχηματίζεται μια πρωτογενής ζώνη σύνθλιψης. Όσο βαθύτερη είναι η διείδυση της κοπτικής ακμής τόσο μεγαλύτερη τιμή παίρνει η δύναμη κοπής. Όταν επιτευχθεί μια κρίσιμη τιμή του βάθους διείδυσης και το

εντατικό πεδίο επιτρέψει τη δημιουργία μιας μικροσκοπικής ρωγμής τότε αυτή επεκτείνεται και δημιουργεί ένα θραύσμα του πετρώματος.

Μετά τη δημιουργία του θραύσματος, καθώς το κοπτικό άκρο προωθείται, συνθλίβει σε λεπτομερή θραύσματα ένα μικρό παραμένον εξόγκωμα του πετρώματος, το οποίο έχει απομείνει στο κατώτερο τμήμα του σημείου έναρξης σχηματισμού της μικροσκοπικής ρωγμής (ζώνη b). Η ζώνη αυτή ονομάζεται δευτερογενής ζώνη σύνθλιψης.

Στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας, το κοπτικό άκρο εισέρχεται σε μια ζώνη υπερεκσκαφής (ζώνη c), όπου δεν συναντά ιδιαίτερη αντίσταση από το πέτρωμα έως ότου συναντήσει ξανά την επόμενη επιφάνεια πετρώματος που σχηματίστηκε από την ρωγμή που αναφέρθηκε προηγουμένως. Έτσι αρχίζει ένας νέος κύκλος κοπής του πετρώματος.



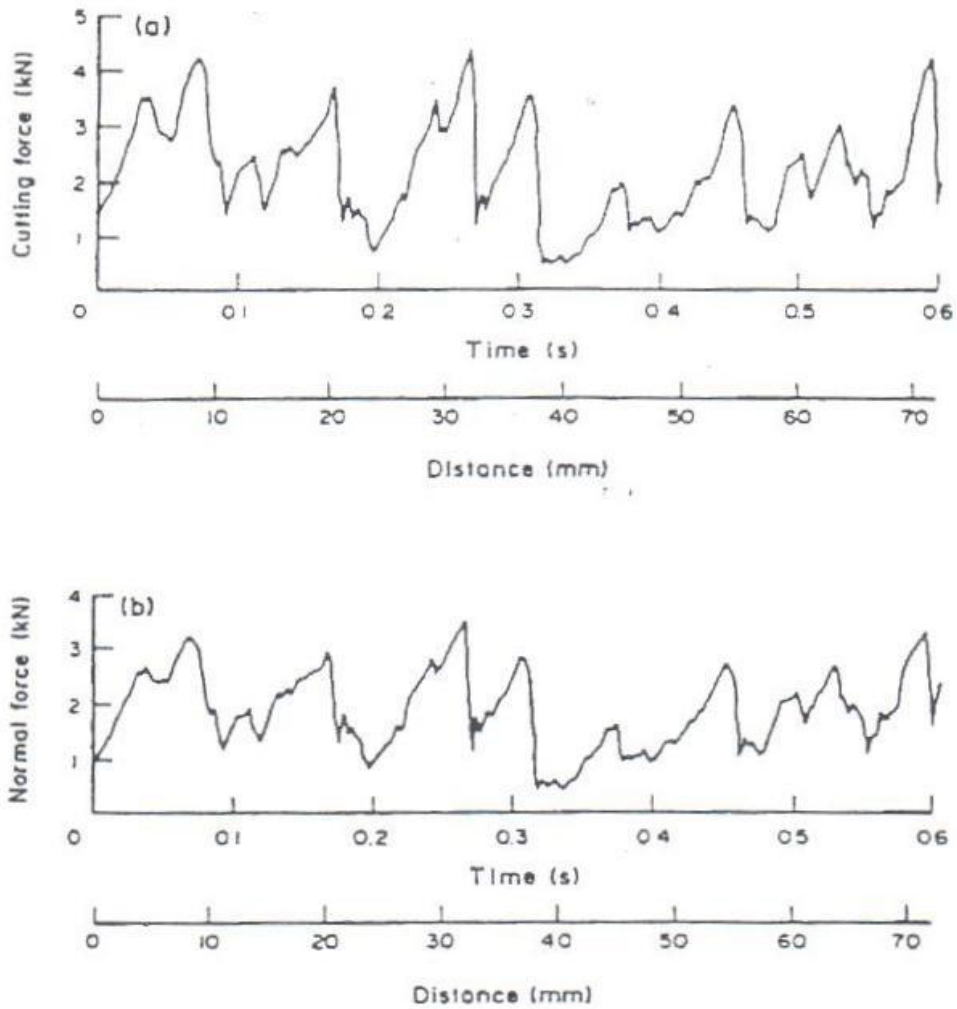
Σχήμα 5.6. Μηχανισμός αστοχίας πετρώματος κατά την κοπή κατά Nishimatsu

Σε κάθε κύκλο κοπής, η δύναμη κοπής αυξάνεται με το βάθος διείσδυσης της κοπτικής ακμής έως ένα μέγιστο, το οποίο σηματοδοτεί και το σχηματισμό της ρωγμής, και στη συνέχεια μειώνεται απότομα.

Σε μια διαδικασία κοπής όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, η δύναμη κοπής καθώς και η κάθετη δύναμη αυξομειώνεται απότομα κατά τη διάρκεια του χρόνου κοπής και με την προχώρηση του κοπτικού άκρου. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται ένα

τυπικό παράδειγμα διαγραμμάτων δύναμης κοπής και κάθετης δύναμης συναρτήσει της απόστασης κατά την κοπή με κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου.

Στις μέγιστες τιμές που παρατηρούνται θεωρούμε ότι ξεκινά ο σχηματισμός της ρωγμής, η οποία σχηματίζει και το θραύσμα του πετρώματος.



Σχήμα 5.7. Παράδειγμα αυξομείωσης της δύναμης κοπής και της κάθετης δύναμης κατά την κοπή α)δύναμη κοπής και β)κάθετη δύναμη

6. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣ-ΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

6.1. Γενικά

Η εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής έχει σαν σκοπό:

1. Την απόκτηση της βασικής πληροφόρησης σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες και τη μηχανική συμπεριφορά του ακέραιου πετρώματος
2. Τη γεωτεχνική ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό του βραχώδους υλικού (ακέραιου πετρώματος) με βάση τους διάφορους δείκτες ταξινόμησης
3. Την εκτίμηση των παραμέτρων εκείνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα στο σχεδιασμό των διαφόρων τεχνικών έργων στο πέτρωμα

Οι σπουδαιότερες και συχνότερα εκτελούμενες εργαστηριακές δοκιμές Βραχομηχανικής φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Η παρουσίαση της μεθοδολογίας εκτέλεσης των δοκιμών που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου, γίνεται με τρόπο απλό και κατανοητό και σύμφωνα πάντα με τις ισχύουσες προδιαγραφές.

Πίνακας 6.1. Σπουδαιότερες εκτελούμενες εργαστηριακές δοκιμές Βραχομηχανικής

Δοκιμές ταξινόμησης Index tests	Φυσική υγρασία (water content)	Φυσικές παράμετροι
	Πορώδες (porosity)	
	Πυκνότητα (density)	
	Δείκτης κενών (void index)	
	Γρήγορη απορρόφηση (quick absorption)	
	Ανθεκτικότητα - Χαλάρωση (slake-durability)	
Δοκιμές σχεδιασμού Design tests	Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων (sound velocity)	Δυναμικές παράμετροι
	Σκληρότητα (hardness)	Παράμετροι αντοχής
	Αντοχή σε σημειακή φόρτιση (point load strength)	
	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (uniaxial compressive)	
	Παραμορφωσιμότητα (deformability)	
Αντοχή σε τριαξονική θλίψη (triaxial strength)		
	Αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength)	
	Διάτμηση ασυνεχειών (shear strength)	

6.2. Προδιαγραφές εκτέλεσης εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής

Οι εργαστηριακές δοκιμές Βραχομηχανικής είναι επακριβώς και σαφώς προδιαγραμμένες σε κανονισμούς και οδηγίες οι πιο σημαντικοί των οποίων είναι της I.S.R.M (Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής), A.S.T.M (Αμερικάνικη Ένωση Δοκιμών και Υλικών), B.S (Βρετανικά Πρότυπα) και οι αντίστοιχες Ελληνικές προδιαγραφές του ΥΠΕΧΩΔΕ (Ε103-84). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται (συσκευές, πρέσες κ.λπ.) πρέπει να είναι διακριβωμένος (δηλαδή να υπάρχουν πιστοποιητικά ελέγχου καλής λειτουργίας που εκδίδονται σε ετήσια περίπου βάση) και η όλη διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών να γίνεται αυστηρά σύμφωνα με τις προδιαγραφές και τα προβλεπόμενα από τα πιστοποιητικά ποιότητας.

Παρακάτω αναφέρονται οι προδιαγραφές των «κλασσικών» δοκιμών Βραχομηχανικής, όπως αυτές αναφέρονται στις αντίστοιχες πρότυπες οδηγίες.

1. Εργασία προετοιμασίας κυλινδρικών δοκιμίων βραχωδών δειγμάτων
 - Διάτρηση με καροταρία για λήψη κυλινδρικού δοκιμίου
 - Κοπή και λείανση των άκρων του δοκιμίου
2. Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας (E103-84, ISRM 1981, ASTM D2216-80)
3. Προσδιορισμός πορώδους και πυκνότητας (E103-84, ISRM1981, ASTM D4404-84)
4. Προσδιορισμός αντοχής σε μοναξονική θλίψη (E103-84, ISRM 1981, ASTM D2938-86)
5. Προσδιορισμός αντοχής σε σημειακή φόρτιση (E103-84, ISRM 1985)
6. Προσδιορισμός αντοχής σε τριαξονική θλίψη (E103-84, ISRM 1981, ASTM D2664-86)
7. Προσδιορισμός σκληρότητας με το σφυρί Schmidt (L) (E1 03-84, ISRM 1981)
8. Προσδιορισμός διατμητικής αντοχής ασυνεχειών (ISRM 1981, ASTM D5607-94)
9. Προσδιορισμός δείκτη χαλάρωσης (ISRM 1981, ASTM D4644-87)
10. Προσδιορισμός εφελκυστικής αντοχής (Brazilian) (ISRM 1981)
11. Προσδιορισμός αντοχής σε μοναξονική θλίψη με σύγχρονη μέτρηση και προσδιορισμό E και ν (E103-84, ISRM 1981, ASTM D3148-93)
12. Προσδιορισμός ταχύτητας διάδοσης υπερήχων (ISRM 1981, ASTM D2845-83)

6.3. Δειγματοληψία πετρωμάτων και διαμόρφωση δοκιμίων

Η δειγματοληψία των πετρωμάτων γίνεται συνήθως με τους παρακάτω τρόπους:

1. Με την εκτέλεση των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, όπου υπάρχει δυνατότητα δειγματοληψίας στο επιθυμητό βάθος και
2. Δειγματοληψία σε επιφανειακές εμφανίσεις πετρώματος

Και στις δυο περιπτώσεις, για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών απαιτείται καθόλου ή κανονική διαμόρφωση των δειγμάτων, ανάλογα με το είδος της δοκιμής που πρόκειται να εκτελεστεί.

Η δειγματοληψία της επιφανειακής μάζας του πετρώματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και πείρα, καθόσον τα δείγματα που θα ληφθούν πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά της μάζας από την οποία προέρχονται. Επειδή όμως η μάζα του πετρώματος, στην έκταση που ενδιαφέρει είναι κατά κανόνα ανομοιογενής, τα δείγματα που θα ληφθούν από μία συγκεκριμένη θέση είναι πολύ πιθανόν να διαφέρουν σημαντικά από εκείνα μιας άλλης θέσης της ίδιας μάζας. Αυτό σημαίνει ότι η αντιπροσωπευτική δειγματοληψία πρέπει να περιλαμβάνει δείγματα από πολλές θέσεις της ίδιας μάζας, ιδιαίτερα όταν τα χαρακτηριστικά της διαφοροποιούνται σημαντικά σε όλη της την έκταση.

Οι θέσεις δειγματοληψίας πρέπει να καθορίζονται μετά από συστηματική μακροσκοπική εξέταση της βραχομάζας. Εντοπίζονται περιοχές όπου παρατηρούνται ορυκτολογικές διαφοροποιήσεις, διαφορές στην φύση του συνδετικού υλικού, διαφορές στο βαθμό αποσάθρωσης ή του χρώματος του πετρώματος. Επίσης σημειώνεται η παρουσία διακλάσεων, ρωγμών και άλλης μορφής ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος και ανάλογα λαμβάνονται δείγματα με ασυνέχειες ή χωρίς αυτές. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι το πέτρωμα κοντά σε τεκτονικές δομές (ρήγματα, πτυχές κ.λπ.) παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς τη μηχανική συμπεριφορά του σε σχέση με την υπόλοιπη βραχομάζα. Πρέπει λοιπόν να καταγράφεται όχι μόνο η θέση δειγματοληψίας, αλλά και τα γενικότερα χαρακτηριστικά της βραχομάζας από την οποία λαμβάνεται το δείγμα.

Τα δείγματα εξορύσσονται από τη μάζα του πετρώματος σε ογκόλιθους μορφής κύβου (κυβόλιθοι). Στην περίπτωση μαλακών πετρωμάτων η εξόρυξη μπορεί να γίνει εύκολα με τη βοήθεια κατάλληλου κοπτήρα. Σε σκληρά πετρώματα συχνά χρησιμοποιούνται εκρηκτικά για την εξόρυξη των ογκολίθων αλλά στην περίπτωση αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο όγκος του πετρώματος έχει ήδη υποβληθεί σε μία

δυναμική εντατική κατάσταση, που ενδεχόμενα να έχει προκαλέσει τη δημιουργία νέων ή την επέκταση υφιστάμενων μικρορωγμών στο πέτρωμα.

Η δειγματοληψία με τον τρόπο αυτό είναι σχετικά απλή, αλλά έχει τρία μειονεκτήματα:

1. Τα ασθενέστερα τμήματα του πετρώματος θραύονται κατά την εξόρυξη σε μικρότερα τεμάχια, τα οποία κατά κανόνα είναι αυτά από τα οποία επιλέγεται το δείγμα.
2. Το σπασμένο πέτρωμα έχει ήδη υποβληθεί κατά την εξόρυξη του σε εντατική κατάσταση, και
3. Είναι σχετικά δύσκολο να προσανατολισθεί το δείγμα σε σχέση με τη μάζα του πετρώματος, από την οποία προέρχεται.

Μερικά από τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν με τη λήψη δειγμάτων που διαμορφώνονται με ένα ελαφρό σφυρί από μεγαλύτερα βραχώδη τεμάχια.

Η θέση από την οποία λαμβάνεται το δείγμα καθώς και ο ακριβής προσανατολισμός του, σημειώνονται με τρόπο σαφή επάνω στο δείγμα, ώστε να μπορεί αυτό να επανατοποθετηθεί στην φυσική του θέση. Με αύξοντα αριθμό ή με άλλο τρόπο σημειώνονται επίσης τα στοιχεία αναγνώρισης του δείγματος.

Κατά τη μεταφορά, λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα καταστροφής τους (π.χ. θραύση), ενώ στο εργαστήριο προστατεύονται κατάλληλα μέχρι να χρησιμοποιηθούν.

Από τα δείγματα αυτά πρέπει να διαμορφωθούν δοκίμια για την εκτέλεση των εργαστηριακών μετρήσεων. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τις εργαστηριακές δοκιμές είναι δυνατό να έχουν σχήμα :

1. Κανονικό, δηλαδή κυλινδρικής και σπανιότερα κυβικής μορφής
2. Ακανόνιστο
3. Ειδικής μορφής

Συνήθως οι μηχανικές ιδιότητες προσδιορίζονται σε κυλινδρικά δοκίμια με τυπικές διαμέτρους μεταξύ 5 – 7,5 cm, ενώ σπανιότερα χρησιμοποιούνται διάμετροι μέχρι 10 ή 15 cm. Τα κυλινδρικά δοκίμια λαμβάνονται στο ύπαιθρο με την εκτέλεση δειγματοληπτικής γεώτρησης ενώ στο εργαστήριο με εργαστηριακό αδαμαντοτρύπανο (απλή καροταρία), που είναι εφοδιασμένο με ειδικό κοπτικό άκρο λεπτού τοιχώματος με διαμάντια για οικονομία υλικού.

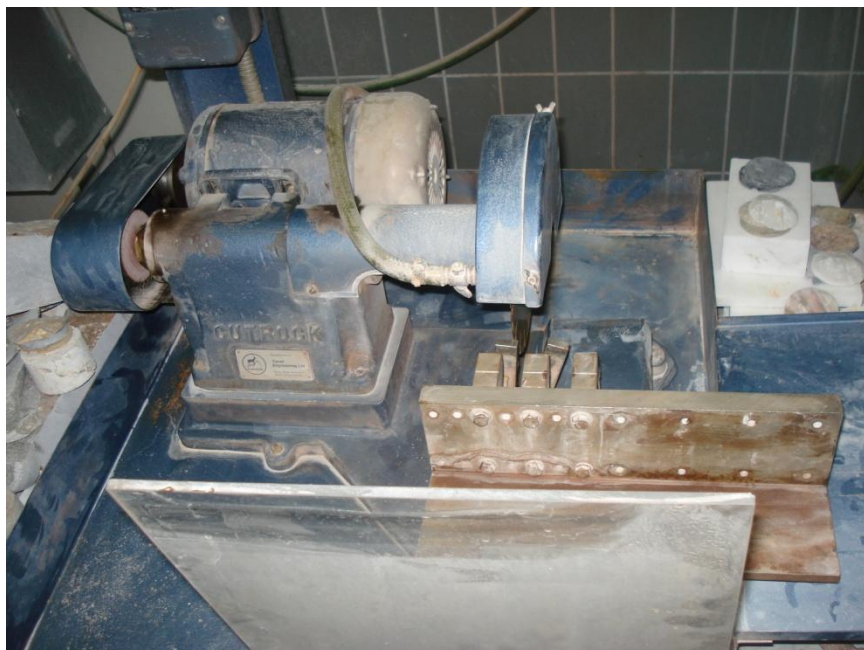


Φώτο 6.1. Καροταρία του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων για τη διαμόρφωση κυλινδρικών δοκιμών πετρώματος

Το βραχύδες δείγμα, πριν τοποθετηθεί στην τράπεζα της εργαστηριακής καροταρίας για τη διάτρηση των δοκιμών, διαμορφώνεται με τη βοήθεια αδαμαντοτροχού σε μικρών διαστάσεων κυβόλιθο (μέχρι 30 cm) με επίπεδη βάση για καλή έδραση στην τράπεζα.

Τα δοκίμια μορφής πυρήνα, που προκύπτουν από τη διάτρηση του κυβόλιθου ελέγχονται μακροσκοπικά και στη συνέχεια αποκόπτονται στα άκρα με

αδαμαντοτροχό και σε κατάλληλα μήκη, ανάλογα με το είδος της προβλεπόμενης εργαστηριακής δοκιμής (την επιθυμητή σχέση μήκους προς διάμετρο πυρήνα).



Φώτο 6.2. Μηχάνημα κοπής δοκιμίων με αδαμαντοτροχό

Σημειώνεται τέλος ότι, κατά τη λήψη των κυλινδρικών δοκιμίων από την εργαστηριακή καροταρία, αντί νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ψύξη τον κοπτικού άκρου και την απαγωγή των θραυσμάτων πεπιεσμένος αέρας, στα πετρώματα εκείνα που επηρεάζονται από το νερό (π.χ. μαργόλιθοι, ιλυόλιθοι). Στην περίπτωση αυτή, η διάτρηση είναι βραδύτερη και χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή.

Όταν όμως απαιτούνται δείγματα ακανόνιστης μορφής, αυτά γενικά διαμορφώνονται με τη βοήθεια ελαφρού σφυριού απομακρύνοντας όλες τις αιχμηρές προεξοχές, ώστε τελικά να σχηματισθεί δοκίμιο περίπου σφαιρικού σχήματος.

Ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία προετοιμασίας των δοκιμίων και την αυστηρή συμμόρφωση προς την πειραματική διαδικασία, η εκτέλεση της ίδιας δοκιμής σε δυο δοκίμια που έχουν διαμορφωθεί από ένα συγκεκριμένο μεγάλο δείγμα σπάνια δίνει ακριβώς ίδια αποτελέσματα. Οι αποκλίσεις, που παρατηρούνται στα πετρώματα, είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των τεχνικών υλικών, διότι εκτός

από τα συνήθη πειραματικά σφάλματα υπάρχουν εδώ επιπρόσθετα, που προκύπτουν από τα εξής:

- Τη γεωμετρία του δοκιμίου, που δεν μπορεί να φθάσει σε τελειότητα εκείνη των δοκιμίων των τεχνικών υλικών
- Τη δομή του πετρώματος, που λόγω της παρουσίας μικροασυνεχειών, δεν μπορεί να πλησιάσει εκείνη των τεχνικών υλικών

Εάν συνεπώς απαιτείται σε ένα πέτρωμα πολύ καλή προσέγγιση της τιμής μιας εργαστηριακής παραμέτρου, τότε ο αριθμός των δοκιμίων που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά, ώστε να έχουμε ένα σχετικά πλούσιο στατιστικό δείγμα.

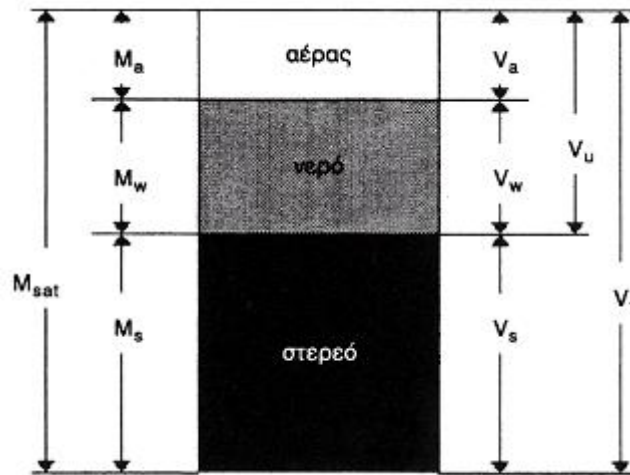
Για τον περιορισμό όμως του κόστους και του χρόνου των δοκιμών, χωρίς να μειωθεί η ζητούμενη αξιοπιστία των πειραματικών αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να καθορισθεί ένας ελάχιστος για κάθε περίπτωση απαιτούμενος αριθμός δοκιμίων, που πρέπει να δοκιμαστούν εργαστηριακά. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από τη διασπορά των εργαστηριακών τιμών σε σχέση με τη μέση τιμή και από την επιθυμητή ακρίβεια. Η διασπορά εξαρτάται με τη σειρά της από την ανομοιογένεια του πετρώματος και από το μέγεθος του δοκιμίου, καθόσον τα μικρά δοκίμια δίνουν μεγαλύτερη διασπορά. Συνεπώς, όταν χρησιμοποιούνται για δοκιμές στο εργαστήριο μικρών διαστάσεων δοκίμια, ο αριθμός τους πρέπει να είναι σχετικά μεγαλύτερος.

Ικανοποιητική μαθηματική σχέση, που να καθορίζει για κάθε περίπτωση τον απαιτούμενο αριθμό δοκιμίων για δοκιμή, δεν υπάρχει.

6.4. Φυσικές παράμετροι

Ο βράχος, όπως και το έδαφος, αποτελείται από τη στερεή ύλη και τα κενά (πόροι), που υπάρχουν μεταξύ των κρυστάλλων των ορυκτών ή του συνδετικού υλικού. Τα κενά αυτά πιθανό να περιέχουν νερό ενώ ο υπόλοιπος χώρος που καταλαμβάνουν περιέχει ατμοσφαιρικό αέρα ή διάφορα άλλα αέρια (π.χ. μεθάνιο,

φυσικό αέριο). Στο Σχήμα 6.1 φαίνονται ενδεικτικά οι τρεις φάσεις που αποτελούν το πέτρωμα καθώς και οι συμβολισμοί των όγκων και των μαζών τους αντίστοιχα. Με βάση τους συμβολισμούς αυτούς ορίζονται οι κύριες φυσικές ιδιότητες του ακεραίου πετρώματος.



Σχήμα 6.1. Διαγραμματική απεικόνιση των τριών φάσεων του βραχώδους υλικού

Συνεπώς, τα δοκίμια έπειτα από τη διαμόρφωση των διαστάσεων που απαιτούνται για τις δοκιμές, οδηγούνται στον κλίβανο ξήρανσης ώστε να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία.

6.5. Προσδιορισμός ξηρής πυκνότητας

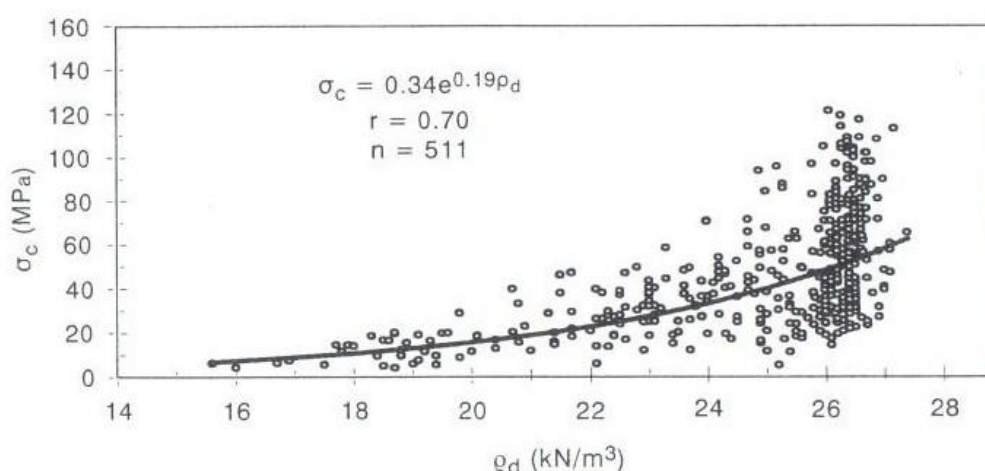
6.5.1. Γενικά

Η ξηρή πυκνότητα (ρ_d) εκφράζεται με το λόγο της μάζας του ξηρού πετρώματος (M_s) προς το συνολικό του όγκο (V). Εκφράζεται συνήθως σε ton/m^3 και σπανιότερα σε g/cm^3 .

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}$$

Η πυκνότητα εξαρτάται από τον τρόπο και τις συνθήκες σχηματισμού των πετρωμάτων, καθώς και από τις διεργασίες που επιτελούνται μετά τη γένεση τους (διαγένεση, αποσάθρωση – εξαλλοίωση).

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων επηρεάζονται άμεσα από την πυκνότητα. Παρατηρείται αύξηση των παραμέτρων αντοχής του ακέραιου πετρώματος όταν αυξάνεται η πυκνότητα του. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η σχέση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σ_c) και ξηρής πυκνότητας (ρ_d) για ασβεστολιθικά πετρώματα. Τέλος στον πίνακα δίνεται εύρος τιμών ξηρής πυκνότητας για διάφορα πετρώματα του Ελλαδικού χώρου.



Σχήμα 6.2. Σχέση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σ_c) με ξηρή πυκνότητα (ρ_d) για ασβεστολιθικά πετρώματα του Ελληνικού χώρου (Κούκης 1998)

Πίνακας 6.2. Ενδεικτικές τιμές ξηρής πυκνότητας για διάφορα πετρώματα

Είδος ακέραιου πετρώματος	Πυκνότητα (ton/m ³)
Ασβεστόλιθος	2,45 - 2,75
Κρυσταλλικός, συμπαγής ασβεστόλιθος	2,65 - 2,75
Δολομιτωμένος ασβεστόλιθος	1,53 - 2,81
Μαργαϊκός ασβεστόλιθος	1,68 - 2,65
Μαργόλιθος, ιλυόλιθος	1,79 - 2,65
Ψαμμίτης	1,53 - 2,70
Μάρμαρο	2,70 - 2,91
Σχιστόλιθος	2,24 - 2,81
Ανδεσίτης	2,19 - 2,35

6.5.2. Εκτέλεση μετρήσεων

Αρχικά για τον υπολογισμό του όγκου προσδιορίζονται οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου με ένα ηλεκτρονικό παχύμετρο ακρίβειας 0,1 mm. Λαμβάνονται δυο μετρήσεις μήκους με γωνία τόξου 90° και παίρνουμε τον μέσο όρο αυτών. Έπειτα, στο ένα άκρο λαμβάνονται δυο μετρήσεις της διαμέτρου πάλι με γωνία τόξου 90°. Αυτό επαναλαμβάνεται στο μέσο του δοκιμίου αλλά και στο άλλο άκρο. Έτσι έχουμε 3 ζεύγη μετρήσεων διαμέτρου. Τέλος, ζυγίζουμε τα δοκίμια ξεχωριστά σε έναν ζυγό ακρίβειας 0,1 g για να προσδιορίσουμε το βάρος τους.

6.5.3. Υπολογισμοί

Οι μετρήσεις των διαμέτρων που λήφθηκαν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Οι διαμέτροι 1 και 2 αντιστοιχούν στο ένα άκρο και αντίστοιχα οι διαμέτροι 3, 4 στο μέσο και οι διαμέτροι 5,6 στο άλλο άκρο.

Δοκίμιο	Διάμετρος 1 (mm)	Διάμετρος 2 (mm)	Διάμετρος 3 (mm)	Διάμετρος 4 (mm)	Διάμετρος 5 (mm)	Διάμετρος 6 (mm)
Ta_01	54,03	53,96	54,01	53,93	54,02	54,05
Ta_02	54,02	53,99	54,01	54,04	54,04	54,00
Ta_03	54,04	53,90	54,18	54,02	54,04	53,95
Ta_04	53,97	53,93	53,99	53,97	53,96	54,01
Ta_05	54,01	53,94	54,01	53,94	53,89	53,88

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τα εμβαδά των ελλείψεων στα τρία σημεία μέτρησης των διαμέτρων και προσδιορίζουμε την μέση τιμή.

Δοκίμιο	Εμβαδόν έλλειψης 1 (mm ²)	Εμβαδόν έλλειψης 2 (mm ²)	Εμβαδόν έλλειψης 3 (mm ²)	Μέση τιμή εμβαδόν ελλείψεων (mm ²)
Ta_01	2288,64	2286,52	2292,03	2289,06
Ta_02	2289,48	2291,18	2290,76	2290,47
Ta_03	2286,51	2297,54	2288,63	2290,90
Ta_04	2284,82	2287,36	2287,79	2286,66
Ta_05	2286,94	2286,94	2279,32	2284,40

Η μέση τιμή του μήκους του κάθε δοκιμίου είναι:

Δοκίμιο	Μήκος 1 (mm)	Μήκος 2 (mm)	Μέση τιμή μήκους (mm)
Ta_01	140,38	140,36	140,37
Ta_02	138,62	138,65	138,64
Ta_03	150,30	150,37	150,34
Ta_04	102,12	102,08	102,10
Ta_05	124,25	123,93	124,09

Με τα δεδομένα που έχουμε μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε τον όγκο του κάθε δοκιμίου:

Δοκίμιο	Όγκος δοκιμίου (mm ³)	Όγκος δοκιμίου (cm ³)
Ta_01	321315,32	321,32
Ta_02	317539,73	317,54
Ta_03	344401,89	344,40
Ta_04	233467,83	233,46
Ta_05	283471,23	283,47

Τέλος, έχοντας το βάρος και τον όγκο προσδιορίζουμε την πυκνότητα του κάθε δοκιμίου σε ton/m³.

Δοκίμιο	Βάρος Ms (g)	Όγκος δοκιμίου V (cm ³)	Πυκνότητα ρ _a (g/cm ³)	Πυκνότητα ρ _a (ton/m ³)
Ta_01	852,4	321,32	2,65	2,65
Ta_02	841,7	317,54	2,65	2,65
Ta_03	908,4	344,40	2,64	2,64
Ta_04	628,0	233,46	2,69	2,69
Ta_05	757,1	283,47	2,67	2,67

Οι φωτογραφίες των δοκιμών παρουσιάζονται στο παράρτημα 1.

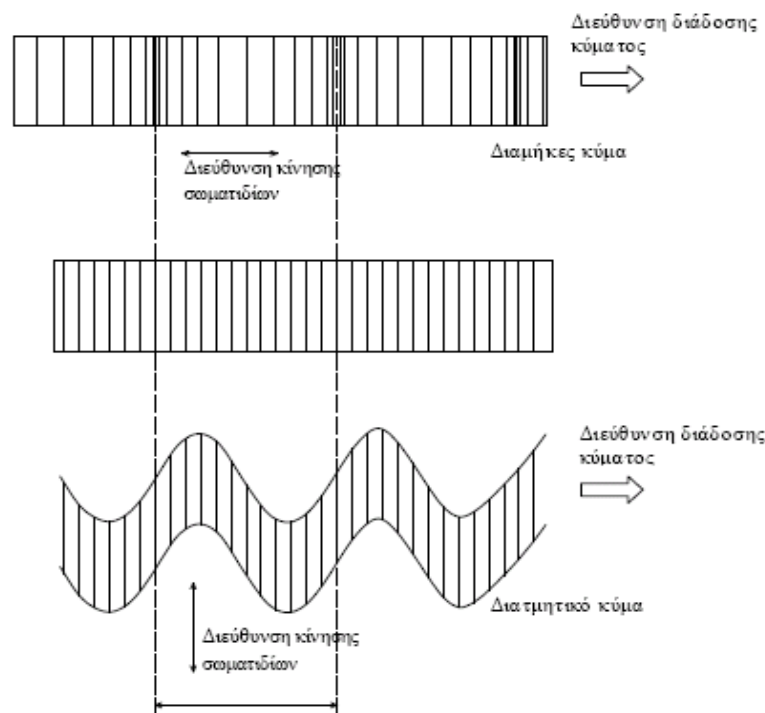
6.6. Προσδιορισμός της ταχύτητας των υπερήχων κυμάτων διαμέσου βραχωδών δειγμάτων και υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

6.6.1. Γενικά

Όταν τα ηχητικά κύματα διέρχονται διαμέσου ενός υλικού υφίστανται ελάττωση της έντασης τους, καθόσον μέρος της ενέργειας τους μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας. Έτσι, κύμα με ένταση J_0 , διερχόμενο διαμέσου υλικού πάχους l , εξέρχεται με μειωμένη ένταση J που δίνεται από την σχέση: $J = J_0 \times e^{-\mu l}$, δηλαδή η ένταση του κύματος ελαττώνεται εκθετικά με το πάχος l του υλικού. Ο συντελεστής μ καλείται συντελεστής εξασθένησης και εξαρτάται από το είδος του υλικού και τη συχνότητα του κύματος.

Η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων σε ένα πέτρωμα εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές του ιδιότητες. Η ύπαρξη πόρων, μικρορωγμών και άλλων ασυνεχειών μικρής κλίμακας επηρεάζουν σημαντικά την ταχύτητα των κυμάτων. Η ποιότητα του πετρώματος συχνά μπορεί να συσχετισθεί με τις ελαστικές ιδιότητες του και συνεπώς η ταχύτητα των υπερήχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της ποιότητας του πετρώματος αλλά και για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών.

Για τον έλεγχο των πετρωμάτων με υπέρηχους χρησιμοποιούνται δύο είδη κυμάτων: τα διαμήκη κύματα P και τα διατμητικά (ή αλλιώς εγκάρσια) κύματα S . Στο παρακάτω σχήμα δίνεται μία εικόνα της κίνησης των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος για τα δύο αυτά είδη κυμάτων.



Σχήμα 6.3. Κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

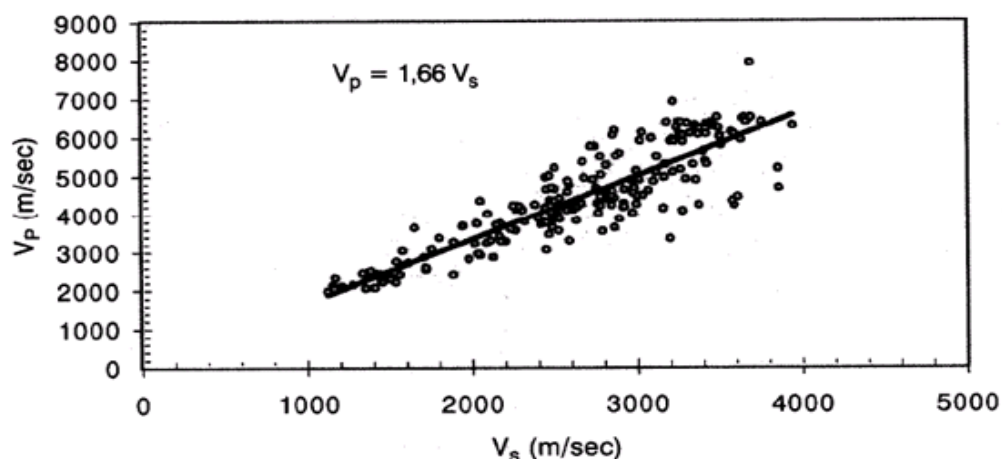
Η μέτρηση της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων δια μέσου του ακέραιου πετρώματος πραγματοποιείται με μία απλή μεθοδολογία που προβλέπει στο ένα άκρο ενός πυρήνα του ακέραιου πετρώματος την τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου που δημιουργεί τα ηχητικά κύματα, τα οποία λαμβάνονται από το άλλο άκρο με δέκτη και μετρείται έτσι άμεσα ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων P και S που διατρέχουν τον πυρήνα. Με τον προσδιορισμό των ταχυτήτων V_s και V_p μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν τα δυναμικά μέτρα διάτμησης (G) και ελαστικότητας (E) καθώς επίσης και ο λόγος του Poisson (ν).

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_{dyn}), που υπολογίζεται, διαφέρει από το στατικό μέτρο ελαστικότητας (E_{st}) του ακέραιου πετρώματος, που υπολογίζεται από τις καμπύλες τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων κατά την εκτέλεση της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη με παράλληλη μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων. Γενικά ισχύει:

$$E_{dyn} = k \times E_{st}$$

όπου k : συντελεστής που συνήθως κυμαίνεται από 1 μέχρι 3.

Η ταχύτητα V_p συνδέεται με την V_s σύμφωνα με τη σχέση $V_p \approx 1,7 V_s$ και στο σχήμα 6.4 φαίνεται μια τέτοια συσχέτιση για διάφορα πετρώματα του Ελληνικού χώρου. Παρόμοιες σχέσεις έχουν εκτιμηθεί για τον Αθηναϊκό σχιστόλιθο, $V_p = 1.5V_s$, (Μαρίνος 1994) και για μαργολίθους - μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, $V_p = 1.6V_s$ (Σαμπατάκης 1993).



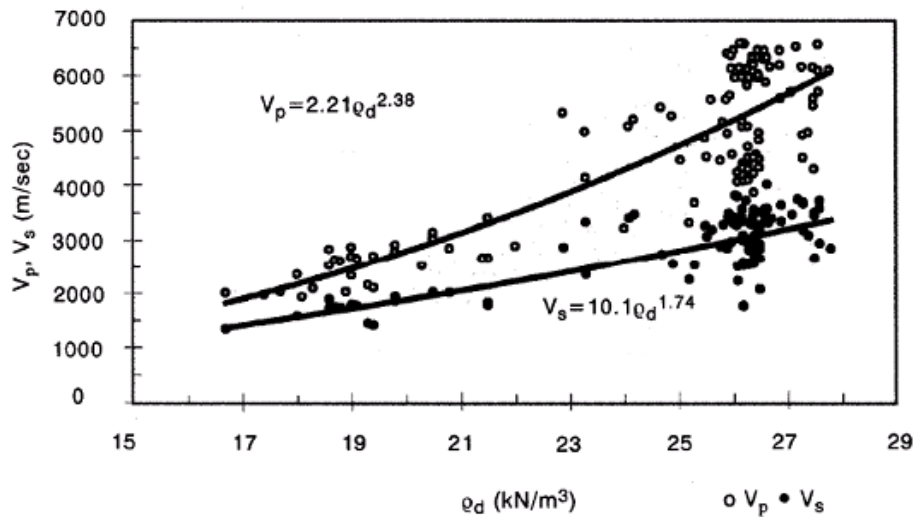
Σχήμα 6.4. Σχέση ταχυτήτων P και S κυμάτων για διάφορα πετρώματα (στοιχεία από το Κεντρικό Εργαστήριο Δημόσιων Έργων ΚΕΔΕ)

Στα Σχήματα 6.5 και 6.6 φαίνεται ότι η αύξηση της πυκνότητας του αέρα του πετρώματος προκαλεί αύξηση των ταχυτήτων των S και P κυμάτων, ενώ αντίθετα η αύξηση του πορώδους επιφέρει τη μείωση τους.

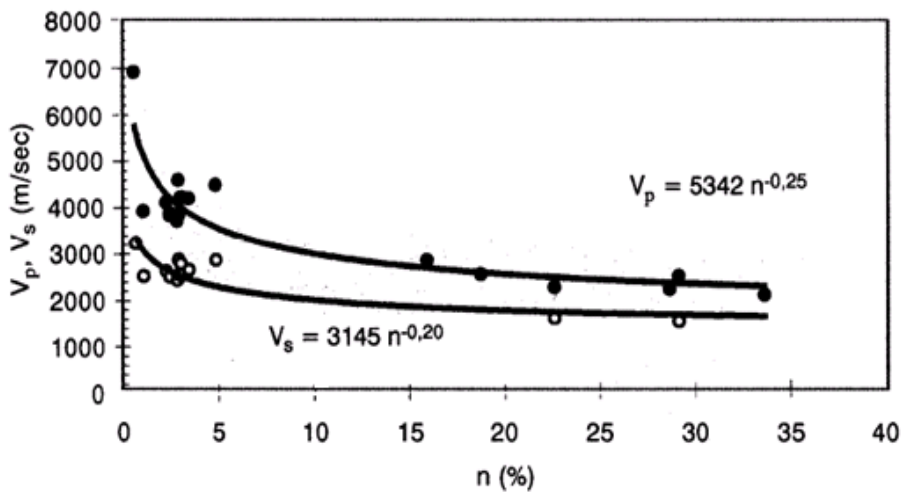
Διακυμάνσεις των τιμών των V_p και V_s (σε m/sec) για μερικές κατηγορίες πετρωμάτων του Ελληνικού χώρου, δίνονται στον παρακάτω πίνακα (στοιχεία από ΚΕΔΕ).

Πίνακας 6.3. Διακυμάνσεις των V_p και V_s για διάφορα πετρώματα

Βραχώδες υλικό	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)
Ασβεστόλιθοι	2550 - 6500	1700 - 4000
Κρυσταλλικού, συμπαγείς ασβεστόλιθοι	4800 - 6500	2800 - 4000
Μαργαϊκή ασβεστόλιθοι	1700 - 5600	1200 - 3300
Ψαμμίτες (μαργαϊκή, χαλαζιακοί κ.λπ.)	1900 - 6000	1100 - 3500
Γένυσιοι - Σχιστόλιθοι	2300 - 5900	1400 - 3600



Σχήμα 6.5. Σχέση ξηρής πυκνότητας ρ_d και ταχυτήτων υπερήχων για ασβεστολιθικά πετρώματα του Ελληνικού χώρου (Κούκης 1998)



Σχήμα 6.6. Σχέση πορώδους n και ταχύτητας υπερήχων για διάφορα πετρώματα του Ελληνικού χώρου (στοιχεία από ΚΕΔΕ)

Οι ασυνέχειες του πετρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα διαδόσεως των κυμάτων. Η ταχύτητα του διαμήκους θλιπτικού κύματος είναι πολύ μεγαλύτερη στο άθικτο πέτρωμα, απ' ότι στο ρωγματωμένο. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η διαφορά αυτή στην ταχύτητα, είναι μεγαλύτερη για τον ίδιο τύπο πετρώματος με διαφορετική πυκνότητα ασυνεχειών, απ' ότι μεταξύ διαφορετικών τύπων πετρωμάτων. Μια άλλη αναμενόμενη παρατήρηση είναι ότι η ταχύτητα

διαδόσεως αυξάνει με το βάθος, ενώ η πυκνότητα των ασυνεχειών μειώνεται, λόγω αυξησεως της πυκνότητας του πετρώματος.

6.6.2. Σκοπός δοκιμής

Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της ταχύτητας των υπερήχων των διαμήκων κυμάτων V_p μέσα στο βραχώδες υλικό. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας του ακέραιου πετρώματος. Προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{dyn} * (1 - \nu)}{\rho * (1 + \nu) * (1 - 2\nu)}}$$

Ο λόγος Poisson (ν) έχει προσδιοριστεί από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

6.6.3. Περιγραφή δοκιμής

Η δοκιμή εκτελείται με τη χρήση μίας ειδικής διάταξης, η οποία γενικά περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Σύστημα παραγωγής κυμάτων υπερήχων συχνότητας 54 kHz
- Δυο πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς που τοποθετούνται σε επαφή με τις δύο βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου, για την εκπομπή και τη λήψη των κυμάτων αντίστοιχα
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής όπου με τη βοήθεια ενός προγράμματος αποτυπώνεται η κυματομορφή και υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης σε m/s και ο χρόνος σε μs
- Δυο φύλλα μολύβδου πάχους 1,64 mm το καθένα



Φώτο 6.3. Σύστημα συσκευής μέτρησης ταχύτητας υπερήχων

Θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν αρκετοί τύποι συσκευών προσδιορισμού ταχύτητας των υπερήχων, οι οποίες βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας και προσομοιάζουν μεταξύ τους. Πιθανόν να έχουν διαφορετικές δυνατότητες μέτρησης και η ακρίβεια τους να είναι ανάλογη. Η περιγραφή που ακολουθεί αναφέρεται σε σχετικά σύγχρονη συσκευή με πολλαπλές δυνατότητες μέτρησης.

1) Πριν την έναρξη της δοκιμής γίνεται ρύθμιση και μηδενισμός όλου του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται, ως εξής:

Αφού γίνει η συνδεσμολογία των επί μέρους τμημάτων της συσκευής, τοποθετείται από ένα φυλλάριο μολύβδου, ώστε να καλύπτει τις επιφάνειες επαφής των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων. Τοποθετείται ο ένας μετατροπέας επάνω στον άλλο, με τις δύο επιφάνειες τους να είναι σε επαφή και στη σωστή θέση και ενδιάμεσα τους να πιέζονται τα δύο φυλλάρια μολύβδου. Οι δύο σε επαφή μετατροπείς τοποθετούνται κατακόρυφα και πάνω τους εφαρμόζεται βάρος 8,9 kg. Έπειτα ρυθμίζουμε τον χρόνο από τον υπολογιστή ώστε να έχει την ένδειξη 00.0.

Σε άλλες περιπτώσεις αντί για φυλλάριο μολύβδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί γράσο ή κάποιο άλλο λιπαντικό. Επίσης, σε μερικές συσκευές η ρύθμιση του χρόνου

γίνεται με τη χρήση μεταλλικού πρότυπου δοκιμίου γνωστών χρόνων διέλευσης κυμάτων P και S.

2) Τοποθετείται το δοκίμιο του πετρώματος μεταξύ των δύο μετατροπέων, προσέχοντας πάντα το φυλλάριο μολύβδου και η θέση των μετατροπέων να είναι η σωστή. Τώρα σε όλο το σύστημα (μετατροπέας, φυλλάριο μολύβδου, δοκίμιο, φυλλάριο μολύβδου, μετατροπέας) εφαρμόζεται πάλι βάρος 8,9 kg.

3) Στο πρόγραμμα του ηλεκτρονικού υπολογιστή καταγράφεται το μήκος κάθε δοκιμίου κάθε φορά και ξεκινώντας την εκπομπή σημάτων λαμβάνονται 10 μετρήσεις από τις οποίες κρατιέται η μεγαλύτερη και παρουσιάζεται η κυματομορφή των P κυμάτων. Τέλος το πρόγραμμα καταγράφει τον χρόνο διάδοσης του ταχύτερου σήματος σε μs και υπολογίζει την ταχύτητα διάδοσης σε m/s.

6.6.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Υπολογισμοί

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Δοκίμιο	Μήκος (m)	Μήκος με φύλλα μολύβδου (m)	Χρόνος (μs)	Ταχύτητα (m/s)	Λόγος Poisson	Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας (GPa)
Ta_01	0,1404	0,143	22,4	6383	0,43	37,96
Ta_02	0,1386	0,142	15,1	9404	0,49	13,70
Ta_03	0,1503	0,153	22,6	6769	0,46	26,14

Οι τιμές των ταχυτήτων που λήφθηκαν επιβεβαιώθηκαν από τον τύπο της ταχύτητας που είναι το μήκος του δοκιμίου προς τον χρόνο.

Έπειτα προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_{dyn}) από τον τύπο που αναφέρθηκε προηγουμένως.

$$Vp = \sqrt{\frac{E_{dyn} * (1 - \nu)}{\rho * (1 + \nu) * (1 - 2\nu)}}$$

Ο λόγος Poisson υπολογίστηκε στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Προκύπτει ότι η μέση τιμή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας είναι 25,9 GPa.

6.7. Προσδιορισμός σκληρότητας με το σκληροσκόπιο Shore

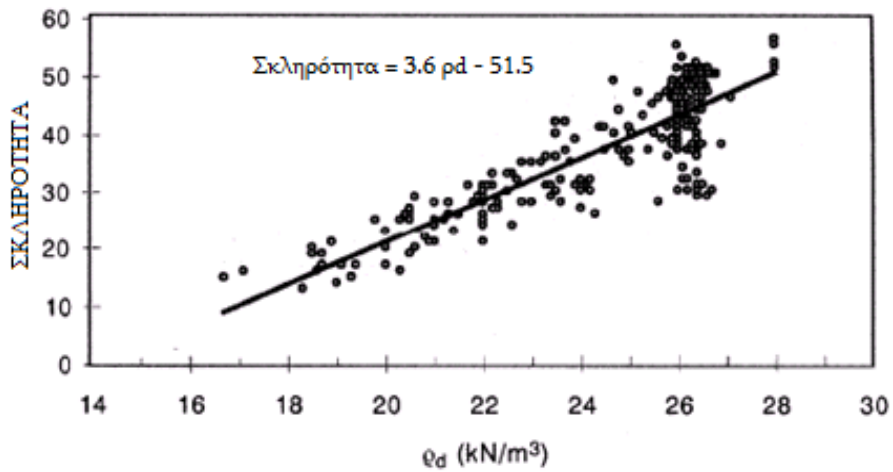
6.7.1. Γενικά

Η σκληρότητα των ορυκτών ως γνωστόν, καθορίζεται από την αντίσταση που αυτά παρουσιάζουν κατά τη χάραξη τους και εμπειρικά εκτιμάται με την κλίμακα Mohs, η οποία αποτελεί μία δεκαβάθμια κλίμακα που αντιπροσωπεύεται από δέκα τυπικά ορυκτά αυξανόμενης σκληρότητας, από No 1 (τάλκης) μέχρι No 10 (διαμάντι).

Στο ακέραιο πέτρωμα όμως, το οποίο αποτελείται από διάφορα ορυκτά διαφορετικής σκληρότητας κατά Mohs, η κλίμακα αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εφαρμόζονται άλλες μέθοδοι όπως είναι η δοκιμή με το σφυρί αναπήδησης Schmidt τύπου L αλλά και άλλες εύχρηστες μέθοδοι όπως το σκληροσκόπιο Shore.

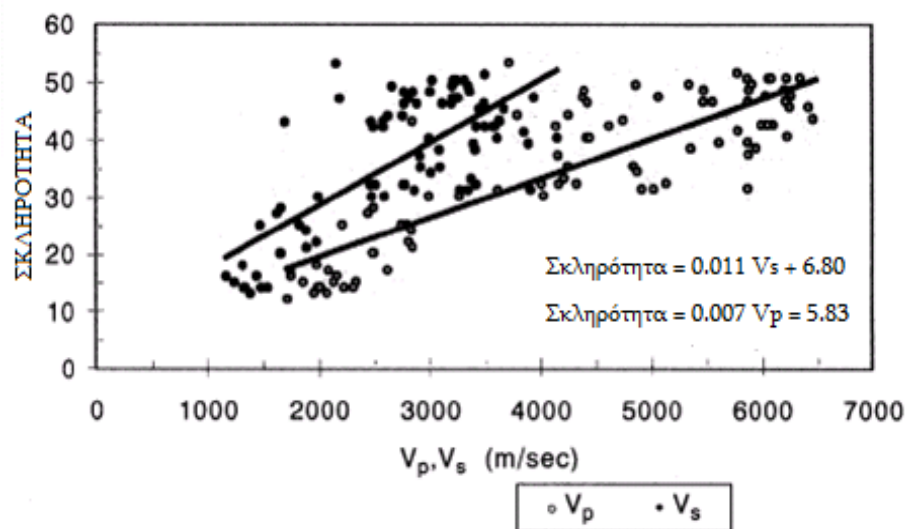
Το σφυρί Schmidt τύπου L, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο καλά στο εργαστήριο και στην ύπαιθρο, είναι εφοδιασμένο με τυποποιημένη κλίμακα ενδείξεων των "τιμών αναπήδησης" που αντιστοιχούν στη σκληρότητα του πετρώματος.

Με την εκτίμηση της σκληρότητας είναι δυνατός ο έμμεσος προσδιορισμός της μηχανικής αντοχής του ακέραιου πετρώματος σε ανεμπόδιση θλίψη. Γενικά η σκληρότητα του ακέραιου πετρώματος εξαρτάται από το είδος και την αναλογία των ορυκτών που το συνιστούν, το είδος και την αντοχή των δεσμών που υπάρχουν μεταξύ των ορυκτών αυτών, αλλά και της συγκολλητικής ύλης. Αύξηση της πυκνότητας του ακέραιου πετρώματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του.



Σχήμα 6.7. Σχέση ξηρής πυκνότητας ρ_d και σκληρότητας για ασβεστολιθικά πετρώματα (Κούκης 1998)

Επίσης, η σκληρότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων P και S στο βραχώδες υλικό.



Σχήμα 6.8. Σχέση ταχυτήτων υπερήχων (V_p και V_s) και σκληρότητας για ασβεστολιθικά πετρώματα (Κούκης 1998)

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η ταξινόμηση του βραχώδους υλικού ανάλογα με τη σκληρότητα του.

Πίνακας 6.4. Ταξινόμηση ακέραιου πετρώματος ανάλογα με τη σκληρότητα του

Κατηγορία πετρωμάτων	Μέση σκληρότητα
Πολύ μαλακά πετρώματα	< 10
Μαλακά πετρώματα	10 - 20
Μέτρια πετρώματα	20 - 50
Σκληρά πετρώματα	50 - 60
Πολύ σκληρά πετρώματα	> 60

6.7.2. Σκοπός της δοκιμής

Η δοκιμή σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore είναι μια εργαστηριακή δοκιμή που έχει σαν στόχο τον προσδιορισμό της σκληρότητας του πετρώματος και των ορυκτών του καθώς και την πιστοποίηση της ικανότητας ακριβούς σκληρομέτρησης άλλων πειραματικών συσκευών.

Γενικά η σκληρότητα ενός πετρώματος μπορεί να προσδιοριστεί σαν ο μέσος όρος πολυάριθμων διαφορετικών μετρήσεων σε τυχαίες θέσεις του δοκιμίου και σε διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης κόκκους. Από πολλούς συγγραφείς επίσης έχουν προταθεί απλές εμπειρικές σχέσεις που βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα ομάδας πετρωμάτων και συνδέουν την σκληρότητα Shore με την αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη.

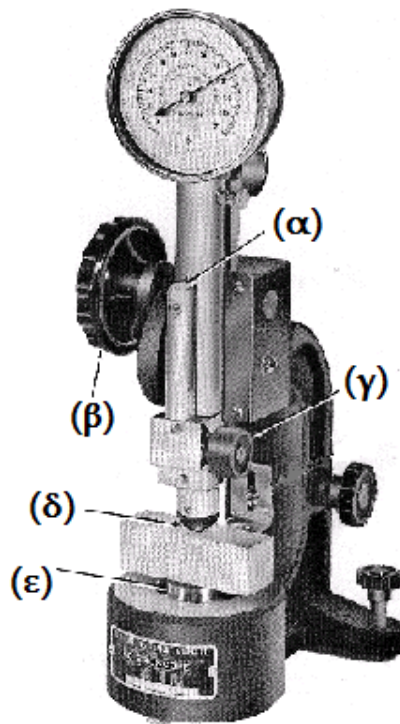
Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι όσο πιο σκληρό είναι το πέτρωμα τόσο πιο μεγάλη αντίσταση παρουσιάζει έναντι διείδυσης από τα κοπτικά εργαλεία.

6.7.3. Πειραματική συσκευή

Στις εργαστηριακές μας δοκιμές χρησιμοποιήσαμε το σκληροσκόπιο Shore μοντέλου D, το οποίο είναι και το πιο κατάλληλο για την σκληρομέτρηση των πετρωμάτων.

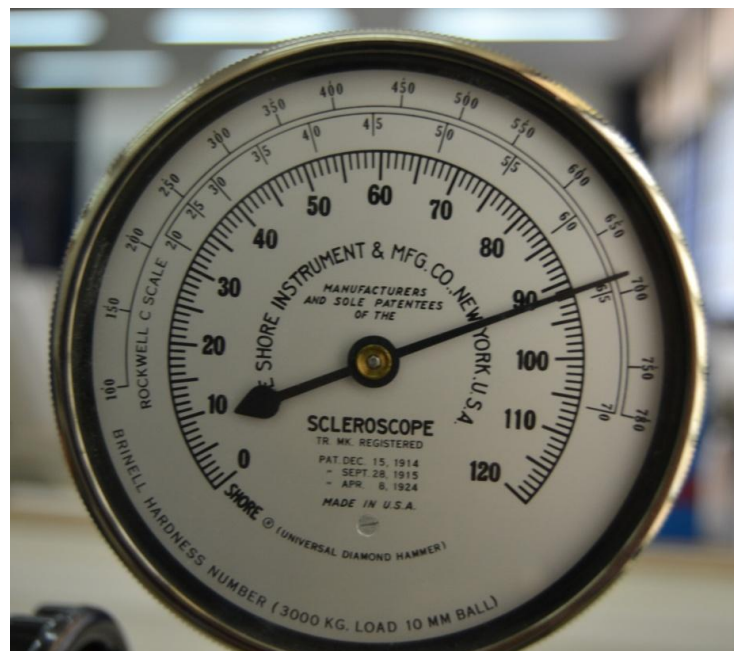
Το σκληροσκόπιο Shore όπως φαίνεται στο σχήμα 6.9 αποτελείται από έναν κάθετα τοποθετημένο κύλινδρο. Μια κεφαλή που φέρει διαμάντι κινείται πνευματικά

ή μηχανικά μέσω κατάλληλης διάταξης. Ένα σφυρί πέφτει από ένα καθορισμένο ύψος και αναπηδά. Η τιμή της σκληρότητας εμφανίζεται σε έναν αναλογικό μετρητή με βαθμονομημένη κλίμακα από 0 μέχρι 120.



- (α) ένδειξη αεροστάθμης
- (β) κοχλίας ρύθμισης θέσης του (ε)
- (γ) περιστρεφόμενος κοχλίας ακινητοποίησης κωνικής αιχμής
- (δ) κωνική αιχμή επαφής με το δοκίμιο
- (ε) βάση τοποθέτησης του δοκιμίου

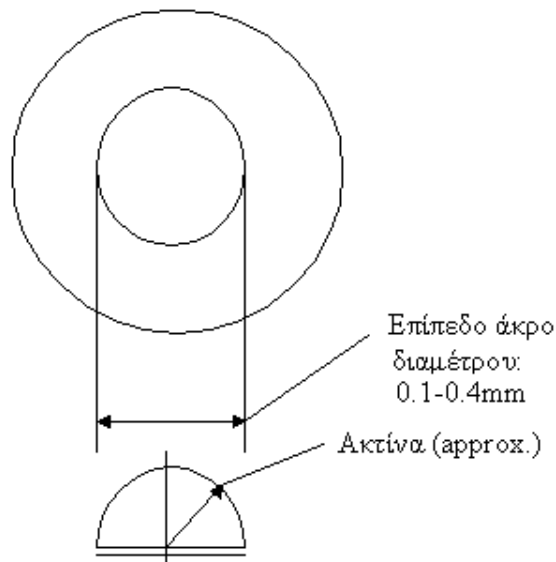
Σχήμα 6.9. Σκληροσκόπιο Shore (μοντέλο D)



Φώτο 6.4. Λεπτομέρεια μετρητικού οργάνου σκληροσκόπιου Shore

Το αδαμάντινο άκρο πρέπει να είναι σχηματισμένο έτσι ώστε να παράγει την σωστή ανάγνωση στις στήλες αναφοράς, οι οποίες έχουν γνωστή σκληρότητα. Εάν κάνουμε μια τομή στο αδαμάντινο άκρο θα δούμε ότι είναι κυρτό και έχει ακτίνα που καταλήγει σε μια επίπεδη κρουστική επιφάνεια όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.10.

Η επίπεδη επιφάνεια κρούσης του άκρου είναι περίπου κυκλικής διατομής 0.1 – 0.4 mm και η γεωμετρία της εξαρτάται από την σκληρότητα και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιημένου διαμαντιού.



Σχήμα 6.10. Τομή του αδαμάντινου άκρου του σκληροσκόπιου Shore

6.7.4. Περιγραφή δοκιμής

Πριν από κάθε ημερήσια χρήση, πρέπει να γίνουν τουλάχιστον 5 δοκιμαστικές μετρήσεις σε προτυποποιημένο δοκίμιο γνωστής σκληρότητας που παρέχεται από τον κατασκευαστή. Εάν οι τιμές που προκύπτουν βρίσκονται εντός του προβλεπόμενου εύρους η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει. Εάν οι τιμές βρίσκονται εκτός του εύρους, τότε η συσκευή πρέπει να καλιμπραριστεί σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

Τοποθετούμε το δοκίμιο κάθετα στον άξονα του σκληροσκόπιου και το συγκρατούμε με ασφάλεια στην επίπεδη επιφάνεια δοκιμής της συσκευής. Στην συνέχεια ανεβάζουμε το σφυρί με την βοήθεια των περιστρεφόμενων κουμπιών στην

άνω θέση και το αφήνουμε να χτυπήσει την επιφάνεια δοκιμής μετρώντας το ύψος αναπήδησης του σφυριού. Το ύψος που αναπήδησε κατά την πρώτη φορά δείχνει την σκληρότητα του πετρώματος.

Προκειμένου να αποφευχθούν λάθη που προκύπτουν από κακή ευθυγράμμιση, το σκληροσκόπιο θα πρέπει να τοποθετείται στην επιφάνεια της δοκιμής και να είναι ευθυγραμμισμένο και οριζοντιωμένο ώστε το σφυρί να προσκρούει κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Οι πλευρικές δονήσεις θα πρέπει να αποφεύγονται εφόσον τείνουν να προκαλούν παρεμπόδιση της ελεύθερης πτώσης της σφύρας και ως εκ τούτου οι τιμές που παίρνουμε να είναι χαμηλότερες από τις πραγματικές.

Πιθανότητα σφάλματος υπάρχει και όταν οι διαδοχικές δοκιμές γίνονται πολύ κοντά ή μια στην άλλη. Τα σημεία που γίνονται οι μετρήσεις θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 5 mm και δεν θα πρέπει να γίνονται περισσότερες από μια μετρήσεις στο ίδιο σημείο.



Φώτο 6.5. Σκληροσκόπιο Shore του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων

6.7.5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Υπολογισμοί

Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 20 μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του δοκιμίου. Σημειώθηκαν 4 γενέτειρες με γωνία 90° και πάνω σε καθεμία από αυτές κάναμε 5 μετρήσεις. Έπειτα στο μέσο κάθε γενέτειρας λήφθηκαν 20 μετρήσεις παίρνοντας την πρώτη και την εικοστή τιμή για να υπολογιστεί ο συντελεστής πλαστικότητας K.

Με βάση τον συντελεστή πλαστικότητας τα πετρώματα διακρίνονται σε πλαστικά (μεγάλες τιμές σκληρότητας) και ψαθυρά (για μικρές τιμές). Τα πλαστικά πετρώματα παραμορφώνονται περισσότερο από τα ψαθυρά κάτω από την επίδραση της ίδιας τάσης. Οι μετρήσεις της σκληρότητας των τριών δοκιμίων αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες.

Δοκίμιο Ta_01	ΓΕ - 1	ΓΕ - 2	ΓΕ - 3	ΓΕ - 4
Μέτρηση 1	45	44	43	45
Μέτρηση 2	45	48	43	45
Μέτρηση 3	47	48	51	46
Μέτρηση 4	46	49	43	48
Μέτρηση 5	44	45	38	47
Μέσος όρος 45,5				

Δοκίμιο Ta_02	ΓΕ - 1	ΓΕ - 2	ΓΕ - 3	ΓΕ - 4
Μέτρηση 1	43	41	42	39
Μέτρηση 2	45	45	45	44
Μέτρηση 3	46	50	46	50
Μέτρηση 4	45	43	46	46
Μέτρηση 5	46	42	41	47
Μέσος όρος 44,6				

Δοκίμιο Ta_03	ΓΕ - 1	ΓΕ - 2	ΓΕ - 3	ΓΕ - 4
Μέτρηση 1	45	42	41	42
Μέτρηση 2	47	48	46	40
Μέτρηση 3	50	43	46	47
Μέτρηση 4	47	46	42	46
Μέτρηση 5	44	41	45	40
Μέσος όρος 44,4				

Σύμφωνα με τα πιο πάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η μέση σκληρότητα των δοκιμών με το σκληρόμετρο Shore είναι 44,8. Άρα μπορεί να χαρακτηριστεί μέτριας σκληρότητας πέτρωμα.

Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό του συντελεστή πλαστικότητας παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες. Ο συντελεστής πλαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση του (Brown,1981 – McFeat-Smith,1977):

$$K = \frac{H20 - H1}{H20} \times 100$$

όπου K: συντελεστής πλαστικότητας %

H20: τελική τιμή σκληρότητας ύστερα από 20 μετρήσεις στο ίδιο σημείο

H1: τιμή σκληρότητας ύστερα από την πρώτη ανάκρουση

Δοκίμιο Ta_01	ΓΕ - 1	ΓΕ - 2	ΓΕ - 3	ΓΕ - 4	Μέση τιμή
Μέτρηση 1	50	49	50	49	
Μέτρηση 20	44	64	60	53	
Συντελεστής Πλαστικότητας	-13,64	23,44	16,67	7,55	42,63

Δοκίμιο Ta_02	ΓΕ - 1	ΓΕ - 2	ΓΕ - 3	ΓΕ - 4	Μέση τιμή
Μέτρηση 1	50	48	51	51	
Μέτρηση 20	59	52	47	57	
Συντελεστής Πλαστικότητας	15,25	7,69	-8,51	10,53	11,16

Δοκίμιο Ta_03	ΓΕ - 1	ΓΕ - 2	ΓΕ - 3	ΓΕ - 4	Μέση τιμή
Μέτρηση 1	45	51	39	44	
Μέτρηση 20	52	53	40	55	
Συντελεστής Πλαστικότητας	13,46	3,77	2,50	20,00	24,73

Ο συντελεστής πλαστικότητας K κυμαίνεται από 2,5% έως 23,44%. Η σφύρα του σκληρόμετρου στο δοκίμιο Ta_01 στη γενέτειρα 1, έπειτα από 20 διαδοχικές προσκρούσεις στο ίδιο σημείο είχε μικρότερη αναπήδηση, δίνοντας με αυτό τον τρόπο συντελεστή πλαστικότητας αρνητικό, γεγονός που καθιστά την δοκιμή μη αποδεκτή. Το ίδιο συνέβηκε και στο δοκίμιο Ta_02 στη γενέτειρα 3. Αυτό πιθανότατα συνέβηκε γιατί μπορεί να υπήρχε ένα διαφορετικό ορυκτό σε εκείνο το σημείο ή ενδεχομένως να υπήρχε κενό. Το πέτρωμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ψαθυρό υλικό.

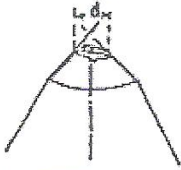
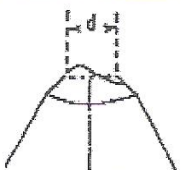

6.8. Δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar

6.8.1. Γενικά

Η ιδιότητα της αποξεστικής ικανότητας του πετρώματος (abrasiveness) είναι μία από τις ιδιότητες των πετρωμάτων η οποία μπορεί να προσδιοριστεί και να μετρηθεί έτσι ώστε να αποτιμηθεί εάν ένα πέτρωμα είναι κατάλληλο για μηχανική εκσκαφή. Η αποξεστική ικανότητα του πετρώματος αφορά στην φθορά που προκαλεί το πέτρωμα στα διάφορα κοπτικά άκρα μηχανημάτων και όχι στην φθορά (θραύση) που υφίσταται το ίδιο το πέτρωμα. Για αυτό τον λόγο πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού της αποξεστικής ικανότητας των πετρωμάτων βρίσκουν εφαρμογή σήμερα. Ιδιαίτερα η δοκιμή Cerchar είναι πολύ διαδεδομένη για πετρώματα και χρησιμοποιείται με αυξανόμενο ρυθμό σαν μέθοδος αποτίμησης της αποξεστικής ικανότητας των πετρωμάτων στην εξόρυξη τους με μηχανικά μέσα.

6.8.2. Σκοπός της δοκιμής

Με την δοκιμή Cerchar προσδιορίζεται η φθορά που προκαλεί το δοκίμιο του πετρώματος σε μία κυλινδρική ράβδο της οποίας το κάτω άκρο καταλήγει σε ένα σημείο το οποίο είναι τομή κωνικών πλευρών γωνίας 90° (ακίδα). Η ράβδος αυτή εφαρμόζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου με την βοήθεια βάρους 7 kg. Κατά την επιβολή του φορτίου του βάρους το δοκίμιο μέσω κατάλληλης διάταξης μετακινείται κατά 10mm με αποτέλεσμα την δημιουργία χαραγής στην επιφάνεια του. Η αποξεστικότητα (abrasiveness) του πετρώματος προσδιορίζεται μετρώντας την φθορά που προκαλείται στον ατσάλινο κώνο ο οποίος παραμορφώνεται αποκτώντας επίπεδη επιφάνεια (σχήμα 6.11). Η μονάδα της αποξεστικότητας πετρώματος CAI (Cerchar Abrasiveness Index) ορίζεται ως η φθορά που αντιστοιχεί στη δημιουργία επίπεδης επιφάνειας στο κοπτικό άκρο διαμέτρου 0.1 mm

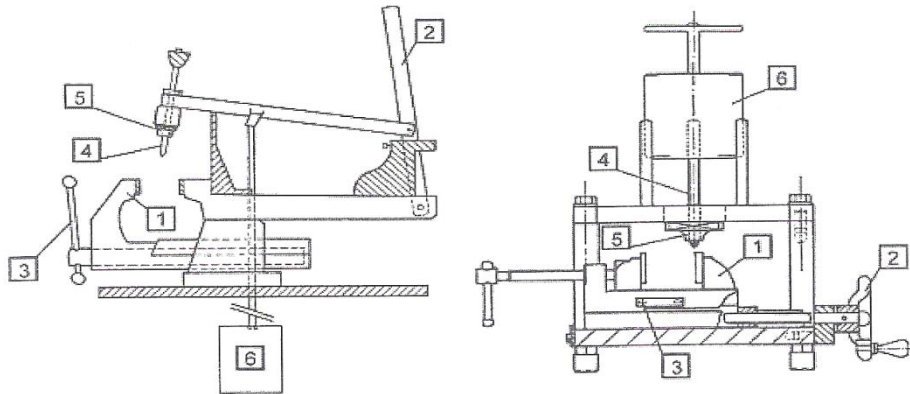
		
α. κανονική φθορά	β. ασύμμετρη φθορά	γ. ακανόνιστη, τραχεία επιφάνεια
έγκυρη δοκιμή	υπολογισμός μέσης τιμής μεταξύ των δύο πλευρών	αναστροφής μέτρηση, επανάληψη της δοκιμής

Σχήμα 6.11. Μεγέθυνση της τομής του κοπτικού άκρου πριν και μετά την δοκιμή Cerchar

6.8.3. Πειραματική συσκευή

Το δοκίμιο του πετρώματος συγκρατείται με την βοήθεια μίας μέγγενης (1), (σχήμα 6.12 συσκευή West), η οποία μπορεί να μετακινείται εγκάρσια προς την βάση της συσκευής μέσω χειροτροχού (2), προσαρμοσμένου σε κοχλία με σπείρωμα βήματος 1 mm/πλήρης περιστροφή. Η μετατόπιση της μέγγενης μπορεί να μετρηθεί στην κλίμακα (3). Μία κυλινδρική χαλύβδινη ράβδος με κωνικό άκρο 90° (4), η οποία προσαρμόζεται χωρίς τριβές στην οπή (5), εφαρμόζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου

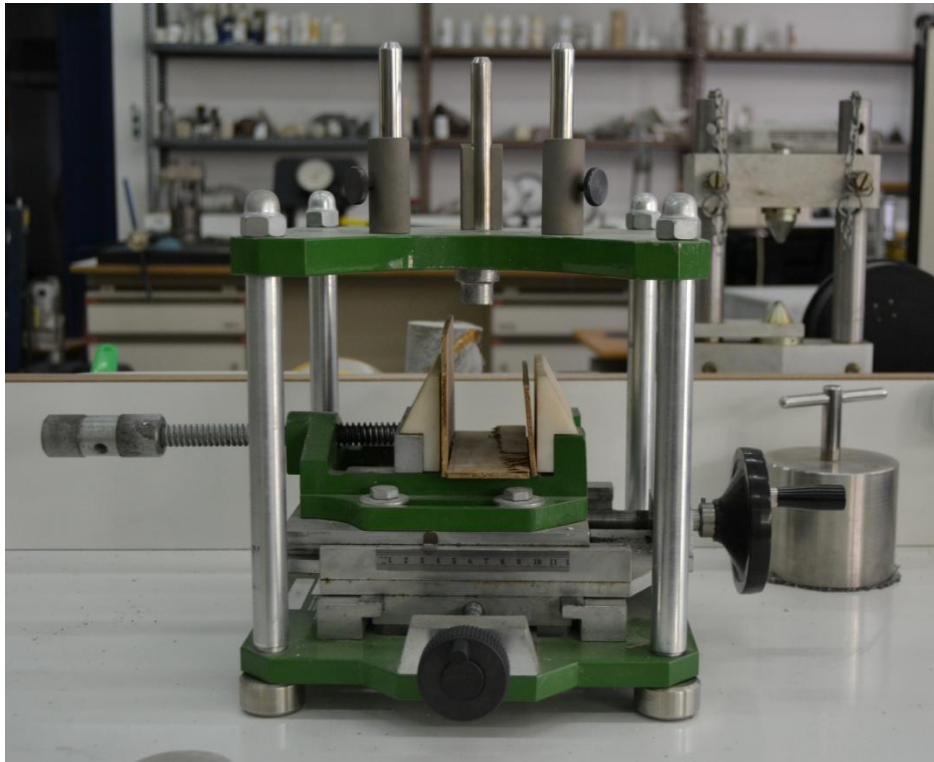
και φορτίζεται με ένα βάρος (6): το συνολικό φορτίο που εξασκείται στην επιφάνεια του δοκιμίου συμπεριλαμβανομένου και του εργαλείου είναι 70N.



Σχήμα 6.12. Πειραματική συσκευή δοκιμής φθοροποιού ικανότητας πετρώματος Cerchar

Αριστερά: Αυθεντική πειραματική συσκευή Cerchar

Δεξιά: Πειραματική συσκευή Cerchar του West



Φώτο 6.6. Πειραματική συσκευή δοκιμής Cerchar του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων



Φώτο 6.7. Κοπτικά εργαλεία (ακίδες) με κωνική ακμή 90°

6.8.4. Περιγραφή δοκιμής

Αφού προσαρμόσουμε το δοκίμιο στις σιαγώνες της μέγγενης, τοποθετούμε το κοπτικό εργαλείο στην οπή και το εφαρμόζουμε στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στην συνέχεια επιβάλλουμε το φορτίο και η μέγγνη μετακινείται κατά 10mm με περιστροφή του χειροτροχού κατά 10 πλήρεις κύκλους. Η μετατόπιση ελέγχεται μέσω κλίμακας.



Φώτο 6.8. Δοκιμή Cerchar

Αφαιρείται το φορτίο καθώς και το κοπτικό εργαλείο. Συνίσταται ο καθαρισμός του κωνικού άκρου από τυχόν εναπομείναντα θρύμματα πετρώματος έτσι ώστε να τοποθετηθεί σε μικροσκόπιο κατάλληλης μεγέθυνσης και ανάγνωσης (μεγέθυνση X24 βαθμονομημένο ανά 0.01 in και αναγνώσιμο ανά 0,001 in). Με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με το μικροσκόπιο, μετρείται η φθορά της κωνικής ακμής σε δυο διαμέτρους οι οποίες σχηματίζουν γωνία 90° και υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο δείκτης αποξεστικότητας που είναι η μέση διάμετρος του κωνικού άκρου (mm) πολλαπλασιασμένη επί δέκα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

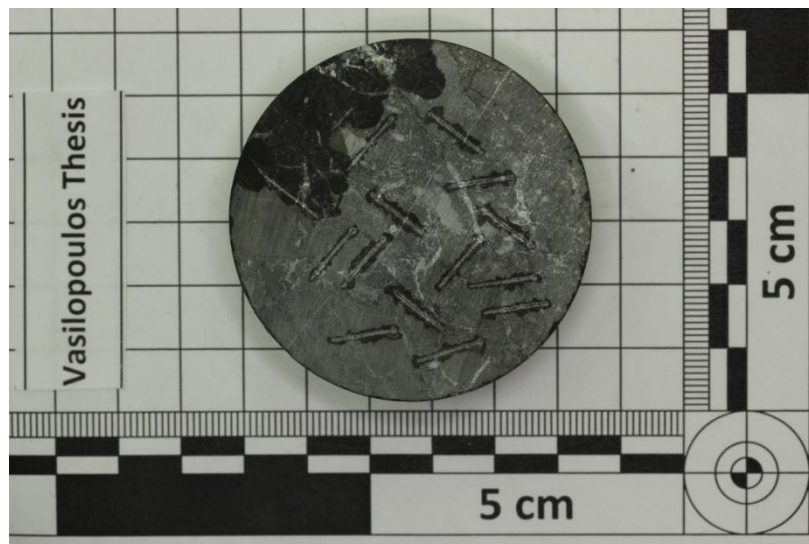
$$CAI = 10 \frac{1}{n} \sum_n d$$

Όπου CAI : Ο δείκτης αποξεστικότητας Cerchar του πετρώματος

n: Ο αριθμός δοκιμών για κάθε δοκίμιο (συνήθως 5)

d: Η διάμετρος επίπεδης επιφάνειας φθοράς (mm)

Συνολικά γίνονται δέκα δοκιμές για κάθε δοκίμιο, πέντε με ακίδες σκληρότητας κατά Rockwell 55 και πέντε με ακίδες σκληρότητας 40, σε σημεία όμως που δεν υπάρχει επαφή μεταξύ τους και ούτε πρόκειται να υπάρξει κατά την δοκιμή. Έπειτα υπολογίζεται ο μέσος όρος του δείκτη αποξεστικότητας.



Φώτο 6.9. Αύλακες στην επιφάνεια του Tb_02 έπειτα από την πραγματοποίηση της δοκιμής

6.8.5. Αποτελέσματα - Υπολογισμοί

Οι μετρήσεις όλων των διαμέτρων καθώς και οι υπολογισμοί του δείκτη αποξεστικότητας για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στο παράρτημα 2. Επίσης, παρέχονται ενδεικτικά λίγες φωτογραφίες των ακίδων έτσι όπως εμφανίζονται από το μικροσκόπιο, με σημειωμένες τις διαμέτρους.

Έπειτα από υπολογισμούς διαπιστώθηκε ότι η φθοροποιός ικανότητα του ασβεστόλιθου είναι κατά μέσο όρο 1,11 για ακίδες σκληρότητας 55 και 2,07 για ακίδες σκληρότητας 40.

Με την βοήθεια του παρακάτω πίνακα κατάταξης μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το πέτρωμα μας.

Πίνακας 6.5. Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον δείκτη αποξεστικότητας CAI
(Michalakopoulos et al., 2005)

Κατάταξη	Δείκτης Cerchar (55)	Δείκτης Cerchar (40)
Ελάχιστα φθοροποιό	0,30 – 0,50	0,32 – 0,66
Λίγο φθοροποιό	0,50 – 1,00	0,66 – 1,51
Μετρίως φθοροποιό	1,00 – 2,00	1,51 – 3,22
Πολύ φθοροποιό	2,00 – 4,00	3,22 – 6,62
Εξαιρετικά φθοροποιό	4,00 - 6,00	6,62 - 10,03

Συμπεραίνουμε ότι το πέτρωμα μας είναι μετρίως φθοροποιό.

6.9. Προσδιορισμός της αντοχής των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη

6.9.1. Μηχανική αντοχή

Η αντοχή είναι μια πολύ βασική μηχανική παράμετρος του ακέραιου πετρώματος και αντιπροσωπεύει το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης σε αυτό, ώστε να σημειωθεί θραύση (failure) αυτού. Η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να είναι θλιπτική (compressive), διατμητική (shear) ή εφελκυστική (tensile), οπότε σημειώνονται και οι αντίστοιχες αντοχές. Από αυτές, η θλιπτική αντοχή είναι η πλέον σημαντική και μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα ή έμμεσα με τη χρήση διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών.

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του ακέραιου πετρώματος γίνεται στο εργαστήριο άμεσα με τη δοκιμή σε μονοαξονική (ανεμπόδιστη) θλίψη και έμμεσα στο εργαστήριο ή στο ύπαιθρο με τη δοκιμή σε σημειακή φόρτιση όπου υπολογίζεται ο δείκτης σημειακής φόρτισης $Is_{(50)}$ ή με τη χρήση του σφυριού Schmidt-L, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στη σκληρότητα.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που κυρίως έχουν σχέση με (Hawkes and Mellor 1970):

1. Το υλικό του πετρώματος δηλαδή την ορυκτολογική σύσταση, το μέγεθος των κόκκων, την ανισοτροπία μικρής κλίμακας (π.χ. σχιστότητα) κ.λπ.
2. Την περιεχόμενη υγρασία του
3. Τις συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής και τη διαμόρφωση των δειγμάτων (δηλαδή λόγος μήκους - διαμέτρου του δοκιμίου, ρυθμός φόρτισης, παραλληλία βάσεων δοκιμίου κ.λπ.).

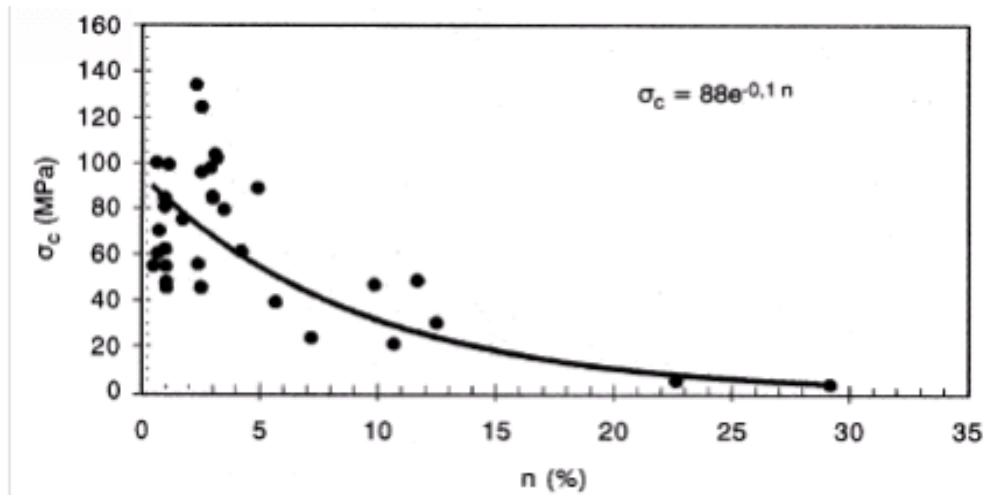
Η ταξινόμηση του βραχώδους υλικού σύμφωνα με την αντοχή του σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη δίνεται στον πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6. Ταξινόμηση βραχώδους υλικού με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Κατάταξη πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση
Εξαιρετικά υψηλής αντοχής	> 250	Ο πυρήνας (δείγμα) δεν σπάζει με το γεωλογικό σφυρί
Πολύ υψηλής αντοχής	100 - 250	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται πολλά χτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί
Υψηλής αντοχής	50 - 100	Για να σπάσει ο πυρήνας χρειάζονται περισσότερα από ένα χτυπήματα
Μέσης αντοχής	25 - 50	Ο πυρήνας δεν χαράσσεται με μαχαίρι και μπορεί να σπάσει με ένα χτύπημα γεωλογικού σφυριού
Χαμηλής αντοχής	5 - 25	Ο πυρήνας χαράσσεται δύσκολα με το μαχαίρι και η μύτη του γεωλογικού σφυριού δημιουργεί αβαθείς χαραγές
Πολύ χαμηλής αντοχής	1 - 5	Ο πυρήνας σπάει σε πολλά κομμάτια με το γεωλογικό σφυρί και χαράσσεται εύκολα με το μαχαίρι
Εξαιρετικά χαμηλής αντοχής	0,25 - 1	Ο πυρήνας χαράσσεται εύκολα με το νύχι

Από συσχετίσεις αποτελεσμάτων αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σ_c) με άλλες παραμέτρους του βραχώδους υλικού φαίνεται ότι:

- Αύξηση της πυκνότητας προκαλεί αύξηση της αντοχής
- Αύξηση του πορώδους προκαλεί μείωση της αντοχής
- Αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας προκαλεί μείωση της αντοχής



Σχήμα 6.13. Μεταβολή της αντοχής με το πορώδες (στοιχεία από ΚΕΔΕ)

Δοκίμια ακέραιου πετρώματος που έχουν ξηρανθεί παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από αυτά που έχουν κάποια περιεχόμενη υγρασία.

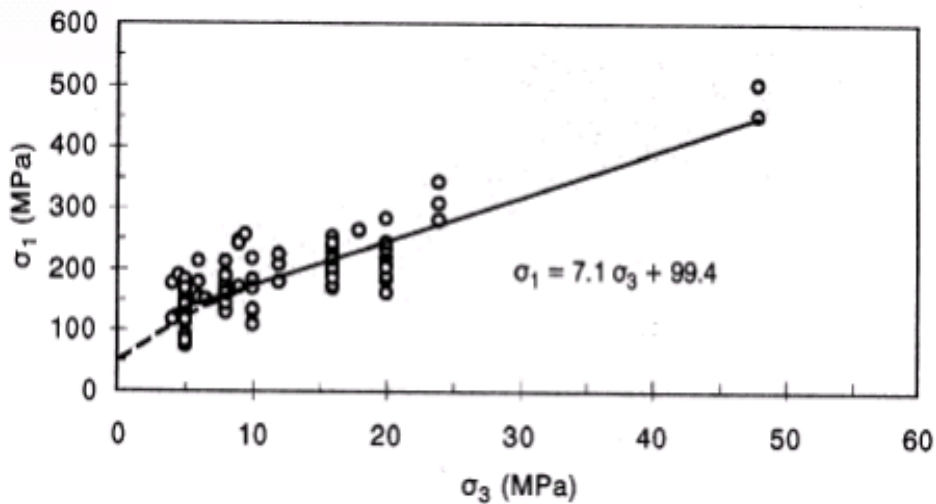
Η εφελκυστική αντοχή (στ) των πετρωμάτων είναι από τις λιγότερο συχνά προσδιοριζόμενες μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων αφού στις εφαρμογές χρησιμοποιείται συνήθως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Είναι γενικά μικρότερη της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και εκτιμάται ότι η εφελκυστική αντοχή ενός πετρώματος αποτελεί το 5-10% της αντοχής του σε μονοαξονική θλίψη (Herndon 1982).

Εύρος τιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σc), σκληρότητας Shore, αντοχής σε σημειακή φόρτιση (Is(50)) καθώς επίσης και σε εφελκυσμό (με δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού Brazilian) δίνονται στον πίνακα 6.7 από αρχεία του ΚΕΔΕ (Κεντρικό Εργαστήριο Δημόσιων Έργων).

Πίνακας 6.7. Εύρος τιμών παραμέτρων αντοχής από πετρώματα του Ελληνικού χώρου

Ακέραιο πέτρωμα	Σκληρότητα Shore	$I_s(50)$ (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)
Ασβεστόλιθος	20 - 55	2 - 7,5	20 - 200	2 - 15
Μικροκρυσταλλικός, συμπαγής ασβεστόλιθος	35 - 55	4 - 7,5	80 - 200	7 - 15
Δολομιτωμένος ασβεστόλιθος	15 - 45	1 - 6	10 - 100	1 - 10
Μαργαϊκός ασβεστόλιθος	10 - 35	< 1 - 6	5 - 60	< 1 - 6
Μαργόλιθος - ιλυόλιθος	< 10 - 30	< 1 - 3	< 1 - 40	< 1 - 3
Ψαμμίτης	10 - 50	< 1 - 5	< 1 - 80	< 1 - 8
Μάρμαρο	30 - 60	3 - 9	50 - 250	5 - 20
Σχιστόλιθος	10 - 45	< 1 - 7	2 - 80	< 1 - 6

Η μηχανική αντοχή που αναφέρεται σε μονοαξονικές συνθήκες, δηλαδή επίδραση μόνο αξονικής τάσης (σ_1) χωρίς την ύπαρξη πλευρικών (σ_2 και σ_3) στο πέτρωμα, στις πραγματικές συνθήκες είναι πολύ δύσκολη περίπτωση να συμβεί. Και αυτό διότι το βραχώδες υλικό υποβάλλεται σε πλευρικές τάσεις οι οποίες βέβαια θεωρούνται συνήθως ίσες μεταξύ τους και θεωρητικά αντικαθίστανται από μία ομοιόμορφα πλευρικά εξασκούμενη (σ_3). Οι συνθήκες αυτές προσομοιάζονται με την εκτέλεση κλασικών τριαξονικών δοκιμών στο ακέραιο πέτρωμα, όπου με την εφαρμογή του κριτηρίου θραύσης Mohr-Coulomb (όπως και στα εδάφη) εκτιμώνται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής του βραχώδους υλικού (δηλαδή η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής). Αυξανόμενη της πλευρικής πίεσης (σ_3) αυξάνεται και η μηχανική αντοχή του βραχώδους υλικού. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η σχέση των κυρίων τάσεων (σ_1 και σ_3) για τη θραύση βραχώδους υλικού ασβεστόλιθων.



Σχήμα 6.14. Σχέση κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3) κατά τη θραύση ασβεστολιθικών πετρωμάτων (στοιχεία από ΚΕΔΕ)

6.9.2. Τρόπος θραύσης

Παρακάτω περιγράφεται η συμπεριφορά των πετρωμάτων κατά τη διάρκεια της θραύσης, όπως αυτή προκύπτει από τις πειραματικές δοκιμές.

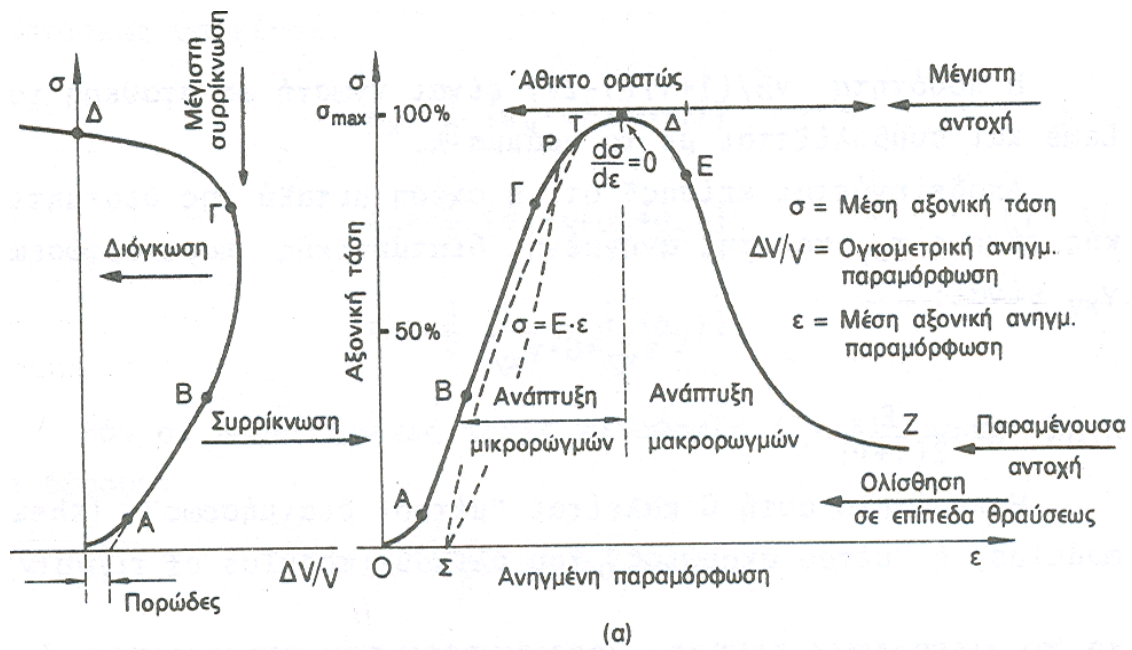
Στο σχήμα 6.15 δίνεται το πλήρες διάγραμμα τάσεως-βραχύνσεως (ή αλλιώς η καμπύλη παραμορφώσεως) ενός πετρώματος, όταν αυτό υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη σε άκαμπτη (stiff) μηχανή.

Το διάγραμμα αυτό μπορεί να χωρισθεί με βάση την μορφή του και τον μηχανισμό ρωγμάτωσης του πετρώματος σε έξι τμήματα:

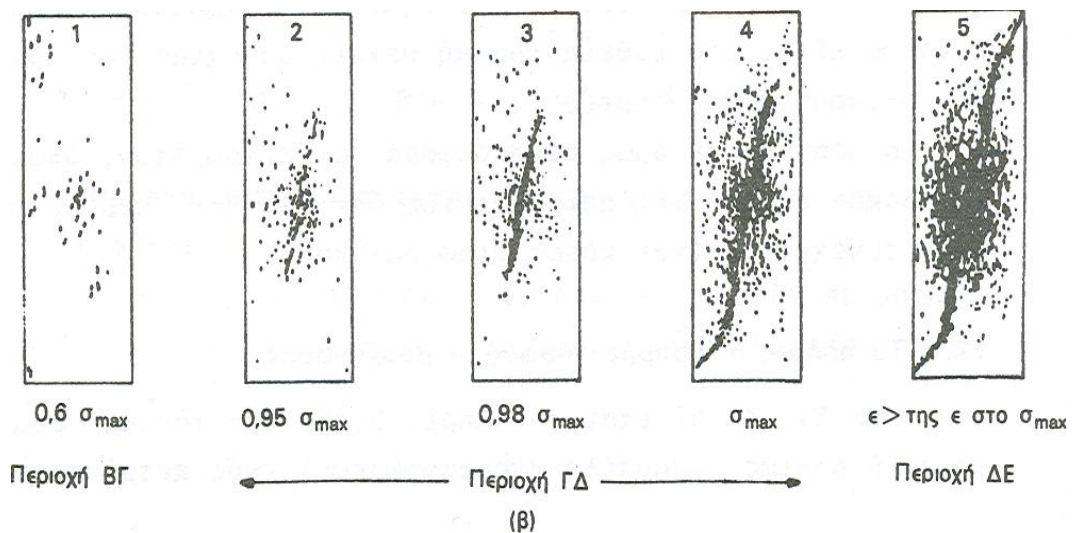
Στο τμήμα ΟΑ, που έχει το κοίλο στραμμένο προς τα πάνω και είναι κατά κανόνα μικρό. Στο τμήμα αυτό παρατηρείται ταχεία αύξηση της βραχύνσεως. Αυτή οφείλεται στο κλείσιμο των πόρων του πετρώματος και των μικρορωγμών, που προϋπήρχαν σε αυτό, εφόσον είναι κατάλληλα προσανατολισμένες σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση. Το τμήμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί χονδρικά ότι είναι ανάλογο σε μήκος με το πορώδες (porosity) του πετρώματος.

Στο τμήμα ΑΒ το πέτρωμα παρουσιάζει μια ευθύγραμμη αξονική και πλευρική σχέση μεταξύ τάσεως – παραμορφώσεως, που είναι αναστρέψιμη. Οι πόροι και οι

μικρορωγμές θεωρείται ότι έχουν κλείσει στο τμήμα αυτό και μόνον ολίσθηση μεταξύ των απέναντι επιφανειών των πιστεύεται ότι συμβαίνει εδώ.



Σχήμα 6.15. Το πλήρες διάγραμμα τάσεως - βραχύνσεως (Τσουτρέλης 1985)



Σχήμα 6.16 Σχετικές μεταβολές στη δομή του δοκιμίου (Τσουτρέλης 1985)

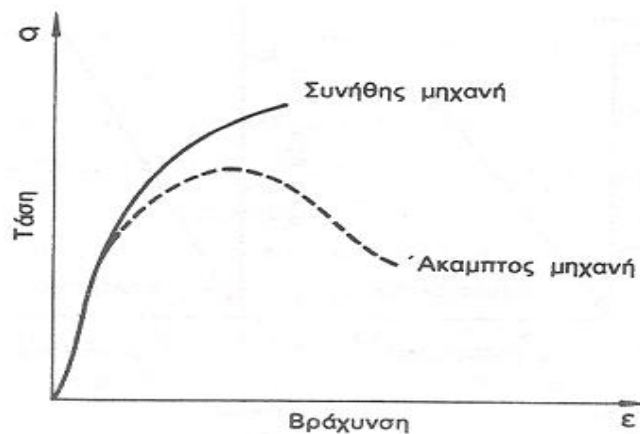
Στο τμήμα ΒΓ, όπου θεωρείται ότι συμβαίνει, με σταθερό ρυθμό και σε όλο το πέτρωμα και κατά ανεξάρτητο μεταξύ τους τρόπο, όπως δείχνει το σχήμα 6.16 (1), επέκταση διαφόρων μικρορωγμών, που προϋπήρχαν. Κατά την αποφόρτιση του δοκιμίου, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μικρή υστέρηση, αλλά γενικά μέχρι το σημείο Γ δεν προκαλούνται στο πέτρωμα μόνιμες παραμορφώσεις. Πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η όλη συμπεριφορά του πετρώματος μέχρι το σημείο Γ είναι γραμμικά ελαστική και επομένως ακολουθεί το νόμο του Hooke. Στο τμήμα ΓΔ, που αρχίζει συνήθως σε εντατική κατάσταση της τάξεως των $2/3$ έως $3/4$ της μέγιστης, η κλίση της καμπύλης $d\sigma/de$ μειώνεται βαθμιαία μέχρι μηδενισμού της στο σημείο Δ, που δίνει την μέγιστη τάση. Το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από ταχεία επιτάχυνση του ρυθμού μικρορωγματώσεως, όπως δείχνουν τα σχήματα 6.16 (2,3,4). Η ανάπτυξη των μικρορωγμών δεν είναι πλέον τυχαία. Πραγματοποιείται σε περιοχές υψηλών τάσεων και οι μικρορωγμές αρχίζουν να ενώνονται μεταξύ τους και να σχηματίζουν εφελκυστικές ρωγμές ή επίπεδα διατμήσεως, ανάλογα με το πέτρωμα και τις συνθήκες δοκιμής. Αλληπάλληλοι κύκλοι φορτίσεως και αποφορτίσεως σχηματίζουν βρόχους σαν το ΡΣΤ του σχήματος 6.15 με μόνιμη πλέον παραμόρφωση του πετρώματος. Συνεπώς το πέτρωμα στην περιοχή αυτή συμπεριφέρεται σαν πλαστικό υλικό. Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι στο υπόψη διάγραμμα το σημείο Γ είναι ταυτόχρονα το όριο αναλογίας και το όριο ελαστικότητας του πετρώματος, δηλαδή το ανώτατο όριο φορτίσεως του οποίου δεν παρατηρούνται μόνιμες παραμορφώσεις.

Στο τμήμα ΔΕ το πέτρωμα πέρασε την μέγιστη τάση, που μπορεί να δεχθεί, και αρχίζει πλέον να γίνεται διαρκώς και ασθενέστερο καθώς αυξάνει η παραμόρφωση του. Η εξωτερική του μορφή φαίνεται ακόμη άθικτη αλλά εσωτερικά η δομή του έχει διαταραχθεί, όπως δείχνει το σχήμα 6.16 (5). Οι μικρορωγμές συγκεντρώνονται και σχηματίζουν πλέον σαφείς μακρορωγμές ή ρήγματα.

Στο τελευταίο τμήμα ΕΖ το πέτρωμα συμπεριφέρεται περισσότερο σαν να αποτελείται από μια σειρά τεμαχίων παρά σαν συνεχές υλικό. Στην αρχή είναι δυνατόν να παρατηρηθεί δευτερογενής θραύση κατά μήκος διάτμητων επιπέδων. Στην συνέχεια παρατηρείται ολίσθηση τεμαχίων του ενός προς το άλλο και η δύναμη,

που αντιδρά στο επιβαλλόμενο φορτίο, φθάνει τελικά σε μια σταθερή τιμή, που ισούται με την αντίσταση τριβής σε ολίσθηση των τεμαχίων.

Τα τμήματα ΔΕ και ΕΖ είναι γενικά περιορισμένα σε έκταση στα πετρώματα και με τις συνήθεις μηχανές δοκιμών δεν μπορούν να ανιχνευθούν ικανοποιητικά, γιατί επισκιάζονται από την παραμόρφωση της μηχανής. Αυτό συμβαίνει γιατί μια συνηθισμένη μηχανή δοκιμών, κατά την επιβολή φορτίου στο δοκίμιο του πετρώματος, υφίσταται και η ίδια παραμόρφωση, όλη δε η ενέργεια, που συσσωρεύεται σε αυτή, ελευθερώνεται την στιγμή της έναρξης της αστοχίας του πετρώματος στο σημείο Δ. Η απότομη αυτή έκλυση ενέργειας προκαλεί άμεση θραύση του δοκιμίου, που συνοδεύεται συνήθως από εκτίναξη των θραυσμάτων του, καμία φορά με βιαιότητα. Αντίθετα σε μια μηχανή, που λίγο μόνον παραμορφώνεται από την αντίδραση του δοκιμίου, μικρή μόνο ποσότητα ενέργειας συσσωρεύεται σε αυτή, που δεν είναι ικανή να προκαλέσει απότομη θραύση και εκτόξευση θραυσμάτων του δοκιμίου, όταν αυτό αρχίζει να αστοχεί στο σημείο Δ. Συνεπώς μόνον σε τέτοια μηχανή είναι δυνατόν να παρακολουθηθεί το διάγραμμα της τάσεως – βραχύνσεως μετά την έναρξη της αστοχίας του δοκιμίου, που εξωτερικά έχει ακόμη όψη άθικτου πετρώματος. Στο σχήμα 6.17 δίνονται για σύγκριση τα σχετικά διαγράμματα σε άκαμπτη και συνήθη μηχανή δοκιμών του ίδιου πετρώματος.

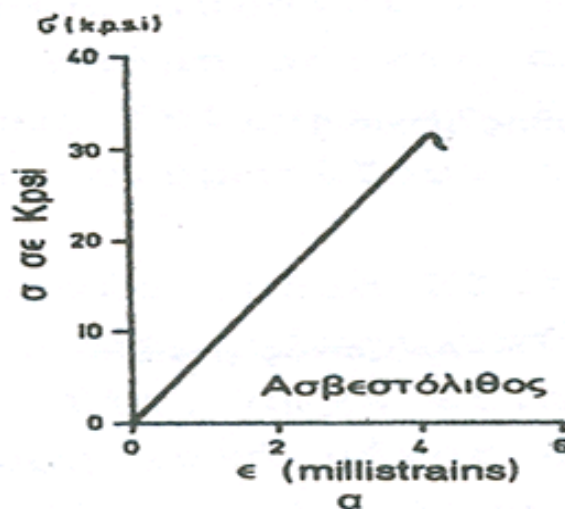


Σχήμα 6.17 Σύγκριση του διαγράμματος τάσεως-βραχύνσεως ενός πετρώματος σε συνήθη και άκαμπτη μηχανή (Τσουτρέλης 1985)

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η παρακολούθηση της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου ανά μονάδα όγκου ($\delta V/V$) σε σχέση με το διάγραμμα τάσεως βραχύνσεως. Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι μετά μια αρχική συρρίκνωση του δοκιμίου, ο όγκος του αρχίζει να αυξάνει, όταν η επιβαλλόμενη τάση φθάσει μεταξύ $2/3$ και $3/4$ της μέγιστης, όπως δείχνει η αριστερή εικόνα του σχήματος 6.15. Η αύξηση αυτή του όγκου, που συνεχίζεται και μετά την διέλευση από το σημείο της μέγιστης τάσεως, μπορεί να εξηγηθεί με το σχηματισμό μικρορωγμών μέσα στο δοκίμιο, που έχουν ως συνέπεια την αύξηση του χώρου και επομένως του όγκου του δοκιμίου.

Η πειραματική λοιπόν αυτή παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πέτρωμα πολύ νωρίς, καθώς καταπονείται, αρχίζει να σχηματίζει εσωτερικά μικρορωγμές, για τις οποίες έγινε ήδη πριν αναφορά. Δεύτερη απόδειξη για το σχηματισμό των μικρορωγμών αυτών προκύπτει από την μικροσεισμική δραστηριότητα, που παρατηρείται.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το χαρακτηριστικό διάγραμμα τάσεως βραχύνσεως ασβεστόλιθου που προέκυψε από άκαμπτη μηχανή δοκιμών.



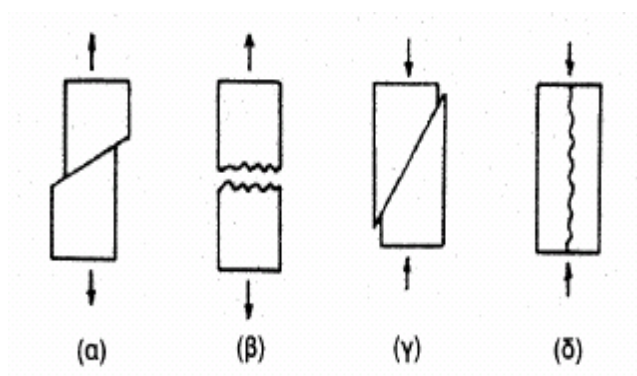
Σχήμα 6.18. Διάγραμμα τάσεως- βραχύνσεως ασβεστόλιθου σε άκαμπτη μηχανή δοκιμών (Τσουτρέλης 1985)

6.9.3. Τύποι θραύσεως βραχέδους υλικού – Κριτήρια θραύσης

Κατά τη θραύση των ψαθυρών πετρωμάτων (αυτά που παρουσιάζουν συνολικές παραμορφώσεις πριν τη θραύση $< 3\%$) παρατηρούνται οι εξής τύποι θραύσης:

α) Η θραύση σε διάτμηση (shear fracture), κατά την οποία συμβαίνει θραύση του δοκιμίου του πετρώματος κατά μήκος ενός επιπέδου κεκλιμένου ως προς τον άξονα της μέγιστης κύριας τάσης, με γωνία μικρότερη των 45° και σχετική μετακίνηση πάνω στο επίπεδο αυτό όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.19 (α,γ). Ο συγκεκριμένος τύπος θραύσης παρατηρείται στην τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού ή θλίψης με μέτρια ή μεγάλη πλευρική πίεση.

β) Θραύση με επέκταση (extension fracture) που χαρακτηρίζεται από αποχώρηση κάθετα προς την επιφάνεια θραύσης, που διευθύνεται παράλληλα προς τη μέγιστη κύρια τάση (Σχήμα 6.19 β,δ). Αυτός ο τύπος θραύσης παρατηρείται στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού ή στην τριαξονική θλίψη, όταν η πλευρική πίεση είναι μεγαλύτερη από την αξονική ή όταν είναι πάρα πολύ μικρή.



Σχήμα 6.19. Κύριοι τύποι θραύσης πετρωμάτων

α) Θραύση με διάτμηση σε δοκιμή εφελκυσμού (ελάχιστη κύρια τάση κατακόρυφη, θλιπτική τάση θετική)

β) Θραύση με επέκταση σε δοκιμή εφελκυσμού

γ) Θραύση με διάτμηση σε δοκιμή θλίψης (μέγιστη κύρια τάση κατακόρυφη)

δ) Θραύση με επέκταση σε δοκιμή θλίψης

Γενικά, υπάρχει ένας κρίσιμος συνδυασμός των κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3) που δρουν στο πέτρωμα ο οποίος μπορεί να προκαλέσει τη θραύση. Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί στην ουσία και το κριτήριο θραύσης. Γενικά κριτήριο θραύσης είναι μια αλγεβρική έκφραση των μηχανικών συνθηκών κάτω από τις οποίες ένα υλικό αστοχεί από θραύση ή παραμορφώνεται μέχρι μερικά σαφώς καθορισμένα όρια.

Το πιο απλό κριτήριο θραύσης είναι των Mohr - Coulomb, η γραφική απεικόνιση του οποίου είναι η ευθεία που εφάπτεται σε όλους τους κύκλους Mohr (περιβάλλουσα). Οι κύκλοι του Mohr αντιπροσωπεύουν κρίσιμους συνδυασμούς των κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3), ενώ η εξίσωση του κριτηρίου θραύσης Mohr - Coulomb είναι:

$$\tau_p = c_i + \sigma_n \epsilon\phi\phi$$

όπου: τ_p : κορυφαία διατμητική αντοχή

c_i : συνοχή του πετρώματος

σ_n : εφαρμοζόμενη ορθή τάση

ϕ : γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος

6.9.4. Περιγραφή δοκιμής

Η δοκιμή αυτή γίνεται με την τοποθέτηση κυλινδρικών δοκιμίων στη μηχανή μονοαξονικής θλίψης και προσδιορίζεται η αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη. Το δοκίμιο τοποθετείται ανάμεσα στις πλάκες της μηχανής φόρτισης και μέσω αυτών φορτίζεται αξονικά.

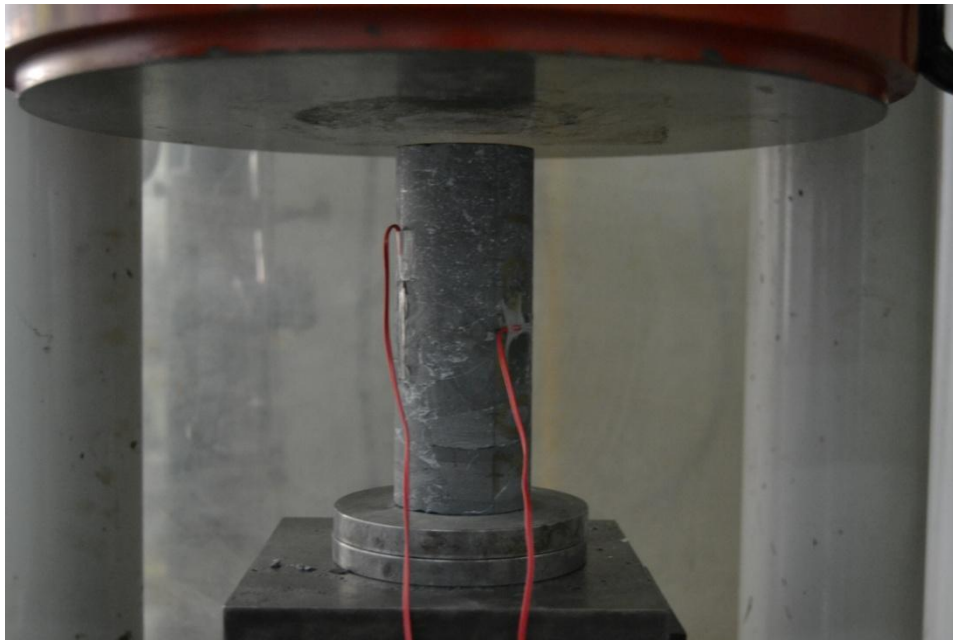
Η αντοχή σε θλίψη ενός κυλινδρικού τεμαχίου βράχου ισούται με το φορτίο που θα πρέπει να εφαρμοσθεί στα οριζόντια επίπεδα προκειμένου αυτό να σπάσει, ενώ συγχρόνως είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί σε όλη την παράπλευρη επιφάνεια.

Συνεπώς η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

όπου P: είναι το φορτίο που ασκείται τη στιγμή της θραύσης και

A: είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία δρα το φορτίο



Φώτο 6.10. Το δοκίμιο Ta_01 τοποθετημένο στη μηχανή μονοαξονικής θλίψης
Διακρίνονται κολλημένα το αξονικό και διαμετρικό strain gages

Η αντοχή στα πετρώματα με κρυσταλλικό ιστό είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των κρυστάλλων. Συγκεκριμένα τα λεπτοκρυσταλλικά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή που οφείλεται στο μεγαλύτερο ανάπτυγμα επιφανειών επαφής μεταξύ των εδρών των κρυστάλλων καθώς και στην ποικιλία προσανατολισμού των εδρών. Επιπλέον σε πετρώματα με την ίδια ορυκτολογική σύσταση η αντοχή σε θλίψη είναι μεγαλύτερη όταν οι κόκκοι ή οι κρύσταλλοι είναι ισομεγέθεις, ενώ μειώνεται όταν το μέγεθος των κόκκων ή κρυστάλλων ποικίλει.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής επηρεάζονται συνήθως από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Το λόγο μήκους προς διάμετρο δοκιμίου (ίσο περίπου με 2)
- Την επιπεδότητα των επιφανειών φόρτισης
- Τον ρυθμό επιβολής του φορτίου
- Την ανισοτροπία του υλικού. Στα στρωσιγενή και στα σχιστώδη πετρώματα ή πολλές φορές και στα άστρωτα, η μέγιστη αντοχή σε θλίψη παρατηρείται σε διεύθυνση κάθετη προς τη στρώση ή τη σχιστότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ή αντοχή σε θλίψη μειώνεται με την παρουσία νερού στους πόρους του πετρώματος. Συγκεκριμένα δείγματα πετρώματος κορεσμένα με νερό παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή μέχρι και 50 % σε σχέση με ένα ξηρό δείγμα και αυτό συμβαίνει γιατί το νερό διευκολύνει την ολίσθηση μεταξύ των κόκκων.

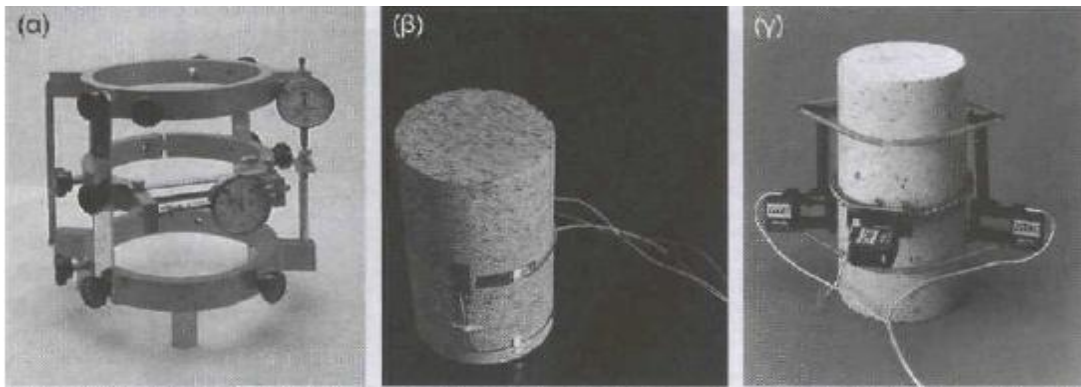
Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής γίνεται επίσης ταυτόχρονη μέτρηση των αξονικών και διαμετρικών (πλευρικών) παραμορφώσεων του δοκιμίου. Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα μέτρησης των παραμορφώσεων του δοκιμίου που συνήθως είναι (Φώτο 6.11):

α) Μηχανικά μηκυσιόμετρα τα οποία προσδένονται κατάλληλα πάνω στο δοκίμιο (με ειδικό δακτύλιο) που έχουν ακρίβεια 0,002 mm.. Η τοποθέτηση τους γίνεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε απόσταση όχι μικρότερη του $D/2$ από τα άκρα του (όπου D η διάμετρος του δοκιμίου).

β) Ηλεκτρικά μηκυσιόμετρα (strain gages) τα οποία επικολλούνται στο δοκίμιο παράλληλα και κάθετα στον άξονα φόρτισης για τη μέτρηση αξονικών και διαμετρικών παραμορφώσεων αντίστοιχα. Η επικόλληση γίνεται με ειδική κόλλα και ακολουθεί επίστρωση με προστατευτικό υλικό (π.χ. σιλικόνη). Το μήκος τους πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 10πλάσιου του μέσου μεγέθους των κόκκων του βράχου και η επικόλληση γίνεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε απόσταση όχι μικρότερη του $D/2$ από τα άκρα του (όπου D η διάμετρος του δοκιμίου).

γ) Ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα προσαρμοσμένα σε κατάλληλο παραμορφωτικό δακτύλιο που "προσδένεται" πάνω στο δοκίμιο. Η τοποθέτηση διάφορων συστημάτων για τη λήψη έμμεσων μετρήσεων εκτός δοκιμίου (π.χ. μέτρηση μετακινήσεων στις πλάκες της πρέσας ή στο έμβολο αυτής) δεν είναι αποδεκτές για την εκτέλεση της δοκιμής.

Στην δοκιμή μας χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα (strain gages).



Φώτο 6.11. Όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων

Οι μετρήσεις λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του δοκιμίου ενώ κάθε μέτρηση αναφέρεται σε συγκεκριμένη τιμή ορθού φορτίου και ο αριθμός τους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Μετριοούνται η αξονική (ϵ_a) και πλευρική ή διαμετρική (ϵ_d) παραμόρφωση (axial and diametric strain).

Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχόμενη με σταθερό ρυθμό έτσι ώστε η θραύση του δοκιμίου να συμβαίνει μέσα σε 5 έως 10 λεπτά. Ο ρυθμός φόρτισης ρυθμίστηκε στα 0,75 kN/sec.

Η αξονική παραμόρφωση σε κάθε συγκεκριμένη τιμή ορθού φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0}$$

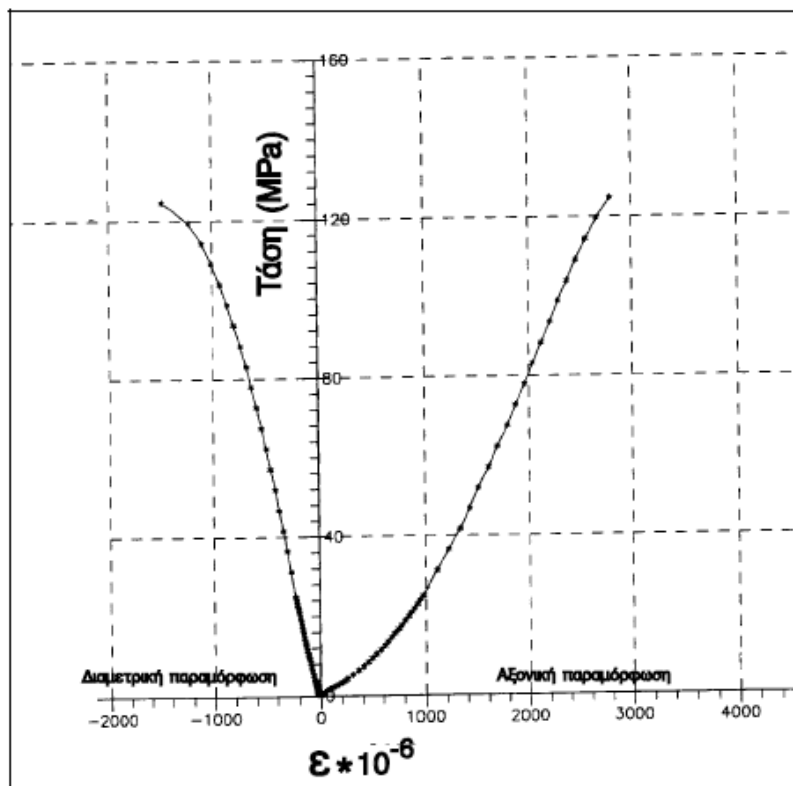
όπου: l_0 το αρχικό μήκος του δοκιμίου και Δl η μεταβολή του μήκους του.

Η διαμετρική παραμόρφωση σε κάθε συγκεκριμένη τιμή ορθού φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}$$

όπου: d_0 η αρχική διάμετρος του δοκιμίου και Δd η μεταβολή της διαμέτρου.

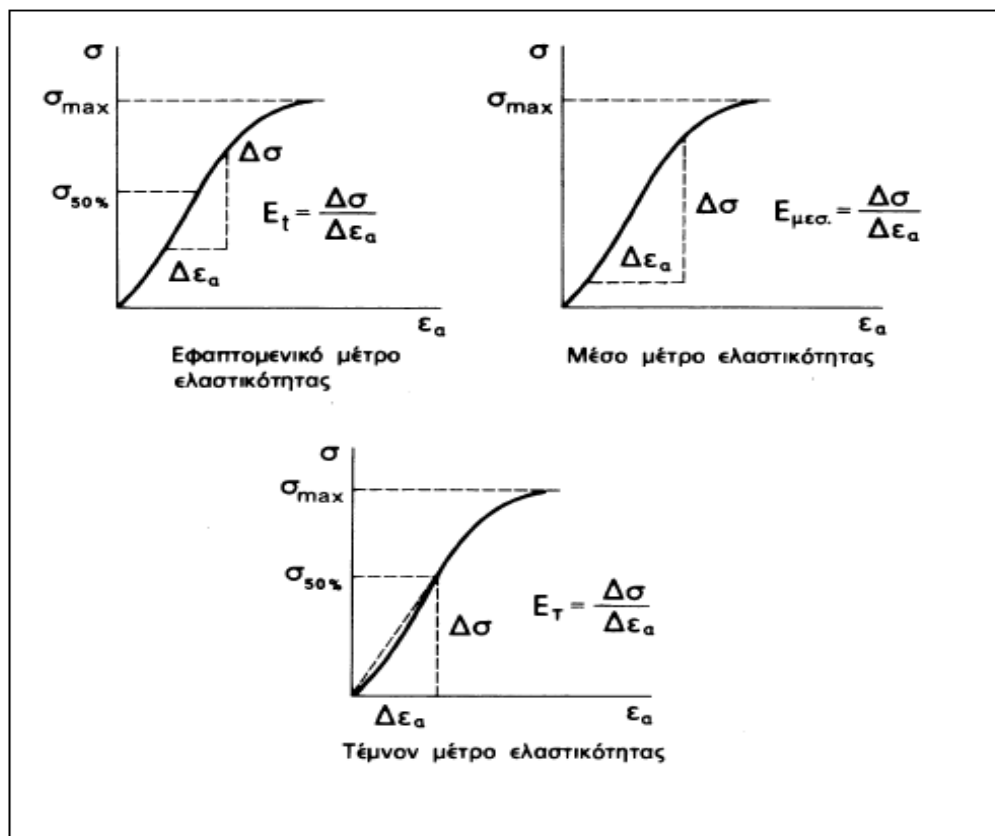
Στη συνέχεια σχεδιάζονται οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων όπως φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσης παραμορφώσεων στο παρακάτω σχήμα. Από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μπορούμε γενικά να χαρακτηρίσουμε ένα πέτρωμα πλαστικό όταν αστοχεί μετά από μόνιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις ή ψαθυρό όταν αστοχεί πριν εμφανιστούν μόνιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις



Σχήμα 6.20. Τυπικό διάγραμμα τάσεως-παραμορφώσεων πετρώματος

Έπειτα υπολογίζονται τα μέτρα ελαστικότητας (E_t εφαπτομενικό, E_μ μέσο και E_T τέμνον) και ο λόγος Poisson (ν).

- Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t): Υπολογίζεται από την καμπύλη τάσεως- αξονικής παραμόρφωσης ως εξής: Σε σημείο που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό της μέγιστης τάσεως (συνήθως το 50%) φέρεται η εφαπτομένη. Η κλίση της ευθείας αυτής είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας. Εκφράζεται σε GPa.
- Μέσο μέτρο ελαστικότητας (E_μ): Υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης. Εκφράζεται σε GPa.
- Τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E_T): Υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσεως μεταξύ 0 και συνήθως 50% της μέγιστης τάσεως. Εκφράζεται σε GPa.



Σχήμα 6.21. Γραφικός προσδιορισμός του μέτρου Ελαστικότητας

Ο λόγος Poisson υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\nu = - \frac{\text{κλίση καμπύλης αξονικής τάσης} - \text{παραμόρφωσης}}{\text{κλίση καμπύλης διαμετρικής τάσης} - \text{παραμόρφωσης}}$$

όπου η κλίση της καμπύλης τάσεως-διαμετρικής παραμόρφωσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε και η κλίση της καμπύλης τάσεως-αξονικής παραμόρφωσης, για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας.

Τέλος, η ογκομετρική παραμόρφωση εν για ένα δεδομένο τασικό πεδίο προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_d$$

6.9.5. Αποτελέσματα - Υπολογισμοί

Δοκίμιο Ta_01		
Χρόνος θραύσης	t	5,57 min
Αξονικό φορτίο θραύσης	F _c	264,3 kN
Αξονική τάση θραύσης	σ _c	115,5 MPa
Αξονικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας για σ _{30%}	E _{t 30%}	85,71 GPa
Εφαπτομενικός λόγος του Poisson για σ _{30%}	ν _{t 30%}	0,429

Δοκίμιο Ta_02		
Χρόνος θραύσης	t	4,59 min
Αξονικό φορτίο θραύσης	F _c	218,4 kN
Αξονική τάση θραύσης	σ _c	96,1 MPa
Αξονικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας για σ _{50%}	E _{t 50%}	50,00 GPa
Εφαπτομενικός λόγος του Poisson για σ _{50%}	ν _{t 50%}	0,499

Η μέση αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη είναι 105,8 MPa, και μπορεί να χαρακτηριστεί από υψηλή έως πολύ υψηλή αντοχή..

Τέλος, υπολογίζουμε το μέσο αξονικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο είναι 67,86 GPa και τη μέση τιμή του λόγου Poisson που είναι 0,46. Στο παράρτημα 4 παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για το δοκίμια καθώς και φωτογραφίες αυτών.

Σημείωση: Στο δοκίμιο Ta_01 δεν ήταν δυνατό να υπολογίσουμε το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας στο 50% της αντοχής καθώς μέχρι εκείνο το σημείο είχαν κοπεί και τα αξονικά και τα διαμετρικά ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα. Πηγαίνοντας στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δοκίμιο αυτό παρατηρούμε ότι η κλίση είναι ομαλή και έτσι κάνουμε μια παραδοχή και παίρνουμε το 30% της αντοχής.

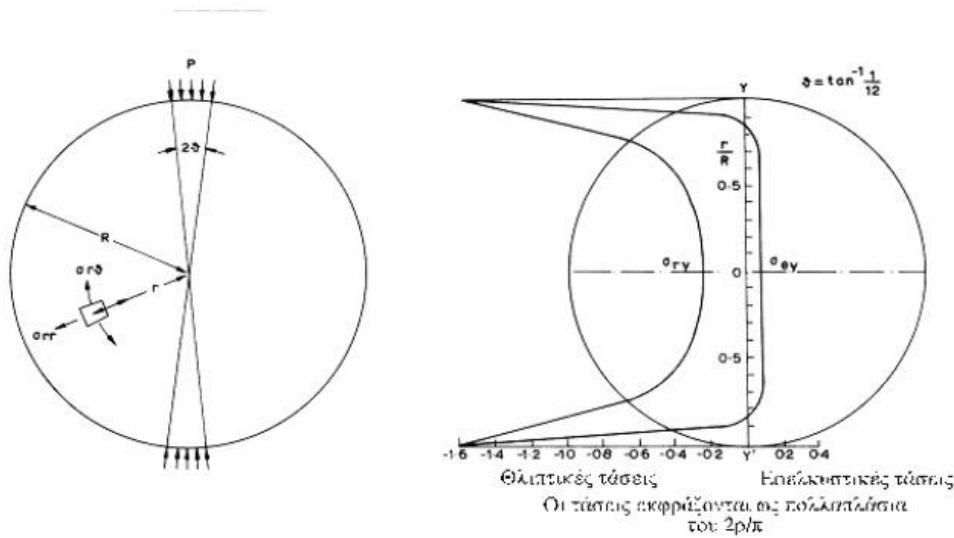
6.10. Έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη (Brazilian Test)

6.10.1. Σκοπός της δοκιμής

Η δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (Brazilian Test) έχει ως σκοπό τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή τα δοκίμια μορφής δίσκου υποβάλλονται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσεως. Υπό τις συνθήκες αυτές φόρτισης τα δοκίμια αστοχούν κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση, που θα προκαλέσει την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικά εντατικά πεδία αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφόσον το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής κύριας τάσης.

6.10.2. Θεωρία της δοκιμής

Στην περίπτωση δοκιμίων πετρώματος μορφής δίσκου από ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό υλικό, το οποίο φορτίζεται ομοιόμορφα αντιδιαμετρικά, είναι δυνατό, με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας, να υπολογισθούν οι τάσεις εφελκυσμού σ_{θ} και θλίψεως σ_r , κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως $Y-Y'$. Η μεταβολή των τάσεων αυτών κατά μήκος της $Y-Y'$ δίνεται στο σχήμα 6.22 για την περίπτωση όπου $\theta = \tan^{-1}(1/12)$ $2\theta=9,5$. Από αυτήν προκύπτει ότι η τάση σ_{θ} , με εξαίρεση τις αντιδιαμετρικές περιοχές φορτίσεως είναι εφελκυστική στο μεγαλύτερο τμήμα της διαμέτρου $Y-Y'$ και ταυτόχρονα σταθερή.



Σχήμα 6.22. Μεταβολή της εφελκυστικής (σ_{θ}) και της θλιπτικής (σ_r) τάσεως κατά μήκος της διαμέτρου $Y-Y'$ για φόρτιση υπό γωνία $2\theta = 9,5$.

Η εφελκυστική αυτή τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{F}{\pi * r_0 * L} * \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right) \quad (1)$$

όπου: F = επιβαλλόμενη δύναμη τη στιγμή της αστοχίας

r_0 = ακτίνα δίσκου δοκιμίου

L = πάχος δίσκου δοκιμίου

2α = τόξο γωνίας στο οποίο δρα ομοιόμορφα η δύναμη F επί του δοκιμίου

Η παραπάνω σχέση, για μικρές γωνίες 2α , δίνεται με ικανοποιητική προσέγγιση από την σχέση:

$$\sigma\theta = -\frac{2F}{\pi * D_0 * L} \quad (2)$$

όπου $D_0 = 2r_0$ = διάμετρος του δοκιμίου

Οι σχέσεις (1) και (2) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος, υπό την προϋπόθεση ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται έναρξη αστοχίας του δοκιμίου κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως.

6.10.3. Επίδραση των παραμέτρων

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής πετρώματος, που υπολογίζεται από τη δοκιμή Brazilian επηρεάζεται από τη γωνία 2α , στο τόξο της οποίας εφαρμόζεται το θλιπτικό φορτίο, το λόγο πάχους προς διάμετρο του δοκιμίου (t/D), το πάχος του δοκιμίου και το ρυθμός φορτίσεως.

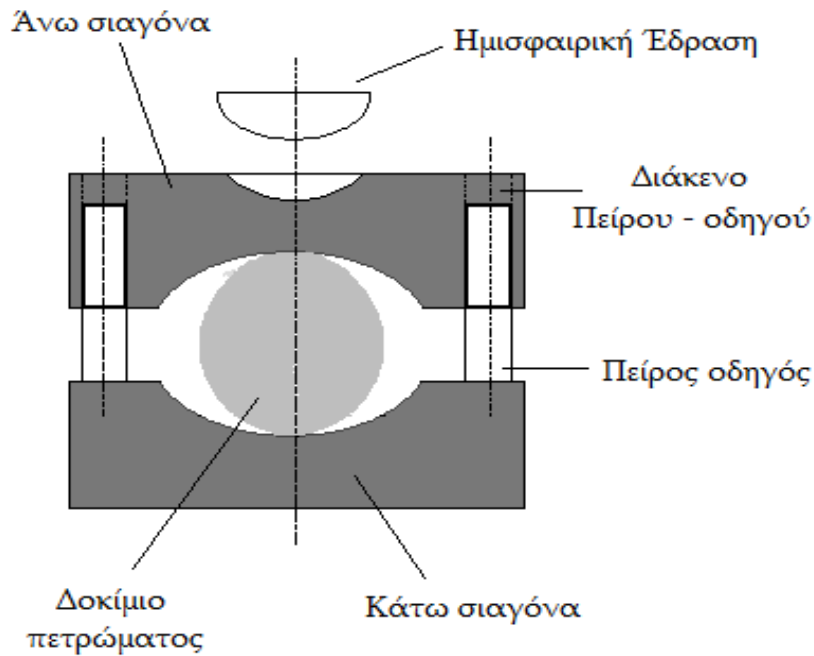
Η γωνία 2α λαμβάνεται μεταξύ $10-14^\circ$, ο λόγος $L/D=0.5$ και $L=25-30$ mm. Αύξηση του λόγου L/D οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό του δοκιμίου, ενώ αύξηση του ρυθμού φορτίσεως δίνει γενικά αύξηση της αντοχής.

6.10.4. Πειραματική συσκευή

Ο εξοπλισμός που θα χρειαστεί για την διεξαγωγή της δοκιμής της αντιδιαμετρικής θλίψης περιγράφεται στην παρακάτω παράγραφο.

Δυο χαλύβδινες σιαγώνες (βλέπε σχήμα 6.23) οι οποίες θα ασκούν τάση, σχεδιασμένες έτσι, ώστε η επαφή με το δείγμα που έχει σχήμα δίσκου να λαμβάνει χώρα σε αντιδιαμετρικές επιφάνειες και σε τόξο επαφής περί τις 10° κατά την αστοχία. Οι κρίσιμες διαστάσεις της συσκευής είναι η ακτίνα καμπυλότητας των σιαγώνων, το διάκενο και το μήκος των πείρων οδηγών που συνδέουν τις καμπύλες σιαγώνες και το πλάτος των σιαγώνων. Η άνω σιαγώνα περιέχει ένα ημισφαιρικό σημείο έδρασης, το οποίο είναι διαμορφωμένο από ένα ημισφαιρικό σύνδεσμο διαμέτρου 25 mm.

Για την διεξαγωγή της δοκιμής θα χρησιμοποιηθεί κατάλληλη συσκευή, η οποία θα ασκεί και θα καταγράφει το θλιπτικό φορτίο του δείγματος. Η συσκευή θα πρέπει να διαθέτει ικανοποιητικό βαθμό ισχύος ούτως ώστε να ασκεί το επιθυμητό φορτίο και δυνατότητα άσκησης δύναμης με σταθερό ρυθμό που προσδιορίζεται από τον χρήστη. Τέλος είναι απαραίτητο η συσκευή της δοκιμής να είναι συνδεδεμένη με ένα καταγραφέα που θα καταγράφει την σχέση ασκούμενου φορτίου – μετατόπισης ώστε να διαμορφωθεί το αντίστοιχο διάγραμμα.



Σχήμα 6.23. Οι σιαγόνες τοποθέτησης του δοκιμίου για την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

6.10.5. Περιγραφή δοκιμής

Τα δοκίμια θα πρέπει να έχουν κοπεί και προετοιμαστεί χωρίς κατεργασία με χημικά αλλά μόνο με καθαρό νερό. Οι κυλινδρικές επιφάνειες δεν θα πρέπει να παρουσιάζουν προφανή σημάδια από τα εργαλεία της κατεργασίας και τυχόν ανωμαλίες στην επιφάνεια δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τα 0,0025 mm. Οι έδρες στις άκρες των δοκιμίων θα πρέπει να είναι επίπεδες με ανωμαλίες μικρότερες από 0,25 mm και κάθετες στον άξονα του κυλίνδρου και παράλληλες μεταξύ τους ώστε να μην αποκλίνουν από την κάθετο προς τον άξονα του δοκιμίου περισσότερο από 0.001 rad.

Τα δοκίμια είναι σχήματος δίσκου των οποίων το ύψος (L) είναι περίπου ίσο με το μισό της διαμέτρου (D/2). Οποσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου θα πρέπει να είναι το 10πλάσιο του μεγέθους του μεγαλύτερου κόκκου των ορυκτών που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος.

Αφού προετοιμαστούν τα δοκίμια και απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία, τοποθετούνται στις σιαγόνες και έπειτα στη μηχανή φόρτισης (πρέσα). Το δοκίμιο

και οι σιαγώνες πρέπει να είναι κεντρωμένες σε σχέση με τον άξονα φόρτισης. Η φόρτιση εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό φόρτισης 75 N/sec (load rate) και η καταγραφή ξεκινάει όταν ασκηθούν στο δοκίμιο 30 N (pre load). Όταν επέλθει αστοχία στο δοκίμιο σημειώνεται με ακρίβεια το φορτίο θραύσης, η μετατόπιση καθώς και η διάρκεια της δοκιμής. Μια δοκιμή θεωρείται αποδεκτή όταν υπάρξει αστοχία μεταξύ 3 – 5 λεπτών και όταν το δοκίμιο έχει αστοχήσει κατά μήκος της διαμέτρου φορτίσεως.



Φώτο 6.12. Το δοκίμιο Tb_03 bts_02 τοποθετημένο στη μηχανή αντιδιαμετρικής θλίψης

6.10.6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων - Υπολογισμοί

Η αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (σ_t) του δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D L} = \frac{0,636 P}{D L} \text{ (MPa)}$$

όπου P: φορτίο σε N

D: διάμετρος σε mm

L: ύψος σε mm

Οι μετρήσεις των διαμέτρων που λήφθηκαν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Οι διάμετροι 1 και 2 αντιστοιχούν στο ένα άκρο και οι διάμετροι 3 και 4 στο άλλο.

Υπολογίζεται έτσι η μέση διάμετρος κάθε δοκιμίου.

Δοκίμιο	Διάμετρος 1 (mm)	Διάμετρος 2 (mm)	Διάμετρος 3 (mm)	Διάμετρος 4 (mm)	Μέση διάμετρος (mm)
Tb_01 bts_01	54,10	54,05	54,06	54,03	54,06
Tb_02 bts_01	53,99	54,02	53,90	54,04	53,99
Tb_02 bts_02	54,04	54,00	54,15	54,02	54,05
Tb_03 bts_01	54,02	54,05	54,03	53,96	54,02
Tb_03 bts_02	53,93	54,01	54,00	54,04	54,00

Η μέση τιμή του μήκους του κάθε δοκιμίου είναι:

Δοκίμιο	Μήκος 1 (mm)	Μήκος 2 (mm)	Μέση τιμή μήκους (mm)
Tb_01 bts_01	28,50	28,71	28,61
Tb_02 bts_01	27,65	27,87	27,76
Tb_02 bts_02	28,99	28,93	28,96
Tb_03 bts_01	27,14	27,59	27,37
Tb_03 bts_02	28,65	28,76	28,71

Τα αποτελέσματα της δοκιμής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και από το φορτίο αστοχίας υπολογίζεται η αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη στ.

Δοκίμιο	Φορτίο αστοχίας (N)	Μετατόπιση (mm)	Διάρκεια (min:sec)	Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη στ (MPa)
Tb_01 bts_01	22704	2,000	5:08	9,35
Tb_02 bts_01	12144	2,122	2:43	5,16
Tb_02 bts_02	21993	2,094	4:58	8,95
Tb_03 bts_01	11200	1,938	2:41	4,83
Tb_03 bts_02				Μη αποδεκτή

Η μέση αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη είναι 7,07 MPa.

Η τελευταία δοκιμή είναι μη αποδεκτή καθώς το δοκίμιο δεν αστόχησε. Τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης παρατίθενται στο παράρτημα 4 καθώς και οι φωτογραφίες των δοκιμών.

Από την μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και από την μέση αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη μπορούμε να βρούμε το “δείκτη ψαθυρότητας Z” ενός πετρώματος βάσει της σχέσης που ακολουθεί και να χαρακτηρίσουμε το πέτρωμα βάσει του πίνακα 6.8 :

$$Z = \frac{UCS}{BTS}$$

Όπου: Z: δείκτης ψαθυρότητας

UCS: μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)

BTS: μέση αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (MPa)

$$Z = \frac{UCS}{BTS} = \frac{105,8 (MPa)}{7,1 (MPa)} = 14,9$$

Πίνακας 6.8. Χαρακτηρισμός ψαθυρότητας-πλαστικότητας πετρώματος κατά Thuro

(Αναγνώστου 2006)

Δείκτης ψαθυρότητας Z	Χαρακτηρισμός πετρώματος
>20	Πολύ ψαθυρό
20-10	Ψαθυρό
10-5	Πλαστικό
<5	Πολύ πλαστικό

Το πέτρωμα μας σύμφωνα με τον πίνακα 6.8 μπορεί να χαρακτηριστεί ως ψαθυρό.

7. ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

7.1. Γενικά

Η ενέργεια που παρέχεται στη μονάδα συμπαγούς όγκου πετρώματος προκειμένου να επιτευχθεί η θραύση του ονομάζεται ειδική ενέργεια θραύσεως. Συνήθως αναφέρεται στη θραύση πετρώματος κατά τις δοκιμές αντοχής του ή για τη θραύση του με εκρηκτικές ύλες.

Ειδικά για τις μεθόδους εξόρυξης με μηχανικά μέσα, η ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος αναφέρεται ως ειδική ενέργεια εκσκαφής (S.E. specific energy). Στο σύστημα SI οι μονάδες είναι J/m^3 .

Από τον ορισμό γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική ενέργεια εκσκαφής ενός πετρώματος τόσο περισσότερη ενέργεια πρέπει να καταναλώσουμε για την όρυξη μονάδας όγκου του και συνεπώς δυσκολότερη και πιο δαπανηρή είναι η όρυξη του.

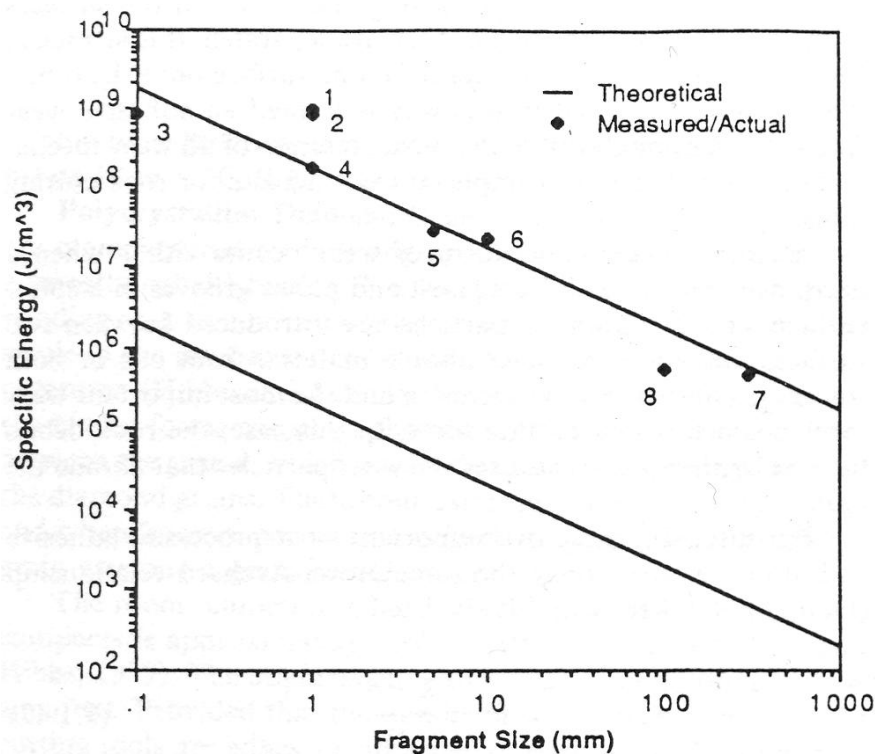
Είναι αξιωματικό ότι, προκειμένου να εκσκαφθεί ένας δεδομένος όγκος πετρώματος, χρειάζεται μια θεωρητικά εφικτή, ελάχιστη ποσότητα ενέργειας. Η ποσότητα αυτής της ενέργειας εξαρτάται αποκλειστικά από τη φύση του πετρώματος. Η καθαυτή μηχανική διεργασία ενδέχεται να πλησιάζει, ή όχι αυτό το ελάχιστο ποσό ενέργειας που θεωρητικά απαιτείται. Η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των θεωρητικών απαιτήσεων σε ενέργεια μπορεί να είναι ένας δείκτης του έργου που καταναλώνεται σε "παράπλευρες" διαδικασίες όπως η θραύση του πετρώματος σε τεμάχια μικρότερα απ' ό,τι απαιτούνται, σε τριβή μεταξύ του κοπτικού άκρου και του πετρώματος ή σε μηχανικές απώλειες εκτός συστήματος πετρώματος – κοπτικού.

Η κατάτμηση των θραυσμάτων του πετρώματος σε κομμάτια μικρότερα απ' ότι χρειάζεται, ενδέχεται να έχει δυσανάλογο αντίκτυπο στην ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή δεδομένου όγκου πετρώματος. Δεν είναι μόνο ότι περισσότερα κομμάτια θραύονται χωρίς λόγο, αλλά και η ειδική ενέργεια αυξάνει αξιοσημείωτα με τη μείωση του μεγέθους των εν λόγω τεμαχιδίων.

7.2. Περιορισμοί στη χρήση μηχανικών κοπτικών άκρων σε σχέση με την ειδική ενέργεια εκσκαφής

Η ειδική ενέργεια εκσκαφής εξαρτάται τόσο από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη θραύση του πετρώματος όσο και από τον τύπο του πετρώματος (Hood & Roxbough, 1992). Η παράμετρος αυτή λοιπόν είναι το πιο χρήσιμο μέτρο που διαθέτουμε για να προβλέψουμε την απαίτηση σε ισχύ ενός συγκεκριμένου μηχανήματος, το οποίο θα εκσκάπτει δεδομένο τύπο πετρώματος με δεδομένο ρυθμό προχώρησης, ή εναλλακτικά τον ρυθμό προχώρησης που ένα μηχάνημα δεδομένης ισχύος θα είχε εκσκάπτοντας ένα δεδομένο τύπο πετρώματος. Το διάγραμμα του σχήματος 7.1 απεικονίζει γραφικά τις μετρηθείσες τιμές ειδικής ενέργειας για κάποιες μεθόδους εκσκαφής σε ένα συγκεκριμένο πέτρωμα, ένα σκληρό χαλαζίτη. Από αυτό το διάγραμμα προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία:

1. Τα σημεία που βρίσκονται πάνω από την ευθεία, τα σημεία 1 και 2 αντιπροσωπεύουν μεθόδους για τις οποίες η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία νέας ελεύθερης επιφάνειας υπερβαίνει τον μέσο όρο. Αντίστοιχα, τα σημεία που βρίσκονται κάτω από την ευθεία, σημεία 3 και 8 αντιπροσωπεύουν μεθόδους για τις οποίες η ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία νέας ελεύθερης επιφάνειας είναι κάτω από τον μέσο όρο.



Σχήμα 7.1. Διάγραμμα Hood & Roxbrough (Αναγνώστου 2006)

Θεωρητική και πραγματική ειδική ενέργεια θραύσεως χαλαζίτη συναρτήσει του μεγέθους των παραθέντων κατά την εκσκαφή τεμαχιδίων για διαφορετικές μεθόδους όρυξης: (1) κοπή με Flame jet (2) κοπή με εκτόξευση νερού υψηλής πίεσης (3) κοπή και διάτρηση με αδαμαντοκορώνα, (4) κρουστική διάτρηση (5) κοπτικά συρόμενου τύπου (6) κοπτικά τύπου δίσκου, (7) κοπή με κρουστική σφήνα (8) κοπή με εκρηκτικές ύλες.

2. Η μέση τιμή της ενέργειας που έχει υπολογισθεί ότι απαιτείται για τη δημιουργία νέας ελεύθερης επιφάνειας (167 kJ/m²) είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που θα είχε μετρηθεί σε εργαστηριακή πειραματική διάταξη. Αυτό συμβαίνει διότι σε μια εργαστηριακή δοκιμή, για να μετρηθεί η ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας, μια εφελκυστική ρωγμή οδηγείται αργά κατά μήκος ενός δείγματος πετρώματος. Στη διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τις συγκεκριμένες μετρήσεις ασκήθηκαν διεσδυτικά φορτία και χάθηκε ενέργεια λόγω τριβής με το θραυσμένο υλικό που δημιουργήθηκε. Περισσότερη ενέργεια χάθηκε υπό μορφή κινητικής ενέργειας των θραυσμάτων που δημιουργήθηκαν. Επιπλέον, οι τιμές του διαγράμματος αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που το

μηχάνημα χρησιμοποίησε για να επιβάλλει τάση στο πέτρωμα. Επομένως η μηχανική ανεπάρκεια των διατρητικών ή των κοπτικών μηχανημάτων συνεισφέρουν στο να αιτιολογηθεί αυτή η αναντιστοιχία μεταξύ εργαστηριακών μετρήσεων και μετρήσεων στο πεδίο.

3. Οι πιο αποδοτικές μέθοδοι (αυτές που παρουσιάζουν μικρότερη τιμή ειδικής ενέργειας) είναι αυτές που χρησιμοποιούν κρουστική σφήνα και εκρηκτικές ύλες (σημεία 7 και 8). Και οι δυο αυτές μέθοδοι θραύουν το πέτρωμα ασκώντας εφελκυστικές τάσεις. Οι επόμενες πιο αποδοτικές μέθοδοι (κρουστική διάτρηση, κοπτικά συρόμενου τύπου και κοπτικά τύπου δίσκου) (σημεία 4,5 και 6) θραύουν το πέτρωμα μέσω διείσδυσης του κοπτικού άκρου σε αυτό. Οι λιγότερο αποδοτικές μέθοδοι (κοπή με Flame jet και κοπή με εκτόξευση νερού υψηλής πίεσης) (σημεία 1 και 2) περιλαμβάνουν θραύση του πετρώματος μέσω θερμικής καταπόνησης και διάβρωσης αντίστοιχα.

Η ειδική ενέργεια (MJ/m^2) συνδέεται με το ρυθμό της εκσκαφής του πετρώματος R (m^3/sec) και την ισχύ που εφαρμόζεται στο μέτωπο P (MW) με την παρακάτω σχέση:

$$Es = \frac{P}{R}$$

Αν και η ποσότητα ενέργειας που δαπανάται για την θραύση του πετρώματος είναι σημαντική, το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας δαπανάται σε δευτερεύουσες διεργασίες θραύσης. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι ενώ το κόστος της ενέργειας συχνά δεν είναι περιοριστικός παράγοντας, υπάρχουν δυο βασικοί περιοριστικοί παράγοντες που σχετίζονται με την ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή του πετρώματος και είναι:

- Η ποσότητα της ενέργειας που πραγματικά μεταφέρεται στο μέτωπο
- Η ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται σε αυτό καθαυτό το πέτρωμα

Οι περισσότερες πρωτογενείς διεργασίες θραύσης πετρώματος συμπεριλαμβάνουν τη χρήση είτε μηχανικών κοπτικών άκρων είτε εκρηκτικών υλών. Ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται εκρηκτικές ύλες, μηχανικά κοπτικά άκρα

χρησιμοποιούνται πρώτα για να ορύξουν τα διατρήματα στα οποία θα τοποθετηθούν οι εκρηκτικές ύλες. Η ευρύτητα της χρήσης των μηχανικών κοπτικών άκρων σε σχέση με τις άλλες μεθόδους εκσκαφής έγκειται στο ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση του πετρώματος με τα συγκεκριμένα μέσα είναι χαμηλότερη. Συνεπώς, για ένα δεδομένο ρυθμό προχώρησης, η ισχύς που απαιτείται στο μέτωπο εργασίας είναι επίσης σχετικά μικρή. Το βασικό μειονέκτημα της χρήσης μηχανικών κοπτικών άκρων είναι ότι σε αρκετούς τύπους πετρώματος περιορίζουν το ρυθμό μεταφοράς ενέργειας στο πέτρωμα γεγονός το οποίο με τη σειρά του περιορίζει το ρυθμό εκσκαφής του πετρώματος. Αυτός ο περιορισμός στο ρυθμό μεταφοράς ενέργειας, προκύπτει λόγω του ότι ο ρυθμός φθοράς ή και αστοχίας των υλικών των κοπτικών άκρων αυξάνει όσο αυξάνει και η μεταφερόμενη μέσω αυτών ενέργεια στο πέτρωμα. Σε χαμηλής αντοχής πετρώματα όπου οι απαιτήσεις σε ειδική ενέργεια δεν είναι υψηλές αυτό δεν αποτελεί περιορισμό όσον αφορά το ρυθμό εκσκαφής του πετρώματος. Αντιθέτως σε μέτριας και υψηλής αντοχής πετρώματα το να αυξηθεί η παρεχόμενη ισχύς προκειμένου να αυξηθεί και ο ρυθμός εκσκαφής του πετρώματος δεν αποτελεί λύση διότι η αυξανόμενη ενέργεια έχει ως συνέπεια απaráδεκτα μικρή διάρκεια ζωής των κοπτικών άκρων.

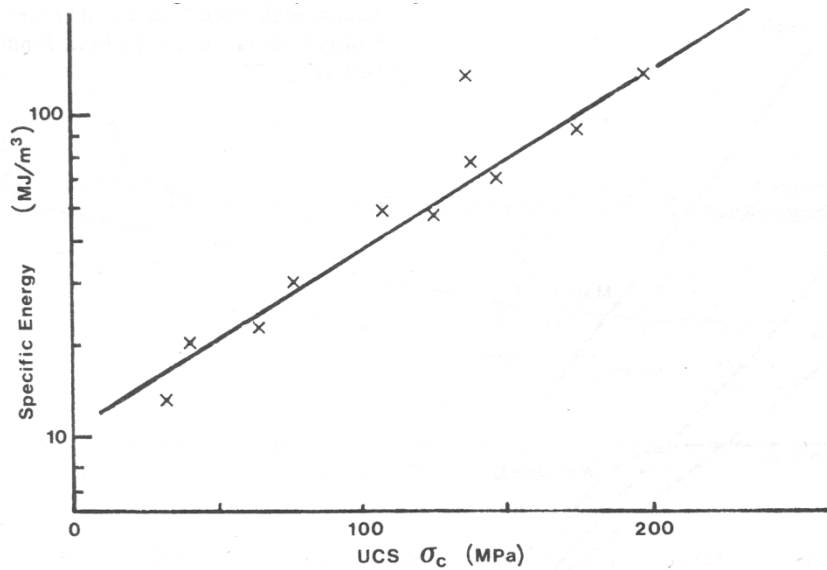
7.3. Παράμετροι που επηρεάζουν την ειδική ενέργεια εκσκαφής

7.3.1. Ιδιότητες του πετρώματος

A) Αντοχή σε φόρτιση (θλίψη-εφελκυσμός)

Όσο αυξάνεται η αντοχή του πετρώματος σε φόρτιση (είτε εφελκυστική είτε θλιπτική) παρατηρείται και αύξηση της ειδικής ενέργειας. Όπως προκύπτει από τις θεωρίες κοπής, η δύναμη κοπής είναι ευθέως ανάλογη της αντοχής του πετρώματος σε φόρτιση. Επομένως υψηλή αντοχή του πετρώματος συνεπάγεται υψηλή τιμή της δύναμης κοπής η οποία με τη σειρά της, δεδομένης της απόστασης κοπής,

συνεπάγεται υψηλή τιμή έργου δηλαδή υψηλή τιμή ενέργειας για την εξόρυξη δεδομένου όγκου πετρώματος.

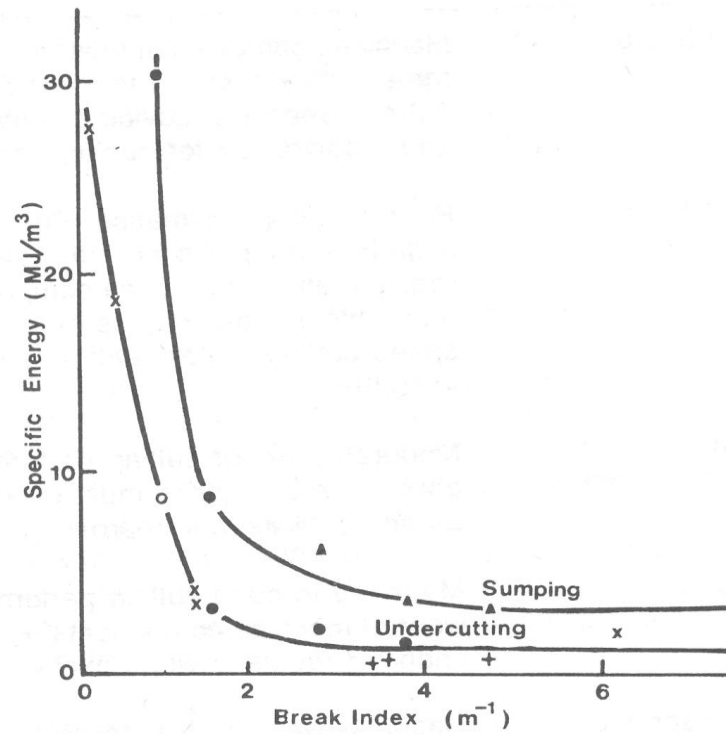


Σχήμα 7.2. Επίδραση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Barendsen (Αναγνώστου 2006)

B) Ασυνέχειες πετρώματος

I) Απόσταση ασυνεχειών

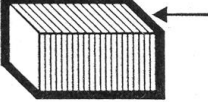
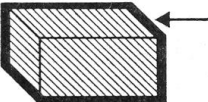
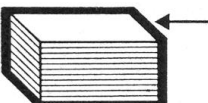
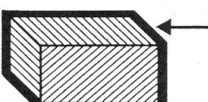
Κατά την όρυξη πετρώματος που διατέμνεται από συστήματα ασυνεχειών η μέση δύναμη κοπής μειώνεται εκθετικά με την μείωση της απόστασης των ασυνεχειών (Braybrooke, 1988). Επίσης κατά τους Fowell & Johnson (1991) η ύπαρξη ασυνεχειών απόστασης μικρότερης των 300 mm καθιστά τις δυνάμεις κοπής ανεξάρτητες των ιδιοτήτων του συμπαγούς πετρώματος. Από τις παραπάνω διαπιστώσεις είναι φανερό πως η ύπαρξη ασυνεχειών μειώνει τις τιμές της ειδικής ενέργειας εκσκαφής όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3. Επίδραση της απόστασης των ασυνεχειών στην ειδική ενέργεια εκσκαφής ιλυολιθικών πετρωμάτων κατά McFeat-Smith (Αναγνώστου 2006)

II) Διεύθυνση ασυνεχειών

Η διεύθυνση των ασυνεχειών του πετρώματος ως προς την διεύθυνση της κοπής παίζει καθοριστικό ρόλο στην τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής. Όσο πιο ευνοϊκά είναι προσανατολισμένες οι ασυνέχειες τόσο πιο χαμηλά είναι η τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.4.

Cut number		Specific energy MJ/m ³	Mean cutting force kN	Yield kg/m
1.		10.73	1.04	0.26
2.		10.15	1.02	0.27
3.		5.70	0.89	0.43
4.		4.64	0.73	0.43

Σχήμα 7.4. Επίδραση της διεύθυνσης των ασυνεχειών ιλυολιθικών πετρωμάτων στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά McFeat-Smith (Αναγνώστου 2006)

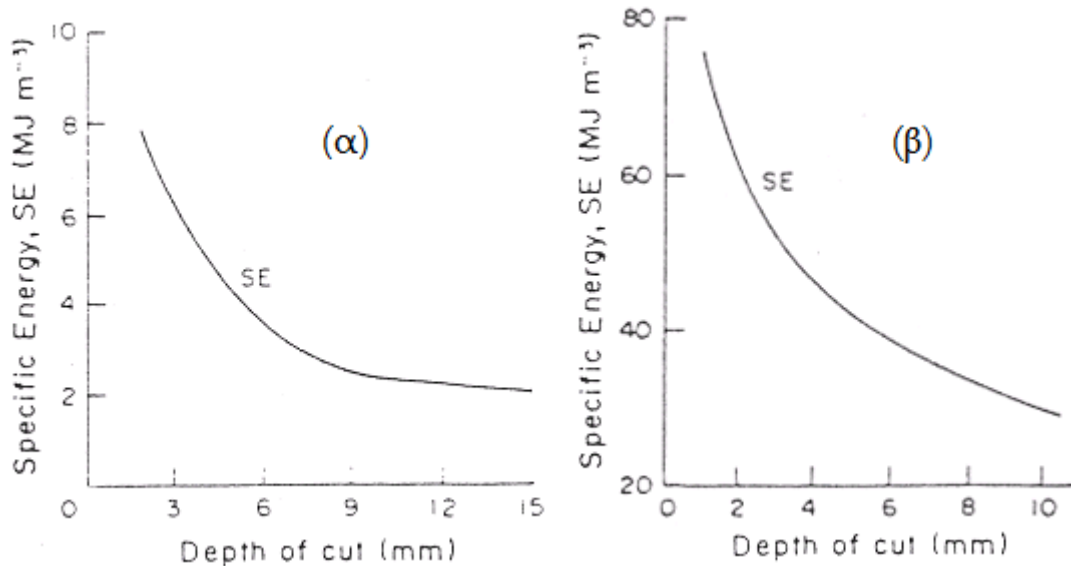
7.3.2. Παράμετροι που σχετίζονται με τα κοπτικά άκρα

A) Τύπος κοπτικού εργαλείου

Ο κάθε τύπος κοπτικού άκρου, θραύει το πέτρωμα με διαφορετικό τρόπο διότι δρα σύμφωνα με διαφορετικό μηχανισμό κοπής. Έτσι για διαφορετικά κοπτικά εργαλεία για το ίδιο βάθος κοπής αναπτύσσονται διαφορετικές δυνάμεις κοπής και εξορύσσεται διαφορετική ποσότητα πετρώματος, γεγονός που συνεπάγεται και διαφοροποίηση στην ειδική ενέργεια εκσκαφής.

B) Βάθος κοπής

Με την αύξηση του βάθους κοπής, παρατηρείται μια πτώση στην ειδική ενέργεια εκσκαφής όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που παρατίθενται. Άξιο αναφοράς, πέρα από τη ραγδαία πτώση του δείκτη ειδικής ενέργειας με αύξηση του βάθους κοπής, είναι ότι για τα κοπτικά τύπου δίσκου παρατηρείται σαφώς μεγαλύτερος ρυθμός πτώσης σε σχέση με τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.

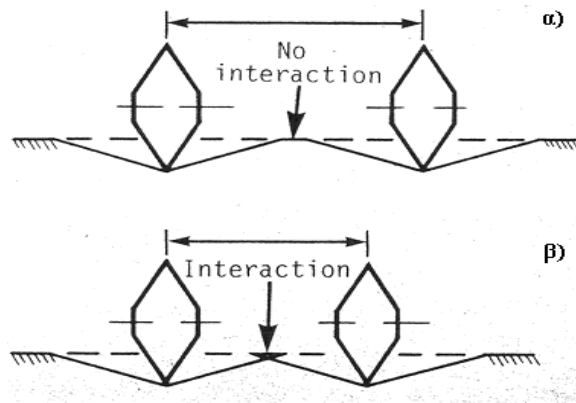


Σχήμα 7.5. Ειδική ενέργεια εκσκαφής συναρτήσει του βάθους κοπής κατά Fowell για α) κοπτικό συρόμενου τύπου, β) κοπτικό τύπου δίσκου (Αναγνώστου 2006)

Γ) Απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών άκρων

Η διάταξη των κοπτικών εργαλείων, δηλαδή η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών εργαλείων επιδρά καθοριστικά στην τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής. Μάλιστα η ελαχιστοποίηση της τιμής της αποτελεί το βασικότερο κριτήριο για την επιλογή της διάταξης των κοπτικών εργαλείων.

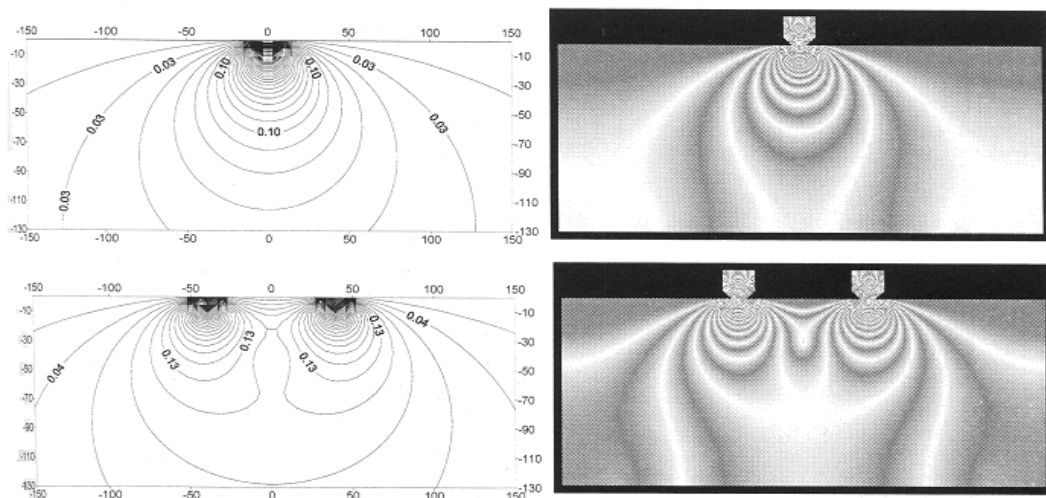
Για δεδομένο κοπτικό εργαλείο και βάθος κοπής αναλόγως του βαθμού αλληλεπίδρασης των κοπτικών εργαλείων υπάρχουν δύο ενδεχόμενα που δύνανται να προκύψουν λόγω της απόστασης διαδοχικών κοπτικών: α) μη αλληλεπίδραση, β) αλληλεπίδραση και παρουσιάζονται στο σχήμα 7.6.



Σχήμα 7.6. Αλληλεπίδραση διαδοχικών κοπτικών κατά Poole (Αναγνώστου 2006)

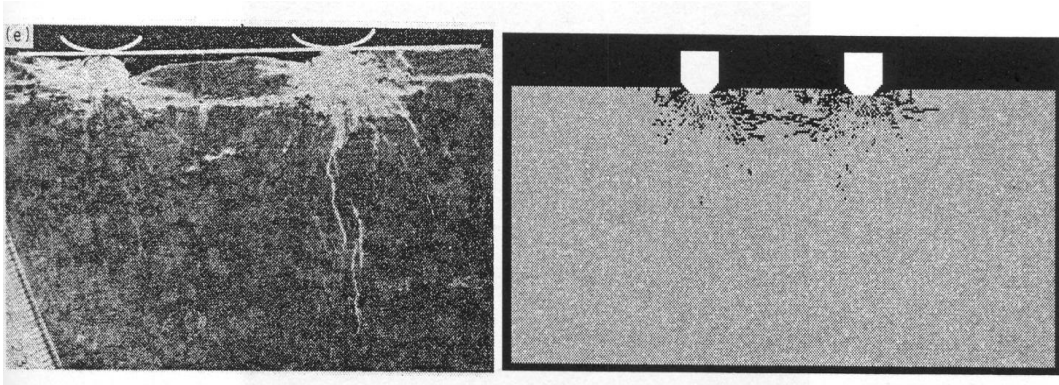
Η κατάσταση αλληλεπίδρασης νοείται όταν αλληλοτέμνονται οι αύλακες που δημιουργούνται από τα κοπτικά εργαλεία όπως είναι εμφανές στο σχήμα 7.6 (β). Προσεγγιστικά η απόσταση έναρξης της αλληλεπίδρασης μπορεί να βρεθεί γεωμετρικά γνωρίζοντας την γωνία υπερεκσκαφής κοπής υπό τη δράση ενός μόνο κοπτικού.

Στην πραγματικότητα αλληλεπίδραση εμφανίζεται και σε μεγαλύτερες από αυτήν την απόσταση με τη δημιουργία θραύσματος μεταξύ των κοπτικών, είτε λόγω της σύνθεσης των εντατικών πεδίων που δημιουργούν διαδοχικά κοπτικά (σχήμα 7.7), είτε λόγω της ελεύθερης επιφάνειας (αύλακα) και εφελκυστικών ρωγμών που δημιουργεί το διαδοχικό κοπτικό σε περίπτωση που προπορεύεται.



Σχήμα 7.7. Εντατικό πεδίο (κύρια τάση) υπό τη δράση ενός και δύο κομβίων κατά Liu (Αναγνώστου 2006)

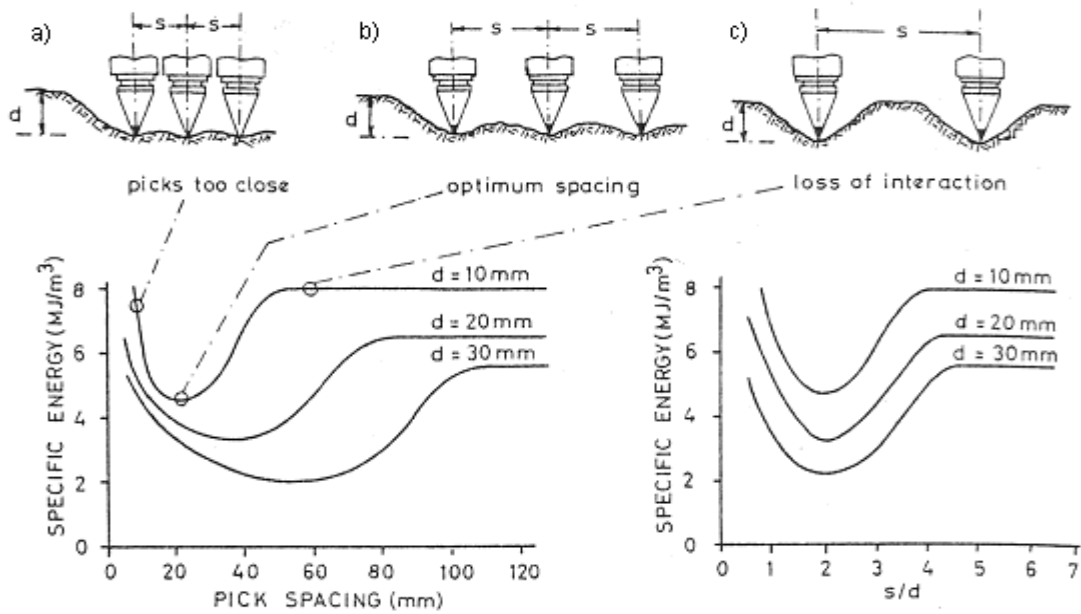
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.8 η δράση δύο διαδοχικών κοπτικών είναι δυνατόν πέραν της δημιουργίας ζώνης θραύσεως σχήματος κρατήρα (cone crack) στο καθένα κοπτικό να προκαλέσει το σχηματισμό μεταξύ αυτών ρωγμής παράλληλης προς την ελεύθερη επιφάνεια (side crack).



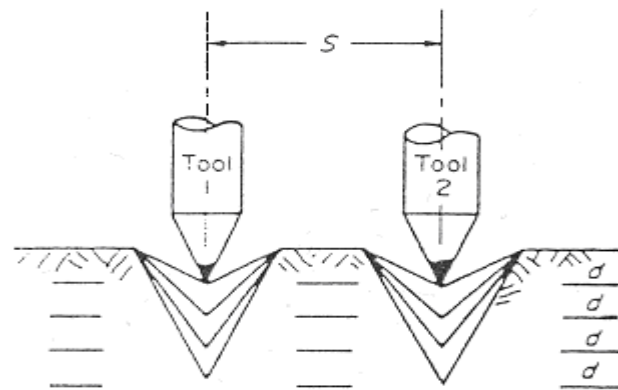
Σχήμα 7.8. Ανάπτυξη ρωγμής μεταξύ διαδοχικών κοπτικών κατά Liu (Αναγνώστου 2006)

I) Μη αλληλεπίδραση

Διαδοχικά κοπτικά εργαλεία βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από την απόσταση έναρξης της αλληλεπίδρασης σχήμα 7.9 (c). Στην περίπτωση αυτή παρατηρούνται υψηλές τιμές δυνάμεων και επομένως υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας εκσκαφής. Ακόμα περισσότερο αυξάνεται η ειδική ενέργεια εκσκαφής σε βάθη μετά την πρώτη κοπή λόγω μείωσης της γωνίας υπερεκσκαφής και επιπλέον αφήνοντας άρρηκτο τμήμαχος πετρώματος μεταξύ των κοπτικών όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.9. Επίδραση της απόστασης διαδοχικών κοπτικών εργαλείων στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Roxborough (Αναγνώστου 2006)



Σχήμα 7.10. Αύξηση της ειδικής ενέργειας εκσκαφής μετά την πρώτη κοπή λόγω μη αλληλεπίδρασης διαδοχικών κοπτικών κατά Fowell (Αναγνώστου 2006)

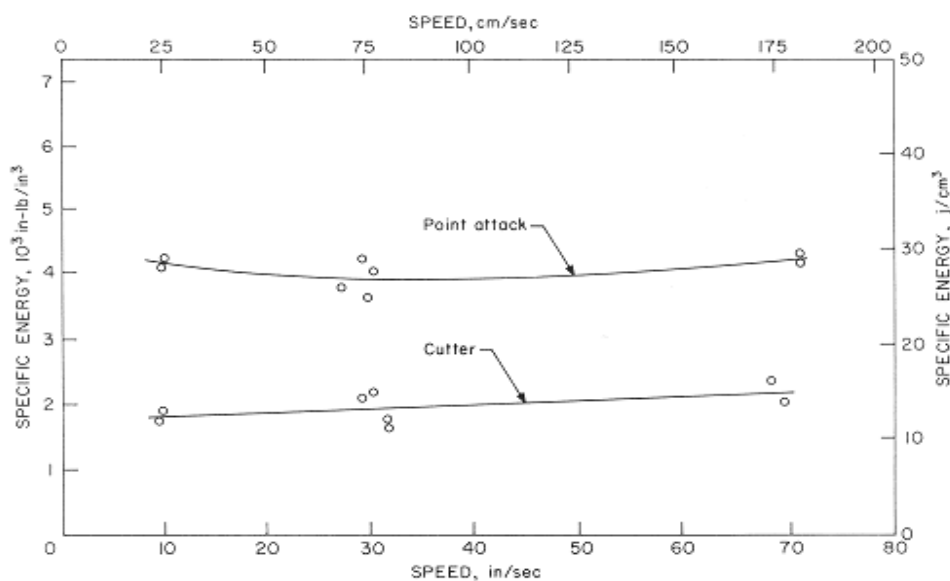
II) Αλληλεπίδραση

Διαδοχικά κοπτικά εργαλεία βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από την απόσταση έναρξης της αλληλεπίδρασης. Οι τιμές της ειδικής ενέργειας εκσκαφής είναι γενικά μικρότερες από αυτές της κατάστασης μη αλληλεπίδρασης όπως είναι εμφανές στο σχήμα 7.9 (a,b,c). Στην κατάσταση αλληλεπίδρασης επίσης βρίσκεται και

η βέλτιστη απόσταση των κοπτικών η οποία δίνει την ελάχιστη ενέργεια εκσκαφής και παρουσιάζεται στο σχήμα 7.9 (b).

Δ) Ταχύτητα κοπής

Η ταχύτητα κοπής έχει βρεθεί πειραματικά ότι δεν έχει επίδραση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή όπως δείχνεται στο σχήμα 7.11. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ταχύτητες θραύσεως των πετρωμάτων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις συνήθεις ταχύτητες κοπής (π.χ. γρανίτης 1875 m/sec). Βέβαια οι υψηλές ταχύτητες κοπής, έχουν ως αποτέλεσμα τη σχετικά γρήγορη φθορά των κοπτικών άκρων λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται από τις δυνάμεις τριβής.



Σχήμα 7.11. Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Demou

Ε) Απομάκρυνση θραυσμάτων

Αναλόγως του συστήματος όρυξης που εφαρμόζεται είναι δυνατόν στη διεπιφάνεια κοπτικού-πετρώματος να εισέρχονται θραύσματα από κοπή του ίδιου ή άλλου κοπτικού με αποτέλεσμα να υποβάλλονται σε περαιτέρω θραύση (δευτερογενής θραύση). Η ατελής απομάκρυνση των θραυσμάτων από την κεφαλή και η συνεχής ανακύκλωση αυτών με κατανάλωση ενέργειας προς μείωση του μεγέθους τους επιφέρει αύξηση στην τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής.

7.4. Υπολογισμός ειδικής ενέργειας εκσκαφής

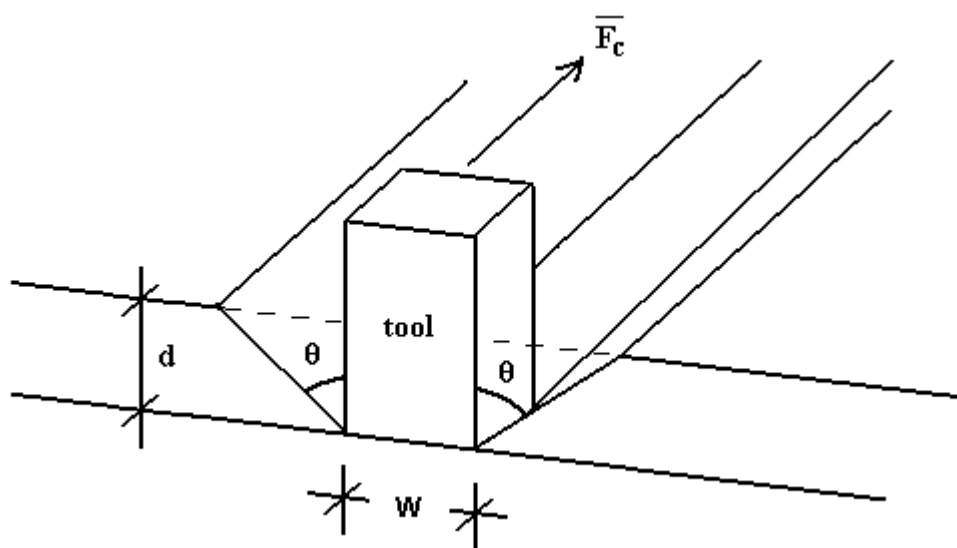
7.4.1. Από τις θεωρίες κοπής

Μέσω των θεωριών κοπής μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε τις δυνάμεις κοπής συναρτήσει του μήκους κοπής. Δεδομένου ότι η γωνία υπερεκσκαφής είναι σχεδόν σταθερή για δεδομένο κοπτικό άκρο που κόβει το πέτρωμα με δεδομένο βάθος κοπής, μπορεί να υπολογιστεί η γωνία υπερεκσκαφής. Για τα περισσότερα πετρώματα με ψαθυρή συμπεριφορά έχει προσδιοριστεί πειραματικά ότι κυμαίνεται από 30 έως 50 μοίρες.

Γνωρίζοντας τη γωνία υπερεκσκαφής και το μήκος της κοπής μπορεί να γίνει μια εκτίμηση του όγκου του πετρώματος που αποσπάθηκε από τη φυσική του θέση. Με αυτά τα στοιχεία μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της ειδικής ενέργειας εκσκαφής του πετρώματος.

π.χ. Roxborough, (1973)

$$S.E. = \frac{W}{V} = \frac{\overline{F_c}}{W \cdot d + d^2 \cdot \tan \theta}$$



Σχήμα 7.12. Παράμετροι της κοπής που επηρεάζουν την ειδική ενέργεια εκσκαφής

Όπου:

$$\overline{F_c} = \frac{F_c}{R} : \text{μέση δύναμη κοπής}$$

F_c : δύναμη κοπής κατά Roxborough (μέγιστη δύναμη κοπής)

R : λόγος μέγιστης δύναμης κοπής προς μέση δύναμη κοπής ο οποίος έχει βρεθεί πειραματικά και είναι σπανίως μικρότερος του 2 (για χαμηλής αντοχής πετρώματα περίπου 2 και για υψηλής αντοχής μέχρι και 3)

θ : γωνία υπερεκσκαφής η οποία λαμβάνεται από την πλευρά του κοπτικού

W : πλάτος αιχμής σφήνας

7.4.2. Από εμπειρικές σχέσεις και διαγράμματα που συσχετίζονται με ιδιότητες του πετρώματος

A) McFeat-Smith, (1977)

$$S.E. = -0.65 + 0.41 \cdot CI^2 + 1.81 \cdot K^{1/3} \pm 2.6 \left(\frac{MJ}{m^3} \right)$$

Όπου:

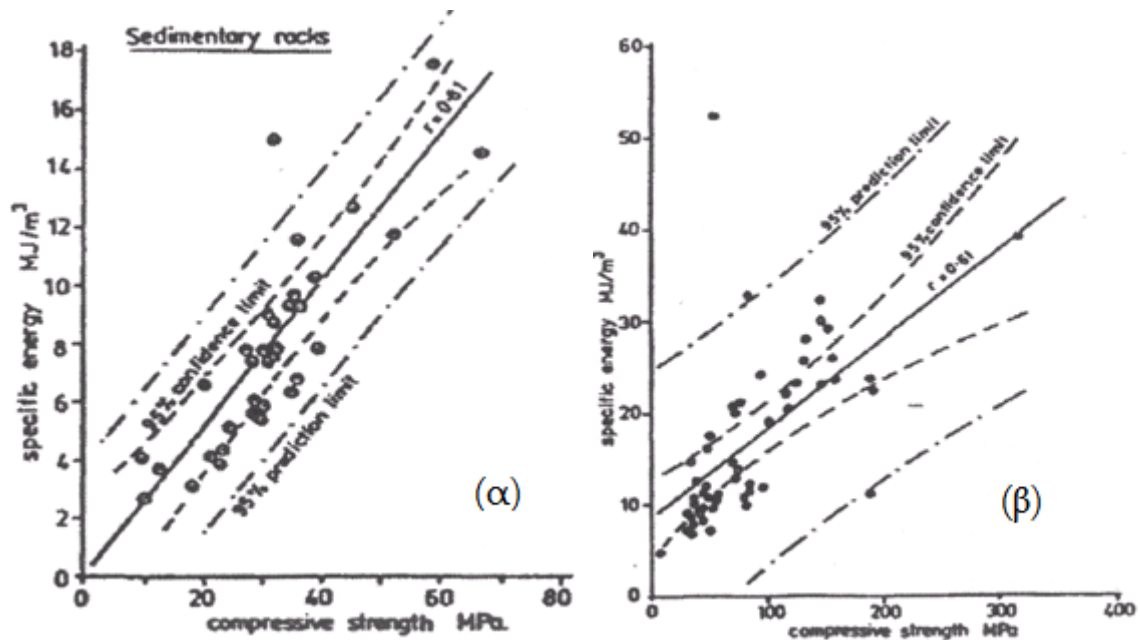
CI : (Cone Indenter Hardness), σκληρότητα διείσδυσης κώνου η οποία μετράται με N.C.B cone indenter

K : συντελεστής πλαστικότητας Shore

B) Roxborough

Η ειδική ενέργεια εκσκαφής μπορεί να προβλεφθεί από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος. Ειδικά για τα ιζηματογενή πετρώματα παρουσιάζει καλή συσχέτιση:

$$S.E. = 0.25 \cdot \sigma_c + 0.11, R^2 = 0.81$$



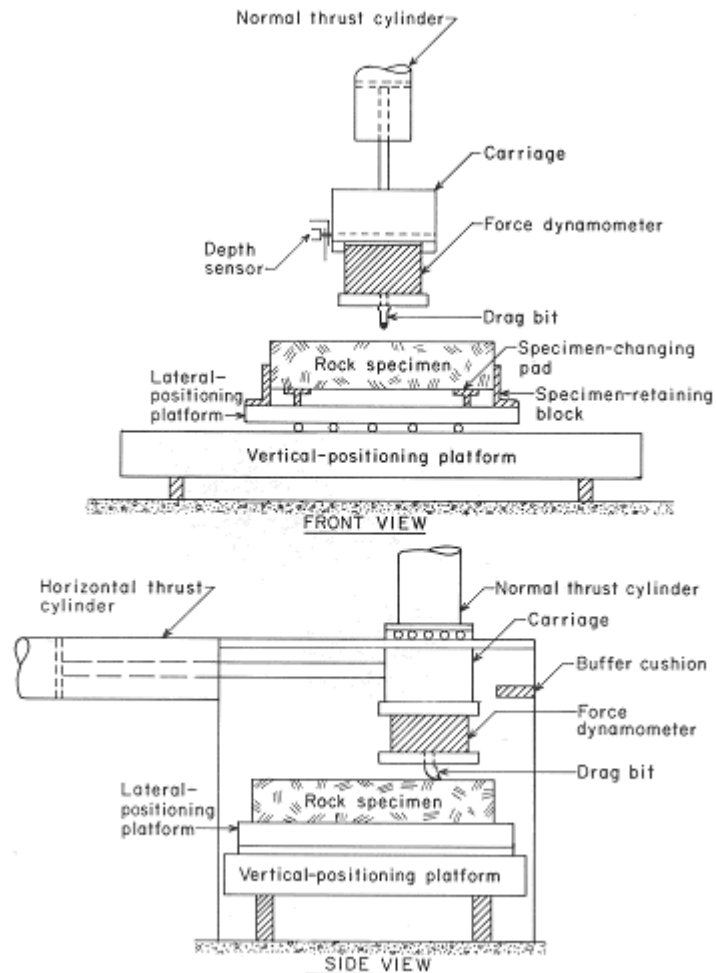
Σχήμα 7.13. Συσχέτιση αντοχής σε θλίψη με ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Roxborough για α) όλους του τύπους πετρωμάτων, β) ιζηματογενή πετρώματα (Αναγνώστου 2006)

7.4.3. Από εργαστηριακές δοκιμές κοπής

A) Δοκιμή προσδιορισμού παραμέτρων κοπής δεδομένων κοπτικών

Γενικά η ειδική ενέργεια εκσκαφής ενός πετρώματος λαμβάνεται με μία δοκιμή κοπής η οποία εκτελείται με τις επιθυμητές παραμέτρους εκσκαφής-κοπής (τύπος κοπτικού εργαλείου, βάθος κοπής, ταχύτητα κοπής). Από τη δοκιμή λαμβάνεται η μέση δύναμη κοπής η οποία διαιρούμενη με τον όγκο εξορυγμένου πετρώματος ανά μονάδα μήκους κοπής δίνει την ειδική ενέργεια εκσκαφής.

Δεδομένου ότι η τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής ενός πετρώματος εξαρτάται από τις παραμέτρους εκσκαφής-κοπής η δοκιμή κοπής χωρίς προδιαγεγραμμένες παραμέτρους κοπής εκτελείται όταν επιθυμείται προσαρμογή της δοκιμής σε δεδομένες συνθήκες εξόρυξης ή βελτιστοποίηση των παραμέτρων εκσκαφής με παραμετρικές αναλύσεις.



Σχήμα 7.14. Γενική διάταξη δοκιμής κοπής κατά Demou (Αναγνώστου 2006)

B) Δοκιμή κοπής με πρότυπα κοπτικά

Στη δοκιμή κοπής με πρότυπα κοπτικά (Core Cuttability Test) η ειδική ενέργεια εκσκαφής υπολογίζεται με την ίδια εργαστηριακή διάταξη (σχήμα 7.14), με τη διαφορά ότι εκτελείται με προδιαγεγραμμένες παραμέτρους εκσκαφής-κοπής προκειμένου να λαμβάνεται ο δείκτης ειδικής ενέργειας εκσκαφής, ο οποίος περιγράφει το πέτρωμα και αποτελεί ιδιότητα του πετρώματος.

7.5. Εφαρμογές της ειδικής ενέργειας εκσκαφής

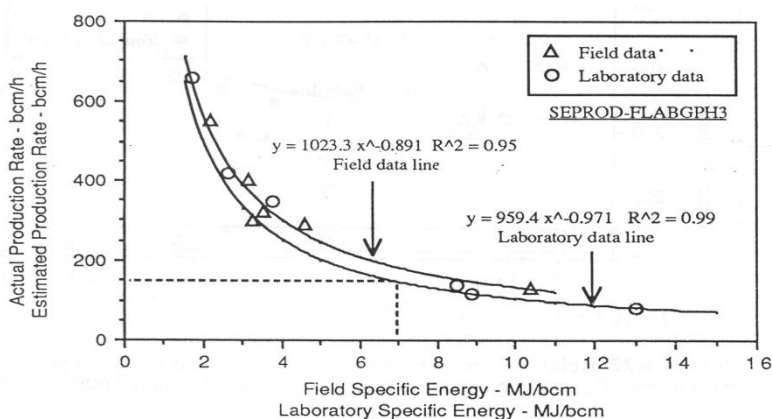
7.5.1. Σχετική αποδοτικότητα μεθόδου εξόρυξης και σύγκριση αποδοτικότητας διαφορετικών μεθόδων εξόρυξης

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η ενέργεια που δαπανάται για την εξόρυξη της μονάδας όγκου ενός πετρώματος με εφαρμογή μίας μεθόδου εξόρυξης μας δείχνει συγκριτικά με την θεωρητικά ελάχιστη, την αποτελεσματικότητά της.

Η ειδική ενέργεια εκσκαφής αποτελεί κριτήριο σύγκρισης της αποτελεσματικότητας διαφορετικών μεθόδων μηχανικής εξόρυξης. Μάλιστα σε συνδυασμό με το κριτήριο της φθοράς των κοπτικών εργαλείων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητά της μεθόδου ή την σχετική αποτελεσματικότητά δύο μεθόδων.

7.5.2. Πρόβλεψη της απόδοσης μηχανής όρυξης

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα η απόδοση δεδομένου μηχανικού εξοπλισμού εξόρυξης μπορεί να συσχετιστεί αρχικά με μία ιδιότητα του πετρώματος και στη συνέχεια να προβλεφθεί βάσει αυτής. Η ειδική ενέργεια εκσκαφής συσχετίζεται γενικά καλά με την απόδοση μηχανικού εξοπλισμού εξόρυξης όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.15.



Σχήμα 7.15. Πρόβλεψη της απόδοσης Surface Miner 2D από την ειδική ενέργεια εκσκαφής κατά Kramadibrata (Αναγνώστου 2006)

8. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (Core Cuttability Test)

8.1. Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ειδική ενέργεια εκσκαφής ενός πετρώματος είναι δυνατόν να υπολογιστεί από μια δοκιμή κοπής σε δοκίμιο πετρώματος. Η ενέργεια αυτή όπως είδαμε εξαρτάται πέρα από τις ιδιότητες του πετρώματος και από τις συνθήκες κοπής (γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τρόπος προσβολής, βάθος κοπής, ταχύτητα κοπής). Για το λόγο αυτό ένα πέτρωμα παρουσιάζει διάφορες τιμές ειδικής ενέργειας εκσκαφής για διαφορετικές συνθήκες κοπής και συνεπώς οι ειδικές ενέργειες εκσκαφής διαφορετικών πετρωμάτων που προέρχονται από δοκιμές με διαφορετικές συνθήκες κοπής δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες.

Έτσι το 1978 ο McFeat-Smith θέτει τις προδιαγραφές της δοκιμής κοπής για τον προσδιορισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής:

Δοκίμιο

Γεωμετρία: κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 54.7mm (NX)

Κοπτικό εργαλείο

Τύπος: συρόμενου τύπου

Σύνθεση: καρβίδιο βολφραμίου με ονομαστικό μέγεθος κόκκου 3-3.5 μ m και 9-10% περιεκτικότητα σε κοβάλτιο

Πλάτος αιχμής (W): 12.7 mm

Γωνία εμπρόσθιας ελευθερίας (α): 5 $^{\circ}$

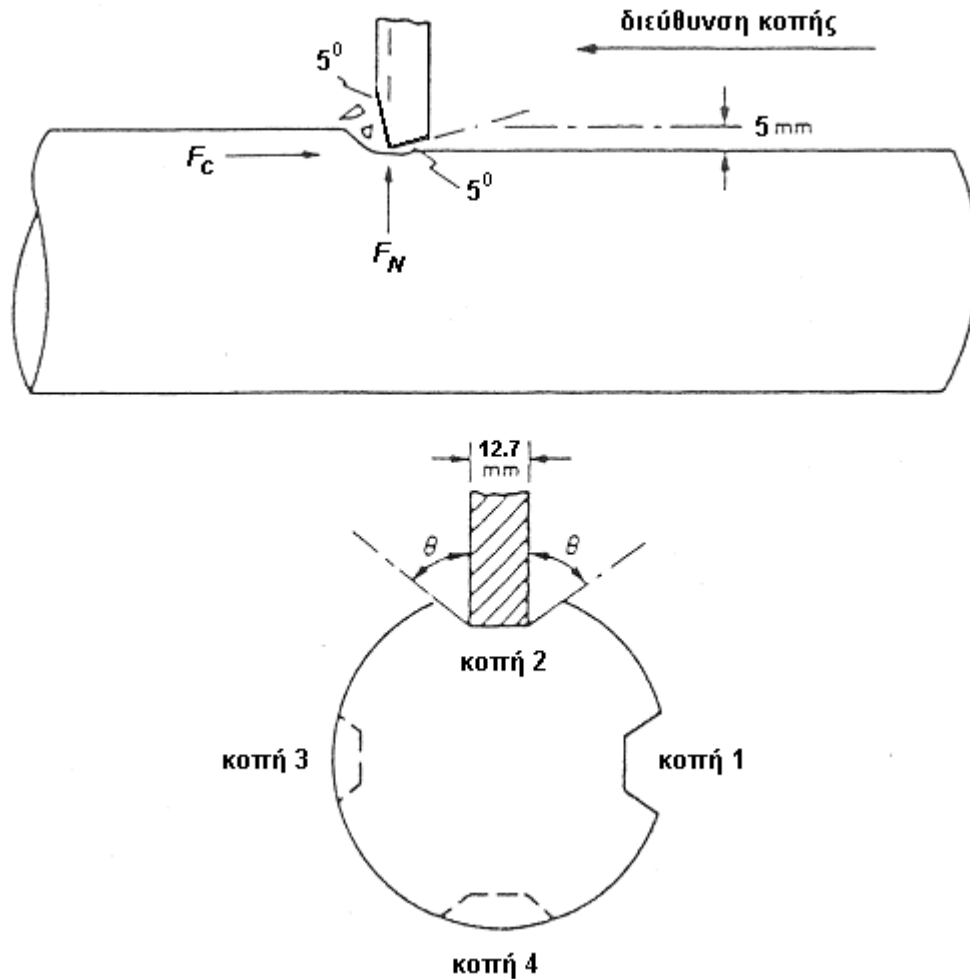
Γωνία οπίσθιας ελευθερίας (β): -5 $^{\circ}$

Προσβολή

Διεύθυνση κοπής: διαμήκης άξονας του κυλίνδρου

Βάθος κοπής: 5 mm από γενέτειρα

Ταχύτητα κοπής: 150 mm/sec



Σχήμα 8.1. Προδιαγραφές εργαστηριακής δοκιμής κοπής για τον υπολογισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής κατά Fowell (Αναγνώστου 2006)

8.2. Εργαστηριακή διάταξη

Η διάταξη της δοκιμής κοπής για τον προσδιορισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων του Ε.Μ.Π περιλαμβάνει:

- α) οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη
- β) δυναμόμετρο
- γ) μονάδα ελέγχου δυναμόμετρου με ενισχυτή σήματος
- δ) κάρτα εισαγωγής δεδομένων στον υπολογιστή
- ε) υπολογιστής και λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων

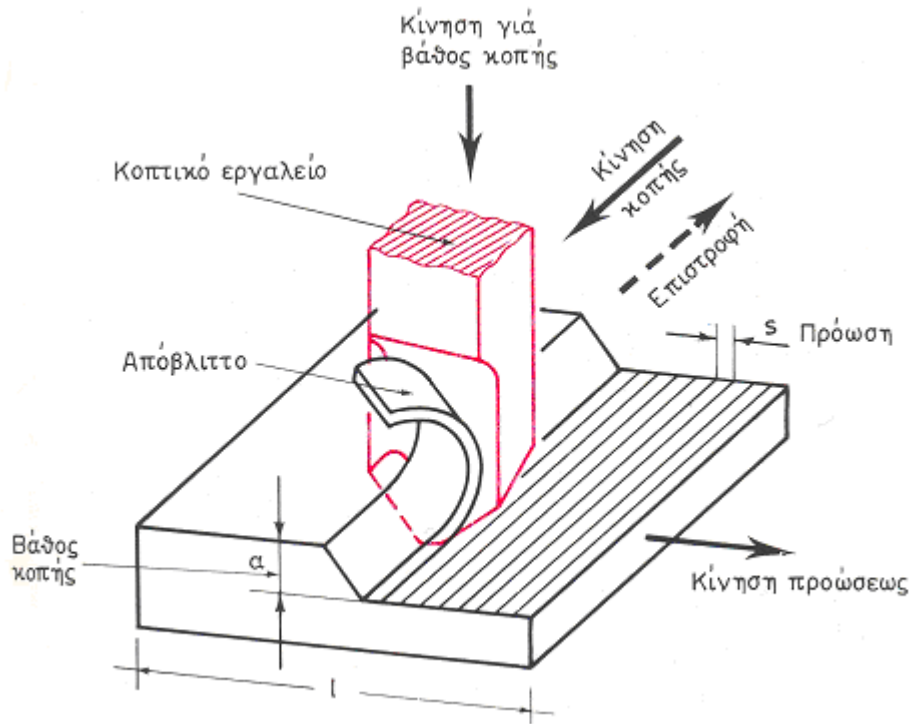
8.2.1. Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη

Με πλάνισμα κατεργαζόμαστε μηχανουργικά επιφάνειες επίπεδες, οριζόντιες, κατακόρυφες ή υπό κλίση. Η κύρια κίνηση κοπής σ' αυτό είναι ευθύγραμμη παλινδρομική.

Ο πλήρης κύκλος εργασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα όπως φαίνονται και στο σχήμα 8.2.:

- κύρια ωφέλιμη ευθύγραμμη κίνηση του κοπτικού εργαλείου για την κοπή
- κίνηση του εργαλείου προς τα πίσω (επιστροφή, μη ωφέλιμη κίνηση)
- πρόωση του κομματιού με διεύθυνση κάθετη προς την κίνηση κοπής
- κάθετη κίνηση του εργαλείου προς την επιφάνεια κατεργασίας για νέο βάθος κοπής

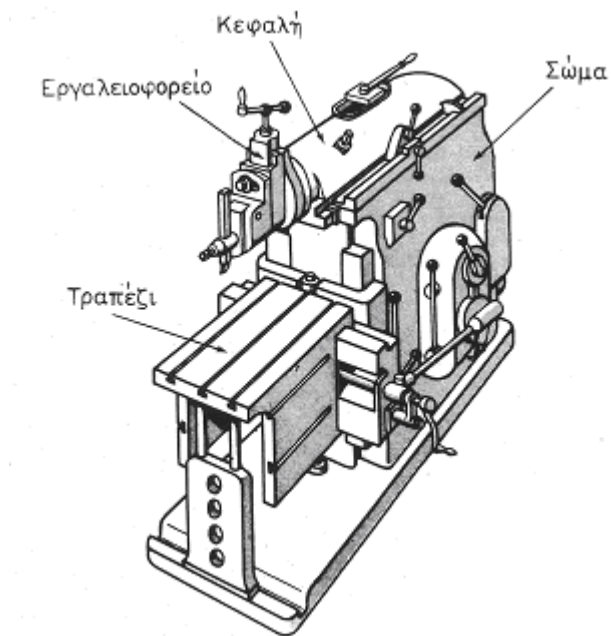
Κατά την έναρξη της διαδρομής επιστροφής, το εργαλείο ανασηκώνεται ελαφρά προς τα επάνω για να μην τρίβεται η αιχμή του πάνω στην επιφάνεια κοπής.



Σχήμα 8.2. Κινήσεις κοπτικού και επιφάνειας κατεργασίας σε ένα πλήρη κύκλο εργασίας πλανίσματος

Η ταχυπλάνη είναι μια σχετικά απλή εργαλειομηχανή και αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- α) το σώμα.
- β) το συγκρότημα των ταχυτήτων και προώσεων.
- γ) την κεφαλή.
- δ) το μηχανισμό μετατροπής της κίνησης.
- ε) το τραπέζι.
- στ) τη μέγγενη
- ζ) το εργαλειοφορείο



Σχήμα 8.3. Βασικά μέρη ταχυπλάνης



Φώτο 8.1. Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.

8.3. Πειραματική διαδικασία

8.3.1. Προετοιμασία - Ρυθμίσεις στην πλάνη

Αφού μετρηθούν οι διαστάσεις (διάμετρος, ύψος) και το βάρος του κυλινδρικού δοκιμίου πετρώματος, αυτό σταθεροποιείται στη μέγγενη του τραπεζιού της πλάνης έτσι ώστε το κοπτικό να προσβάλλει συμμετρικά τη γενέτειρα. Ρυθμίζεται το βάθος κοπής στα 5 mm με το χειρομοχλό του εργαλαιοφορείου και επιλέγεται η βαθμίδα ταχύτητας παλινδρόμησης του κοπτικού και η διαδρομή της κεφαλής έτσι ώστε το μήκος της διαδρομής να είναι μεγαλύτερο του ύψους του δοκιμίου και η ταχύτητα κατά την κοπή να είναι περί τα 150mm/sec. (π.χ. για δοκίμιο 200mm επιλέγεται διαδρομή 500 mm και ταχύτητα παλινδρόμησης 12,5 παλινδρομήσεις/min). Ρυθμίζεται η θέση έναρξης και πέρατος της διαδρομής έτσι ώστε το μέσο της διαδρομής να βρίσκεται στο μέσο του στερεωμένου δοκιμίου.

8.3.2. Ρυθμίσεις δυναμομέτρου και προγράμματος

Από τη μονάδα ελέγχου του δυναμόμετρου επιλέγεται το εύρος μέτρησης των δυνάμεων στο δυναμόμετρο αναλόγως του επιπέδου των δυνάμεων που αναμένονται να αναπτυχθούν (π.χ max 10kN για την δύναμη κοπής και 5kN για την κάθετη και πλάγια δύναμη). Στον υπολογιστή γίνονται ρυθμίσεις στο λογισμικό καταγραφής σήματος Dynoware και έπειτα ρυθμίζουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας στα 1000Hz.

8.3.3. Εκκίνηση πλάνης

Με το συμπλέκτη να βρίσκεται σε θέση αποσύμπλεξης τίθεται σε λειτουργία ο ηλεκτροκινητήρας της πλάνης. Στη φάση αυτή η κεφαλή και το κοπτικό δεν παλινδρομούν.

8.3.4. Έναρξη παλινδρόμησης κεφαλής

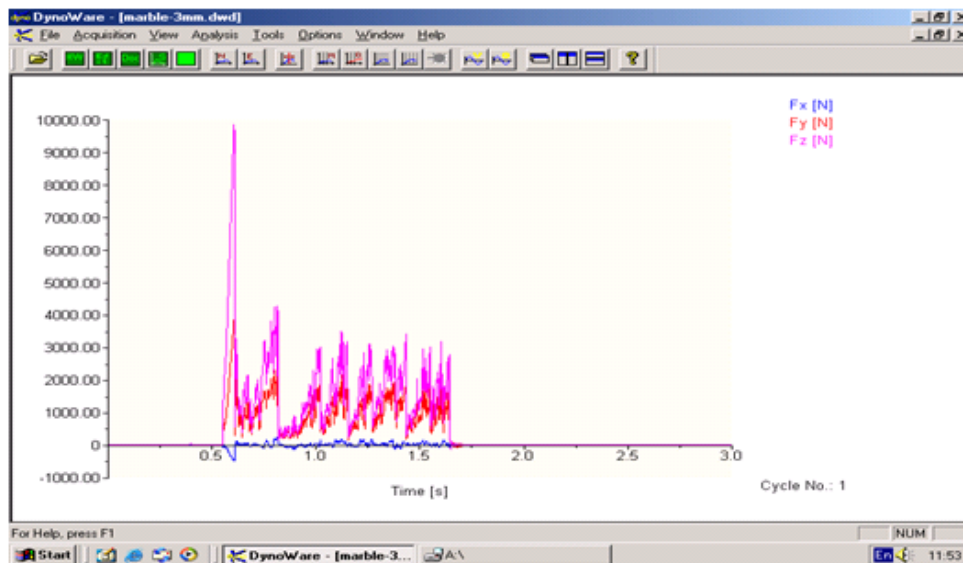
Για την έναρξη του πειράματος γίνεται έναρξη καταγραφής σήματος από το λογισμικό καταγραφής σήματος (Dynoware) και αμέσως μετά τοποθετείται ο συμπλέκτης σε θέση σύμπλεξης. Στη φάση αυτή η κεφαλή και το κοπτικό παλινδρομούν και εκτελείται η κοπή.

8.3.5. Τερματισμός παλινδρόμησης κεφαλής

Όταν το κοπτικό φθάσει στο πέρας της διαδρομής της κεφαλής τοποθετείται ο συμπλέκτης σε θέση αποσύμπλεξης και τερματίζεται από το πρόγραμμα η καταγραφή του σήματος. Τερματίζεται η λειτουργία της πλάνης και μετράται η διαφορά μάζας του δοκιμίου.

8.3.6. Καταγραφή αποτελεσμάτων

Στον υπολογιστή και μέσω του λογισμικού Dynoware 2825A1 της Kistler γίνεται η καταγραφή και επεξεργασία του σήματος (δεδομένων) από το δυναμόμετρο.



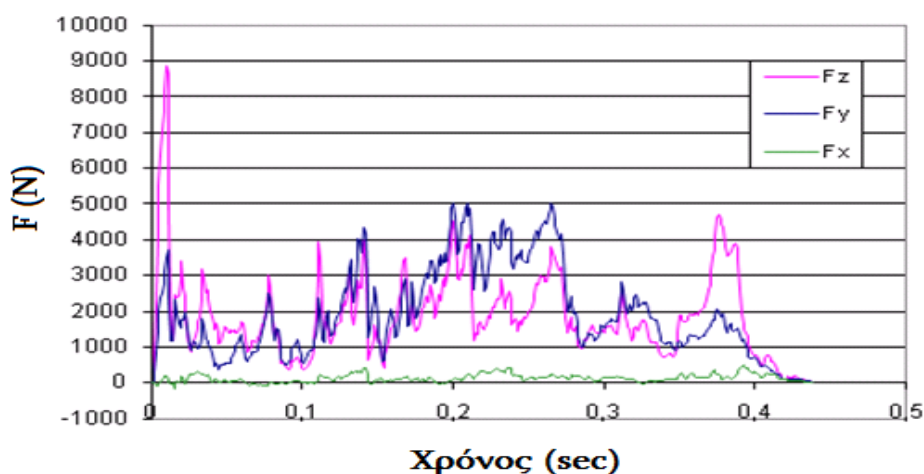
Σχήμα 8.4. Πρόγραμμα Dynoware για την καταγραφή και επεξεργασία του σήματος

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται 4 φορές για κάθε δοκίμιο στρέφοντας το δοκίμιο κατά 90° μοίρες.

8.4. Επεξεργασία μετρήσεων

Από τη δοκιμή λαμβάνεται διάγραμμα δύναμης – χρόνου. Θεωρώντας ως δεδομένο το γεγονός ότι η ταχύτητα κατά τη διάρκεια της κοπής είναι σταθερή, γνωρίζοντας το μήκος του δοκιμίου και προσδιορίζοντας το χρόνο που διαρκεί η κοπή από το διάγραμμα δύναμης κοπής – χρόνου μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα της κοπής από τη σχέση:

$$\text{Ταχύτητα κοπής} = \frac{\text{Μήκος δοκιμίου}}{\text{Συνολικός χρόνος κοπής}}$$



Σχήμα 8.5. Διάγραμμα δυνάμεων κατά την κοπή συναρτήσει του χρόνου

Για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της F_z πρέπει να αφαιρέσουμε το πρώτο peak του διαγράμματος καθώς είναι η πρώτη επαφή με το πέτρωμα και έπειτα να υπολογίσουμε το καθαρό χρόνο κοπής αφαιρώντας το κομμάτι που αποκολλάται στο τέλος. Με τη βοήθεια των φωτογραφιών του Παραρτήματος 5, όπου είναι εμφανείς οι διαστάσεις υπολογίζουμε το μήκος του κομματιού που φεύγει και έχοντας την ταχύτητα κοπής, που είναι σταθερή, βρίσκουμε τον χρόνο. Αυτόν τον χρόνο τον αφαιρούμε από τον συνολικό μαζί με το χρόνο του πρώτου peak και βρίσκουμε το διάστημα που έχουμε τον καθαρό χρόνο κοπής. Έχοντας την μέση τιμή

της F_z , μπορούμε να βρούμε το συνολικό έργο της, η οποία είναι και η μόνη δύναμη που παράγει έργο διότι μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής της κατά τη διεύθυνση της κοπής, ενώ οι υπόλοιπες δυνάμεις το μετατοπίζουν κάθετα στη διεύθυνση κοπής. Το συνολικό έργο της F_z δίνεται από τη σχέση:

$$WF_z = \overline{F_z} * \text{Μήκος δοκιμίου}$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τη διαφορά όγκου του δοκιμίου πριν και μετά την κοπή διαιρώντας τη διαφορά μάζας (πίνακας 8.2) με την πυκνότητα.

Ακολούθως, διαιρούμε το συνολικό έργο της F_z (πίνακας 8.4) με τον όγκο που απομακρύνθηκε (πίνακας 8.3) και παίρνουμε την ειδική ενέργεια εκσκαφής. Τα διαγράμματα δυνάμεων – χρόνου για όλα τα δοκίμια δίνονται στο παράρτημα 5. Στον πίνακα 8.1 που ακολουθεί δίνονται οι μάζες των δοκιμίων μετά τις διαδοχικές κοπές και στον πίνακα 8.5 δίνονται οι δείκτες ειδικής ενέργειας εκσκαφής.

Πίνακας 8.1. Μάζες των δοκιμίων (g) μετά τις διαδοχικές κοπές

Δοκίμιο	Αρχικό βάρος	Κοπή 1 ^η	Κοπή 2 ^η	Κοπή 3 ^η	Κοπή 4 ^η
Ta_04	628,0	622,0	607,8	600,8	592,9
Ta_05	757,1	743,5	740,0	730,4	718,3

Πίνακας 8.2. Διαφορά μάζας των δοκιμίων (g) μετά τις διαδοχικές κοπές

Δοκίμιο	Κοπή 1 ^η	Κοπή 2 ^η	Κοπή 3 ^η	Κοπή 4 ^η
Ta_04	6,0	14,2	7,0	7,9
Ta_05	13,6	3,5	9,6	12,1

Πίνακας 8.3. Όγκος εκσκαφής (m³) μετά τις διαδοχικές κοπές

Δοκίμιο	Κοπή 1 ^η	Κοπή 2 ^η	Κοπή 3 ^η	Κοπή 4 ^η
Ta_04	2,23 *10 ⁻⁶	5,28 *10 ⁻⁶	2,60 *10 ⁻⁶	2,94 *10 ⁻⁶
Ta_05	5,05 *10 ⁻⁶	1,30 *10 ⁻⁶	3,57 *10 ⁻⁶	4,50 *10 ⁻⁶

Πίνακας 8.4. Συνολικό έργο WFz (J)

Δοκίμιο	Κοπή 1 ^η	Κοπή 2 ^η	Κοπή 3 ^η	Κοπή 4 ^η
Ta_04	130,59	146,00	122,52	103,12
Ta_05	150,52	154,99	153,25	143,70

Πίνακας 8.5. Δείκτες ειδικής ενέργειας εκσκαφής (MJ/m³)

Δοκίμιο	Κοπή 1 ^η	Κοπή 2 ^η	Κοπή 3 ^η	Κοπή 4 ^η	Μέση τιμή
Ta_04	58,559	27,652	47,123	35,075	42,102
Ta_05	29,806	119,222	42,927	31,932	55,972

Τέλος, υπολογίζουμε τον συντελεστή κοπής που είναι η μέση δύναμη κοπής Fz προς τη μέση κάθετη δύναμη Fy και παρουσιάζεται στον Πίνακας 8.6.

Πίνακας 8.6. Συντελεστής κοπής

Δοκίμιο	Κοπή 1 ^η	Κοπή 2 ^η	Κοπή 3 ^η	Κοπή 4 ^η	Μέση τιμή
Ta_04	0,497	0,474	0,555	0,576	0,526
Ta_05	0,536	0,512	0,583	0,596	0,557

9. ΕΞΟΡΥΞΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ SURFACE MINER

9.1. Γενικά

Με τη συνεχή βελτίωση των γνώσεων των ανθρώπων και την μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση τους σε ότι αφορά το περιβάλλον καθώς επίσης και την βελτίωση των γνώσεων τους στη διαχείριση βιομηχανικών χώρων είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία περισσότερων και αυστηρότερων περιβαλλοντικών νομοθεσιών για τα υπαίθρια μεταλλεία και λατομεία που βρίσκονται σε ευαίσθητες περιοχές, δηλαδή σε περιοχές όπου υπάρχουν κοντά εκκλησίες, οικισμοί αλλά και αρχαιολογικά αξιοθέατα. Έτσι, έχουν επιβάλει έμμεσα την εύρεση μιας άλλης οικονομικής λύσης για την εξόρυξη πρώτων υλών, ώστε να περιορίσουν το θόρυβο, τις δονήσεις και την σκόνη.

Το Surface Miner είναι ένα σύνθετο και σύγχρονο αυτοκινούμενο μηχάνημα συνεχούς μηχανικής εξόρυξης που χρησιμοποιείται κυρίως σε υπαίθρια ορυχεία, λατομεία και χωματουργικά έργα αλλά και σε εξορύξεις σε υπόγεια μέτωπα.

Χαρακτηρίζεται ως σύνθετο γιατί εκτελεί συγχρόνως τις τρεις βασικές φάσεις τις εξόρυξης, δηλαδή την εξόρυξη, την φόρτωση και την απόθεση του υλικού όταν αυτό απαιτείται. Η εξόρυξη με τη χρήση Surface Miner σε σχέση με άλλες μεθόδους εμφανίζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Πιο οικονομική μέθοδος καθώς χρησιμοποιείται περιορισμένος μηχανολογικός εξοπλισμός και λιγότερο εργατικό προσωπικό
- Λιγότερο χρονοβόρα διαδικασία εκμετάλλευσης
- Το υλικό της εξόρυξης είναι στο κατάλληλο μέγεθος και τις περισσότερες φορές δεν απαιτείται δευτερογενής θραύση
- Καλύτερη εκμετάλλευση του εναποθέσαντος υλικού



Σχήμα 9.1. Χρήσεις του Surface Miner

9.2. Συγκρότηση του Surface Miner

Το Surface Miner αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. Υποδομή
2. Άνω δομή
3. Κοπτικό τύμπανο
4. Πρωτεύουσα μεταφορική ταινία
5. Βραχίονας με την κύρια μεταφορική ταινία

Η κίνηση των διαφόρων μηχανισμών του Surface Miner επιτυγχάνεται με την βοήθεια ενός V12 πετρελαιοκινητήρα με ισχύ 811PS. Η ισχύς μεταβιβάζεται δια μέσου ενός ισχυρού ιμάντα που οδηγεί στο κοπτικό τύμπανο εξασφαλίζοντας έτσι την αποτελεσματική μεταφορά ισχύος. Επιπλέον τα υπόλοιπα μέρη κινούνται με υδραυλικό σύστημα.



Φώτο 9.1. Surface Miner

9.2.1. Υποδομή

Η υποδομή του Surface Miner αποτελείται από τις τέσσερις ερπύστριες οι οποίες προσφέρουν στο μηχάνημα εξαιρετική σταθερότητα και έλξη ακόμα και όταν κόβει σκληρό πέτρωμα. Και οι τέσσερις ερπύστριες είναι ρυθμισμένες έτσι ώστε να κάνουν το μηχάνημα να έχει εύκολους ελιγμούς γύρω από τις σκληρές στρώσεις.

9.2.2. Άνω δομή

Στην άνω δομή του Surface Miner βρίσκεται η καμπίνα του χειριστή, η οποία παρέχει στον χειριστή άνεση και ασφάλεια. Μέσα στην καμπίνα βρίσκονται όλα τα όργανα ελέγχου του μηχανήματος, τα οποία είναι με τέτοιο τρόπο τοποθετημένα γύρω από τον χειριστή έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια απλή και ακριβής λειτουργία του μηχανήματος. Επίσης στο πίσω μέρος της δομής του μηχανήματος υπάρχει ένας κινητήρας 811HP. Το μηχάνημα αυτό έχει χωρητικότητα πετρελαίου 1500 lit και κατανάλωση γύρω στα 80 lit/h.



Φώτο 9.2. Surface Miner σε λειτουργία

9.2.3. Κοπτικό τύμπανο

Το κοπτικό τύμπανο είναι τοποθετημένο στο κέντρο του μηχανήματος μεταξύ των τεσσάρων ερπυστριών. Είναι τοποθετημένο πλησίον του κέντρου βάρους του μηχανήματος.

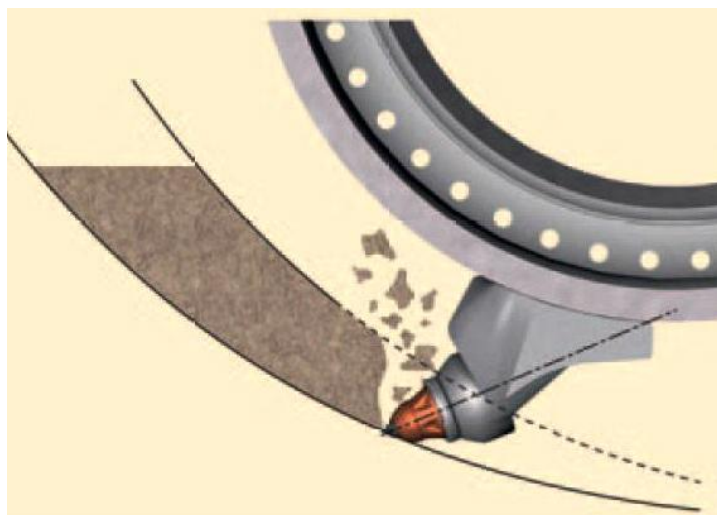
Το εγκάρσιο κοπτικό τύμπανο έχει διάμετρο 1140mm και είναι κατασκευασμένο από σκληρό μέταλλο (Hardness Brinell HB 400).

Επί της κυλινδρικής επιφάνειας του τυμπάνου ευρίσκονται κοπτικά τοποθετημένα ελικοειδώς, τα οποία κόβουν το πέτρωμα. Μέσω του διαστήματος μεταξύ των κοπτικών άκρων γίνεται και η μεταφορά των θραυσμάτων της κοπής στη πρωτεύουσα μεταφορική ταινία, η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του μηχανήματος και πίσω από το τύμπανο κοπής. Το κοπτικό τύμπανο και τα αναλώσιμα κοπτικά εργαλεία του μηχανήματος είναι ρυθμισμένα για το πέτρωμα το οποίο πρόκειται να εξορυχτεί. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κοπτικών όπου ο κάθε τύπος χρησιμοποιείται για συγκεκριμένες συνθήκες. Η συνήθης ταχύτητα του κοπτικού τυμπάνου κυμαίνεται από 60 έως 100 στροφές το λεπτό.

Ένα από τα χαρακτηριστικά του κοπτικού είναι η κοπτική ακμή που είναι κατασκευασμένη από καρβίδια του βολφραμίου. Ο τύπος κάθε ακμής είναι διαφορετικός για κάθε περίπτωση. Τα κοπτικά είναι κολλημένα σε έναν δακτύλιο και εφαρμόζονται πάνω σε ένα δακτυλίδι έτσι ώστε να παραμένουν στη θέση τους αλλά να μπορούν να εξορύσσουν το πέτρωμα. Τα φθαρμένα κοπτικά μπορούν να απομακρύνονται με απλή χαλάρωση του δακτυλιδιού. Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται ένα κοπτικό άκρο του τυμπάνου κατά τη διάρκεια της κοπής.



Φώτο 9.3. Κοπτικό τύμπανο του Surface Miner



Σχήμα 9.2. Κοπτικό άκρο κατά τη διάρκεια της κοπής

9.2.4. Πρωτεύουσα μεταφορική ταινία

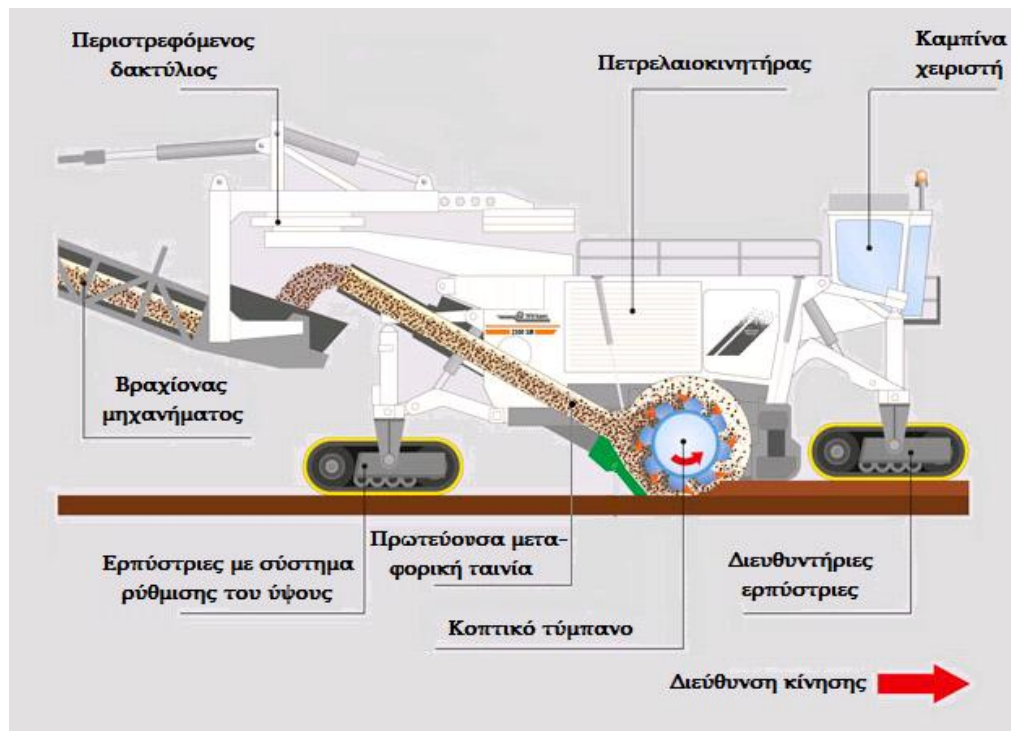
Η πρωτεύουσα μεταφορική ταινία βρίσκεται μπροστά και πολύ κοντά από το εγκάρσιο κοπτικό τύμπανο. Είναι κατασκευασμένη από ειδικό συνθετικό υλικό για να έχει ανθεκτικότητα λόγω της μεγάλης καταπόνησης που υφίσταται κατά την λειτουργία του μηχανήματος.

9.2.5. Βραχίονας του μηχανήματος

Ο βραχίονας του Surface Miner αποτελείται από ένα δικτύωμα χαλύβδινων δοκών, ο οποίος στηρίζεται μέσω υδραυλικών κυλίνδρων και συρματόσχοινων στον πύργο της άνω δομής.

Κατά μήκος του βραχίονα υπάρχει μια μεταφορική ταινία η οποία ξεκινάει από το τέλος της πρωτεύουσας μεταφορικής ταινίας και καταλήγει στο τέλος του βραχίονα όπου και το υλικό φεύγει από την ταινία. Η ταινία αυτή είναι από το ίδιο υλικό που έχει φτιαχτεί και η πρωτεύουσα μεταφορική ταινία και στην επιφάνεια της φέρει ραβδώσεις, ώστε το θραυσμένο υλικό να μην κυλάει προς τα πίσω, όταν η ταινία λαμβάνει μεγάλη κλίση.

Ο βραχίονας αυτός έχει σταθερό μήκος αλλά έχει τη δυνατότητα αλλαγής κλίσης και κατεύθυνσης. Μέσω αυτού το μηχάνημα δίνει τη δυνατότητα είτε απευθείας φόρτωσης του υλικού σε χωματουργικά αυτοκίνητα είτε απόθεσης του σε κατάλληλη τοποθεσία.



Σχήμα 9.3. Συγκρότηση του Surface Miner

9.3. Τύποι Surface Miner

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μηχανημάτων Surface Miner στη αγορά για μεταλλευτικές, λατομικές και άλλες εργασίες, οι οποίοι όμως διαφοροποιούνται ως επί το πλείστον στη δυναμικότητα και στην ισχύ αλλά η βασική αρχή λειτουργίας του μηχανήματος παραμένει ίδια. Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε το Surface Miner 2500SM. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

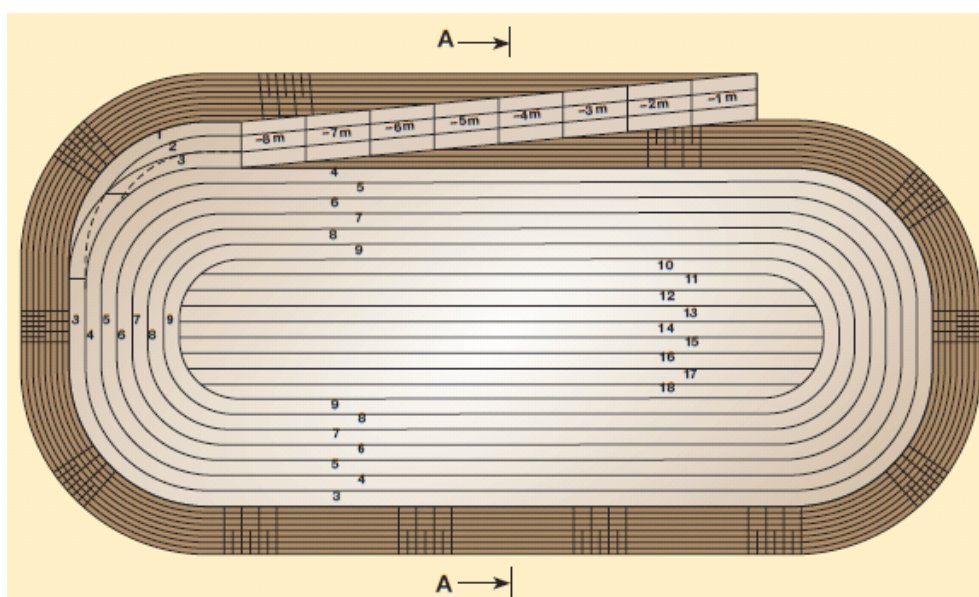
Πίνακας 9.1. Χαρακτηριστικά του Surface Miner 2500SM

Surface Miner 2500SM	
Πλάτος κοπής	2,500 mm
Βάθος κοπής	0-600 mm
Ιπποδύναμη	1.050 Hp
Βάρος κατά την κοπή	100.500 kg

9.4. Διαδικασία εξόρυξης ασβεστόλιθου

Γενικά το Surface Miner απαιτεί σχετικά μεγάλη σε έκταση και ομαλή επιφάνεια για να λειτουργήσει. Οι μεγάλες κλίσεις (μεγαλύτερες από 2°) δημιουργούν κίνδυνο ανατροπής του μηχανήματος.

Η εξόρυξη του ασβεστόλιθου από το Surface Miner γίνεται συνήθως σε μια επίπεδη επιφάνεια μεγάλης έκτασης σχήματος έλλειψης. Η περιοχή εκμετάλλευσης είναι ανεπτυγμένη για κοπή από τη μία οριζόντια τομή σε άλλη οριζόντια τομή. Στο σχήμα 9.4 που ακολουθεί είναι σημειωμένη η σειρά που κόβονται οι τομές.



Σχήμα 9.4. Περιοχή εκμετάλλευσης

Αφού τοποθετηθεί το πρώτο χωματουργικό αυτοκίνητο μπροστά από το Surface Miner, τότε αυτό αρχίζει την εξόρυξη του ασβεστόλιθου. Το κοπτικό τύμπανο κατεβαίνει και αρχίζει να περιστρέφεται και τα κοπτικά κόβουν το πέτρωμα σε βάθος ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος. Το βάθος κοπής στο Surface Miner 2500SM κυμαίνεται από 0 – 600 mm. Η περιστροφή του κοπτικού κυμαίνεται γύρω στις 80 - 90 στροφές το λεπτό. Καθώς το κοπτικό κόβει το πέτρωμα γίνεται φόρτωση στα

χωματουργικά αυτοκίνητα ενώ ταυτόχρονα το μηχάνημα κινείται με μια ταχύτητα 10 – 11 m/min. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

- Συμπαγές υλικό. Όσο το υλικό είναι πιο συμπαγές το μηχάνημα κινείται με μειωμένη αλλά σταθερή ταχύτητα.
- Βάθος κοπής. Όσο αυξάνεται το βάθος κοπής μειώνεται η ταχύτητα κίνησης του μηχανήματος. Ως συνέπεια αυτού, ο χρόνος φόρτωσης των χωματουργικών αυτοκινήτων αυξάνεται.

Όταν το μηχάνημα πλησιάσει το χωματουργικό αυτοκίνητο τότε ο χειριστής του μηχανήματος ειδοποιεί τον οδηγό του χωματουργικού αυτοκινήτου μέσω μιας κόρνας να προχωρήσει προς τα εμπρός. Το χωματουργικό αυτοκίνητο κινείται προς τα εμπρός με πολύ μικρή ταχύτητα μέχρι να ξανακουστεί η κόρνα του Surface Miner, η οποία τον ειδοποιεί να σταματήσει ξανά. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέχρι το χωματουργικό αυτοκίνητο να πληρωθεί από εξορυγμένο υλικό.



Φώτο 9.4. Διαδικασία φόρτωσης

Αφού το μηχάνημα τελειώσει την πρώτη φέτα τότε το κοπτικό τύμπανο σηκώνεται και το μηχάνημα οδηγείται σε νέα θέση για την κοπή της επόμενης φέτας.

Κατά την διάρκεια της εξόρυξης του ασβεστόλιθου το μηχάνημα ελέγχεται από δυο χειριστές. Ο κύριος χειριστής που βρίσκεται μέσα στην καμπίνα έχει την ευθύνη της οδήγησης και τον έλεγχο του μηχανήματος μέσω των διάφορων οργάνων που έχει η καμπίνα. Σημειώνεται ότι το μηχάνημα διαθέτει χειριστήρια και στις δυο πλευρές της καμπίνας.

Ο βοηθός χειριστή βρίσκεται στο δεξιό ή το αριστερό πίσω μέρος του μηχανήματος στο δάπεδο του λατομείου. Ο ρόλος του είναι να ρυθμίζει το βάθος κοπής και την κλίση του κοπτικού τυμπάνου, καθώς και να απομακρύνει χαλαρά ή θραυσμένα πετρώματα τα οποία βρίσκονται μπροστά από το μηχάνημα και είναι δυνατόν να προκαλέσουν προβλήματα στο κοπτικό τύμπανο όπως π.χ. το σφήνωμα του πετρώματος ανάμεσα στα κοπτικά με αποτέλεσμα την γρήγορη φθορά των κοπτικών ή ακόμα και την θραύση αυτών. Επίσης, ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα είναι η μεγάλη καθυστέρηση που υπάρχει μέχρι να αποσφηνωθεί το πέτρωμα.

Οι χειριστές ελέγχουν το μηχάνημα μέσω του συστήματος ελέγχου, το οποίο είναι συνδεδεμένο με αισθητήρες. Οι αισθητήρες που υπάρχουν στο μηχάνημα αυτό είναι:

- Αισθητήρες που ανιχνεύουν την απόσταση του τυμπάνου από την επιφάνεια κοπής
- Υπερηχητικοί αισθητήρες μη επαφής που μετρούν την απόσταση στην πλευρά της επιφάνειας
- Αισθητήρες κλίσεως. Μετρούν την κλίση της επιφάνειας έτσι ώστε εάν υπερβαίνει το 2% τότε αυτόματα το μηχάνημα δημιουργεί την κατάλληλη κλίση. Εάν η κλίση υπερβεί το 2% τότε το μηχάνημα κινδυνεύει να ανατραπεί.
- Πολλαπλοί αισθητήρες
- Αισθητήρες Laser

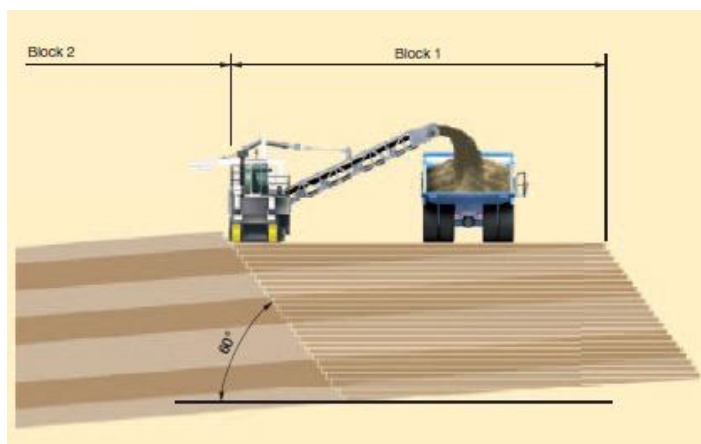
Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τους αισθητήρες μεταβιβάζονται στον βοηθό χειριστή μέσω ενός ψηφιακού πίνακα αναφοράς.

9.5. Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Το Surface Miner αρχικά είχε σχεδιαστεί για κοπή “μαλακών” έως “μέτρια σκληρών” πετρωμάτων με αντοχή σε θλίψη μέχρι 70 MPa. Σήμερα έχει την δυνατότητα να εξορύσσει πετρώματα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη μεταξύ 10 - 120 MPa, γεγονός που το καθιστά χρησιμοποιήσιμο σε ένα ικανοποιητικό εύρος πετρωμάτων και σχηματισμών.

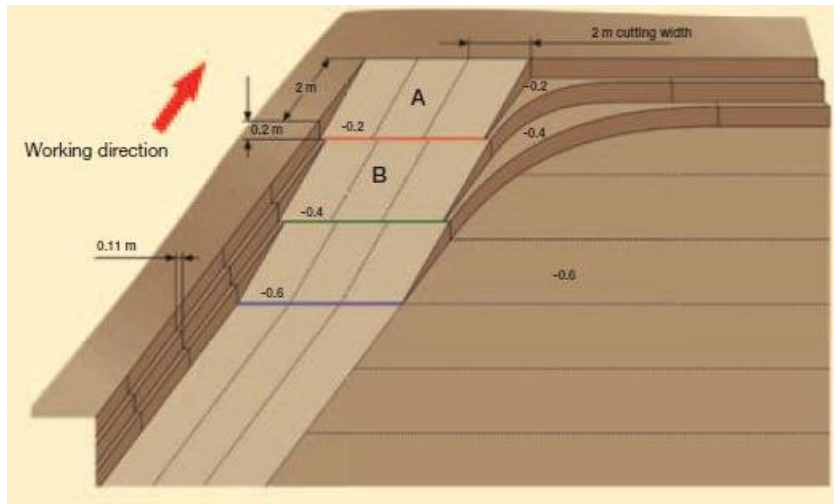
Το βάρος του μηχανήματος παρέχει την απαραίτητη για την κοπή κάθετη δύναμη και η ισχύς του κινητήρα του παρέχει την απαραίτητη ώση, η οποία αποτελεί και την δύναμη κοπής. Αυτό επιτρέπει την κοπή του πετρώματος με αρκετά καλά αποτελέσματα και ταυτόχρονα εξασφαλίζει τη σταθερότητα του μηχανήματος, μειώνοντας τους κραδασμούς. Ο σχεδιασμός (θέση του κοπτικού τυμπάνου στην μέση του μηχανήματος) και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά επιτρέπουν στο μηχάνημα να δουλεύει κάτω από διάφορες συνθήκες και να δίνει λύσεις για αρκετά απαιτητικά έργα στην εξόρυξη πετρωμάτων, ενώ έχει την δυνατότητα να κάνει εκλεκτική εξόρυξη του κεκλιμένου στρώματος.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι εργασίας για την εξόρυξη κεκλιμένου στρώματος εξαρτώμενες πάντα από την κλίση του. Ένα παράδειγμα, είναι η εξόρυξη στρωματοειδούς κοιτάσματος με ελαφριά κλίση που μπορεί να κοπεί σε μπλοκ όπως φαίνεται στο σχήμα 9.5.



Σχήμα 9.5. Εξόρυξη στρωματοειδούς κοιτάσματος με ελαφριά κλίση

Έχει επίσης τη δυνατότητα να διαμορφώνει δικές του ράμπες με κλίση 10 - 15% περίπου. Οι ράμπες αυτές μπορούν να κόβονται με διεύθυνση προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Με την βοήθεια του σχήματος 9.6 θα ερμηνεύσουμε πως ένα τέτοιο μηχάνημα έχει τη δυνατότητα να φτιάχνει μια ράμπα.



Σχήμα 9.6. Διαδικασία κατασκευής ράμπας

Το Surface Miner κόβει την πρώτη τομή με ανοδική κατεύθυνση εργασίας. Το κόψιμο μειώνεται βαθμιαία μέχρι την κόκκινη γραμμή. Από την κόκκινη γραμμή και μετά, το κοπτικό σηκώνεται και δεν κόβει το πέτρωμα μέχρι να φθάσει στη θέση όπου θα ξεκινήσει το κόψιμο της επόμενης φέτας.

Η κοπτική απόδοση του Surface Miner είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τον τύπο κοπτικού εργαλείου
- Την γωνία των εργαλείων κοπής
- Τη ταχύτητα του κοπτικού τυμπάνου
- Το βάθος κοπής
- Την ταχύτητα προχώρησης μηχανήματος

Το μεταφορικό σύστημα του εξορυγμένου πετρώματος στο Surface Miner βρίσκεται στο μπροστινό μέρος του μηχανήματος. Το μεταφορικό αυτό σύστημα έχει την δυνατότητα να κινηθεί 55° δεξιά και 45° αριστερά του άξονα πορείας του μηχανήματος, ενώ το ύψος μπορεί να αλλάζει σε ένα πλαίσιο από 3 – 4,8 m.

Το μηχάνημα αυτό έχει την ικανότητα και την ευελιξία να μπορεί να φορτώνει τα χωματουργικά οχήματα είτε από το πίσω μέρος είτε από τα πλάγια.

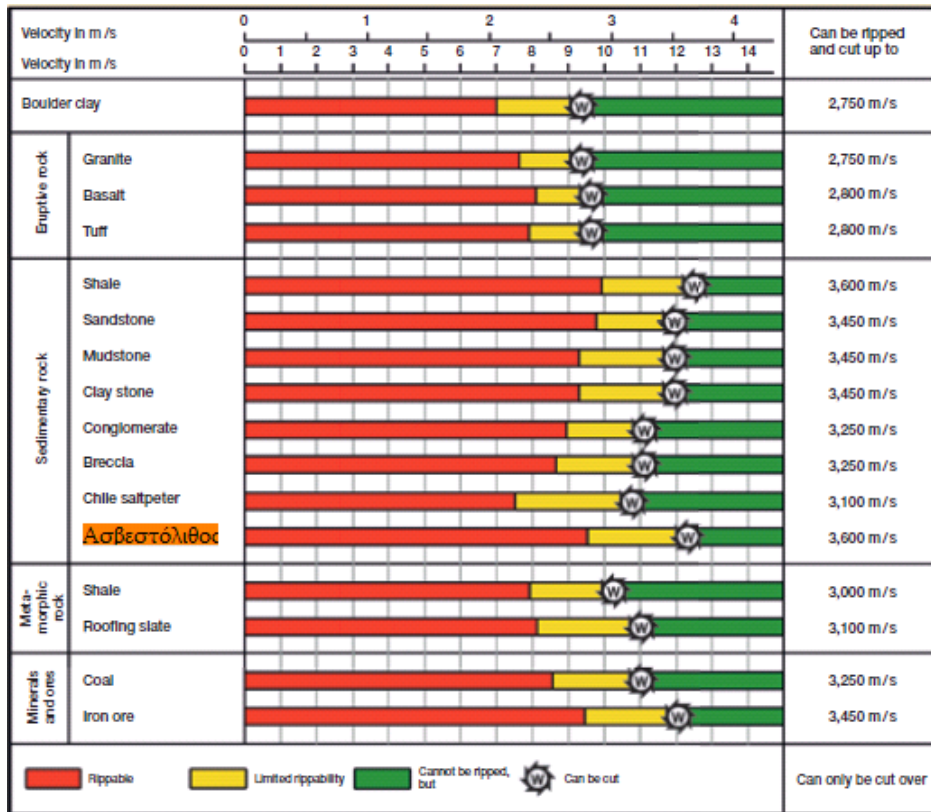
Το μέγεθος των χωματουργικών οχημάτων εξαρτάται κυρίως από:

- Το ύψος της μπούμας όπου βρίσκεται το σύστημα μεταφοράς
- Την κοπτική απόδοση του μηχανήματος σε δεδομένο κοίτασμα

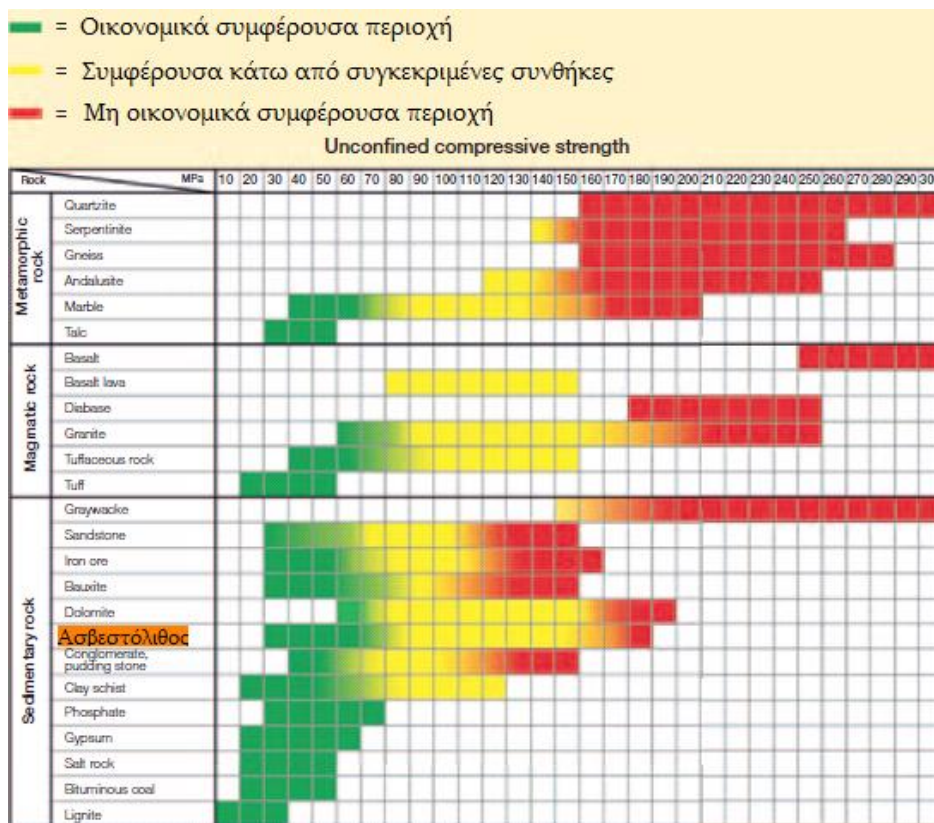
Για να μπορεί να υπάρχει ένας οικονομικός κύκλος φόρτωσης και μεταφοράς θα πρέπει το μέγεθος των χωματουργικών οχημάτων να είναι τέτοιο ώστε ο χρόνος φόρτωσης να κυμαίνεται από 2 – 6 min. Έχει επίσης την δυνατότητα να εξορύσσει το πέτρωμα στο βάθος που θα του ορίσει ο χειριστής με ακρίβεια.

9.6. Διαγράμματα λειτουργίας του Surface Miner

Στην αριστερή μεριά του σχήματος 9.7 φαίνονται τα πετρώματα που συναντώνται συνήθως στη φύση. Ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων κρίνεται αν ένα πέτρωμα μπορεί να εξορυχθεί. Αντίστοιχα, στο σχήμα 9.8 κρίνεται αν είναι οικονομικά συμφέρουσα η εξόρυξη του, ανάλογα με την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη. Διαπιστώνουμε ότι ο ασβεστόλιθος περιοχής Τριπόλεως που εξετάζουμε είναι εξορύξιμος και είναι συμφέρουσα μέθοδος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που δεν μπορούν να αναλυθούν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, όπως είναι ο προσδιορισμός των ασυνέχειων, το εντατικό πεδίο κ.ά.



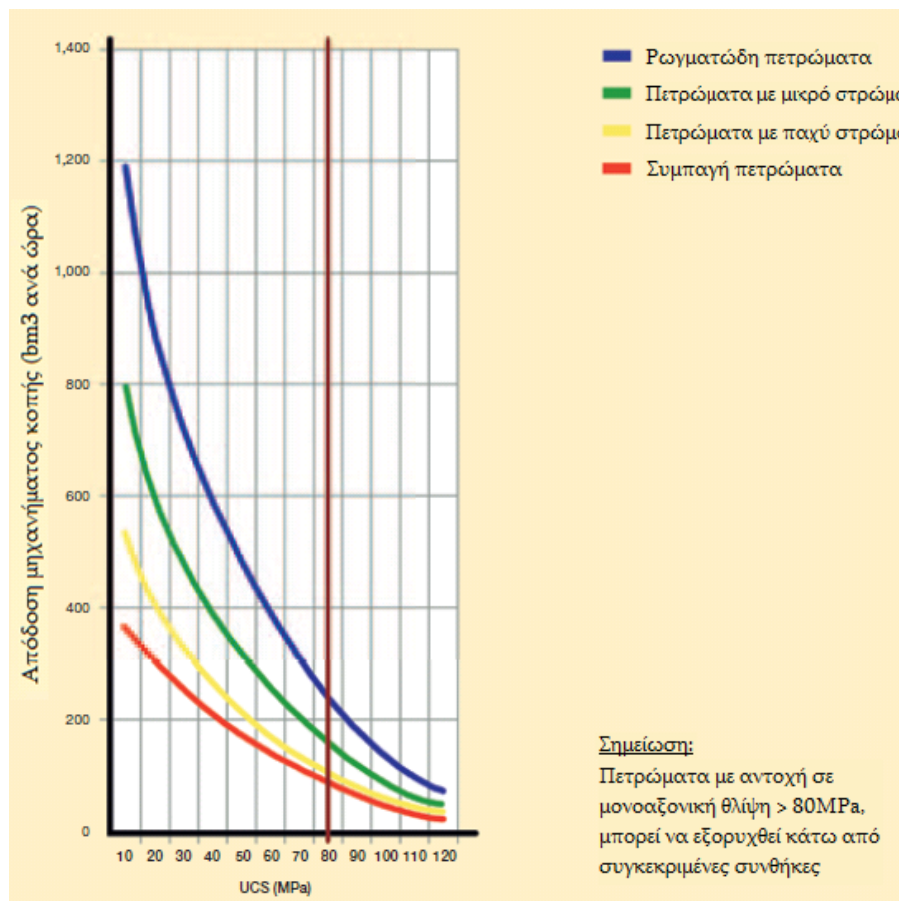
Σχήμα 9.7. Δυνατότητα εξόρυξης πετρωμάτων ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων



Σχήμα 9.8. Σχέση οικονομικότητας και αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

9.7. Παραγωγική ικανότητα της μεθόδου

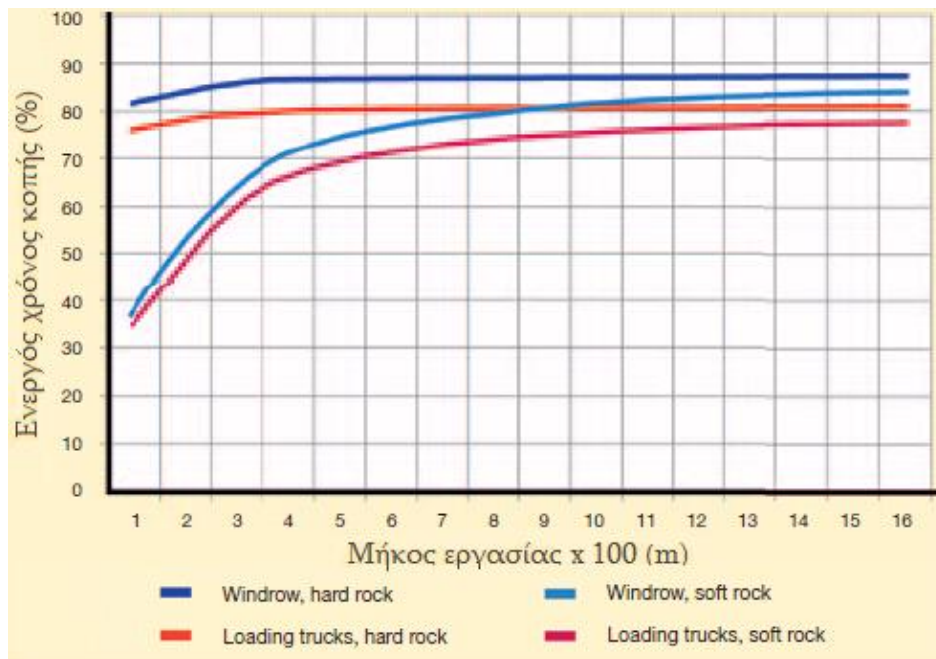
Η μέθοδος εξόρυξης του ασβεστόλιθου με το Surface Miner έχει αποδειχτεί αρκετά αποτελεσματική όσον αφορά την επίδοση του, όταν βέβαια επικρατούν οι απαιτούμενες συνθήκες εργασίας. Στο σχήμα 9.9 δίνεται η απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος.



Σχήμα 9.9. Απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος

Με την βοήθεια του σχήματος 9.9 που αναφέρεται σε Surface Miner τύπου 2500 SM μπορούμε να δώσουμε μια τάξη μεγέθους της απόδοσης του για συμπαγή πετρώματα. Αυτή είναι από 50 – 100 bm³ ανά ώρα.

Η παραγωγικότητα της μεθόδου είναι άμεσα εξαρτώμενη από την τοπογραφική διαμόρφωση του δαπέδου εκσκαφής καθώς και από την κλίση του κοιτάσματος όπως φαίνεται στο σχήμα 9.10. Είναι προφανές ότι όταν δεν απαιτείται συχνή αλλαγή της θέσης του μηχανήματος η παραγωγικότητα είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 9.10. Διάγραμμα ενεργού χρόνου κοπής συνάρτηση του μήκους εργασίας

Τέλος, επισημαίνεται ότι παρόλο που η παραγωγική ικανότητα της μεθόδου αυτής είναι μικρότερη σε σύγκριση με την εξόρυξη με εκρηκτικά, έχει το πλεονέκτημα ότι το μέγεθος του εξορυγμένου υλικού είναι πολύ πιο μικρό από εκείνο που επιτυγχάνεται με τις εκρηκτικές ύλες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί σημαντικά η απόδοση του δευτερογενούς θραυστήρα και οι ώρες λειτουργίας του. Επιπλέον δεν χρειάζεται πρωτογενής θραύση που πιθανόν να είχαμε αν χρησιμοποιούσαμε εκρηκτικά.

9.8. Τεχνικά προβλήματα από την χρήση του Surface Miner

Κάθε μέθοδος που χρησιμοποιείται στην μεταλλευτική έχει τα πλεονεκτήματά της αλλά και τα μειονεκτήματά της.

Η μέθοδος εξόρυξης ασβεστόλιθου με μηχανικά μέσα και συγκεκριμένα με την χρήση του Surface Miner έχει ορισμένα τεχνικά προβλήματα, τα οποία όμως δεν είναι προβλήματα που προκαλεί το ίδιο το μηχάνημα, αλλά προβλήματα που προέρχονται από άλλους παράγοντες και επηρεάζουν την δυναμικότητα και την χρήση του μηχανήματος.

Τα τεχνικά προβλήματα είναι τα εξής:

1. Ο βοηθός χειριστής. Είναι ο άνθρωπος που βρίσκεται στο πίσω δεξιό ή αριστερό μέρος του μηχανήματος χωρίς να έχει καμία προστασία τόσο κατά την καλοκαιρινή περίοδο όπου η θερμοκρασία ανέρχεται στους 40 °C όσο και κατά την χειμερινή περίοδο όπου βρίσκεται εκτεθειμένος στο κρύο και στην βροχή. Επίσης ο βοηθός χειριστής βρίσκεται συνεχώς κάτω από συνθήκες που μπορούν να γίνουν επικίνδυνες. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι όταν ο βοηθός προσπαθεί να ξεσφηνώσει κάποια πέτρα από τα κοπτικά εργαλεία.

2. Η γωνία κλίσης του κοιτάσματος. Η γωνία κλίσης του κοιτάσματος δεν πρέπει να είναι μεγάλη γιατί το μηχάνημα δεν εφαρμόζεται σε τέτοιες περιπτώσεις.

3. Η τοπογραφική διαμόρφωση της υπό εξόρυξης περιοχής. Το μηχάνημα αυτό για να μπορεί να αξιοποιηθεί αλλά και να έχει αυξημένη δυναμικότητα και παραγωγικότητα, πρέπει η τοπογραφική διαμόρφωση της υπό εξόρυξης περιοχής να έχει μεγάλο μήκος και πλάτος και η κλίση να μην ξεπερνάει το 2 %.

9.9. Περιβαλλοντικά προβλήματα

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την χρήση Surface Miner είναι πολύ λίγα και πολύ μικρά σε μέγεθος.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι τα εξής:

1. Προβλήματα σκόνης. Τα προβλήματα σκόνης δημιουργούνται κατά την διάρκεια της κοπής και της φόρτωσης του πετρώματος. Η διαβροχή του εξορυγμένου πετρώματος με ψεκασμό νερού από ακροφύσια που βρίσκονται επί του μηχανήματος, μειώνει σημαντικά το πρόβλημα της σκόνης, καθώς επίσης και η διαβροχή του τμήματος του δαπέδου που εξορύσσεται πριν την κοπή του.

2. Πρόβλημα θορύβου. Ο θόρυβος είναι ένα αναπόφευκτο πρόβλημα που δημιουργείται κατά την λειτουργία τόσο του Surface Miner όσο και από την λειτουργία όλων των άλλων μηχανημάτων που εμπλέκονται στην διαδικασία εξόρυξης – φόρτωσης – μεταφοράς.

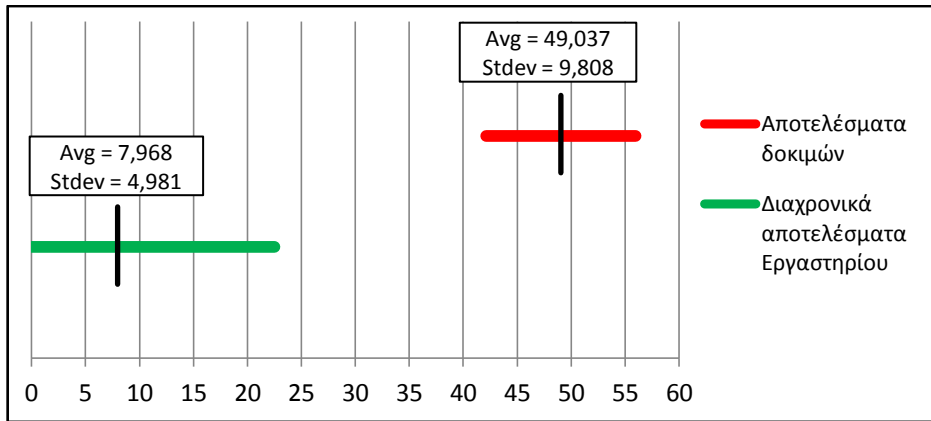
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

10.1. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα διαχρονικά αποτελέσματα του Εργαστηρίου

Στην ενότητα που ακολουθεί αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις εργαστηριακές δοκιμές και συγκρίνονται με τα διαχρονικά αποτελέσματα των δοκιμών ασβεστόλιθων του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων. Στον πίνακα 10.1 που βρίσκεται στο τέλος του κεφαλαίου είναι όλα τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμών του ασβεστόλιθου περιοχής Τριπόλεως που εξετάζουμε. Στον πίνακα 10.2 είναι τα διαχρονικά αποτελέσματα των δοκιμών ασβεστόλιθου.

➤ Δοκιμή κοπής

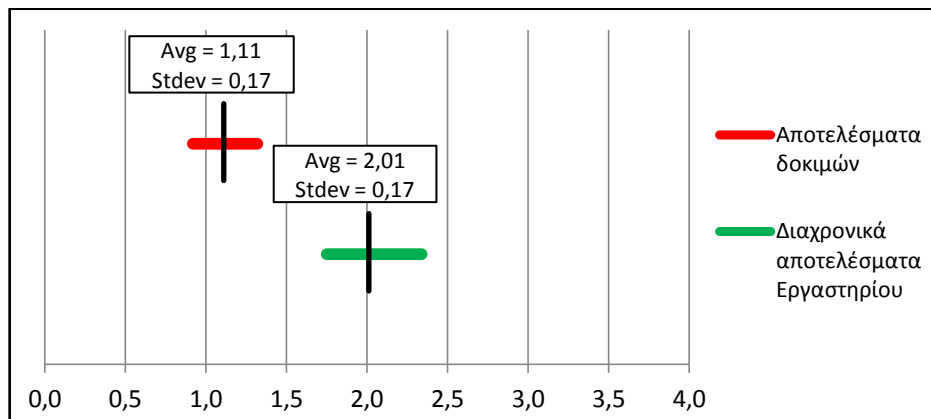
Στα δοκίμια ασβεστόλιθου η μέση τιμή του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής υπολογίστηκε 49 MJ/m^3 . Η συμπεριφορά τους στην κοπή χαρακτηρίζεται ψαθυρή με εμφανή τα διακριτά στάδια φόρτισης-αστοχίας του πετρώματος. Η επιφάνεια κοπής φέρει το χαρακτηριστικό ανάγλυφο που προκύπτει από την εφελκυστική τάση του πετρώματος όπως ακριβώς προβλέπεται από την θεωρία αστοχίας των πετρωμάτων του Nishimatsu. Παρατηρείται ασυνεχής αλλά περιοδική δημιουργία θραυσμάτων με μέγεθος όσο περίπου το μήκος μετατόπισης του κοπτικού που αντιστοιχεί στο στάδιο φόρτισης-αστοχίας. Η δύναμη κοπής ήταν σε υψηλά επίπεδα. Συμπεραίνουμε ότι απαιτείται μεγάλη ειδική ενέργεια εκσκαφής για την εξόρυξη ενός πεπερασμένου όγκου πετρώματος σε σχέση με τα πετρώματα που έχουν μελετηθεί στο Εργαστήριο.



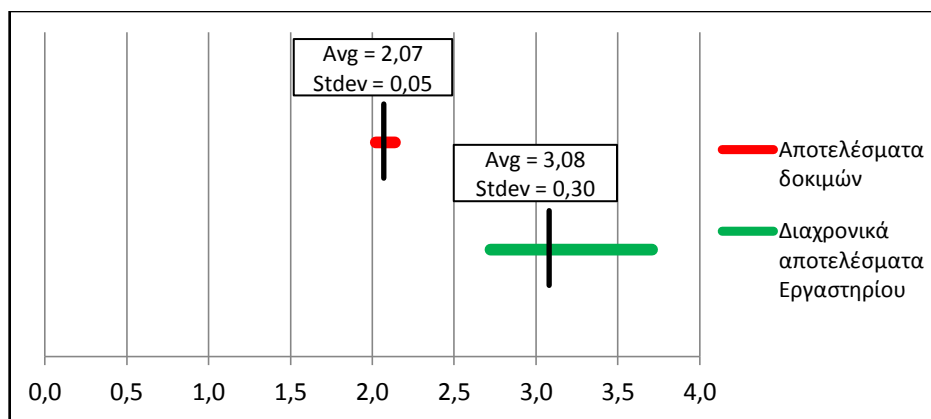
Σχήμα 10.1. Ειδική ενέργεια εκσκαφής (MJ/m^3)

➤ Δοκιμή Cerchar

Το πέτρωμα μας έχει χαρακτηριστεί μετρίως φθοροποιό και έχει γενικά μικρότερη φθοροποιό ικανότητα σε σχέση με τα διαχρονικά αποτελέσματα του Εργαστηρίου τόσο με τις ακίδες σκληρότητας 55 όσο και με τις 40.



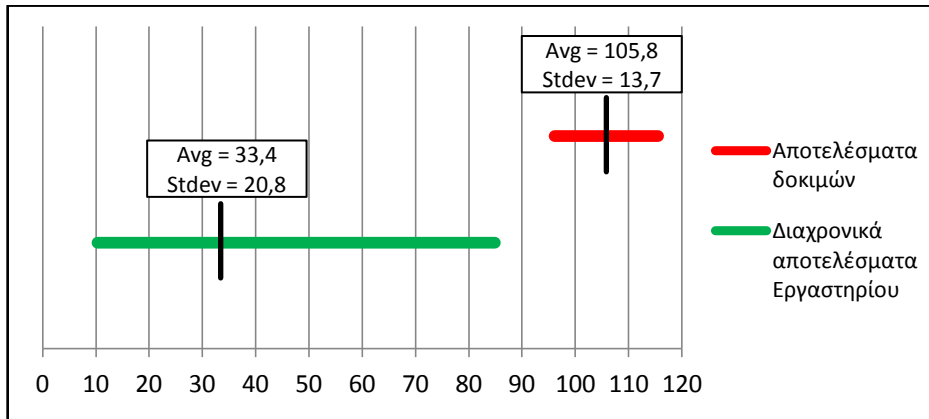
Σχήμα 10.2. Φθοροποιός ικανότητα για ακίδες σκληρότητας 55



Σχήμα 10.3. Φθοροποιός ικανότητα για ακίδες σκληρότητας 40

➤ Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

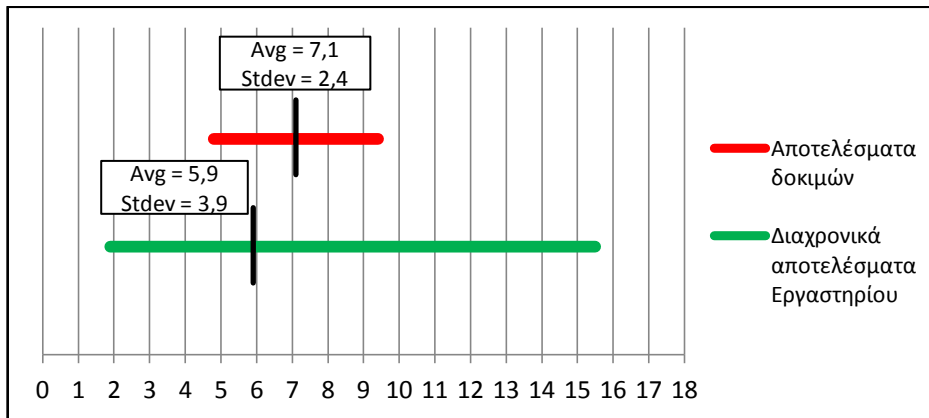
Η μέση αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ασβεστόλιθου που μελετάται είναι 105,8 MPa. Είναι αρκετά υψηλή και συγκρίνεται με το ιστορικό των δοκιμών στο σχήμα 10.4.



Σχήμα 10.4. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)

➤ Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

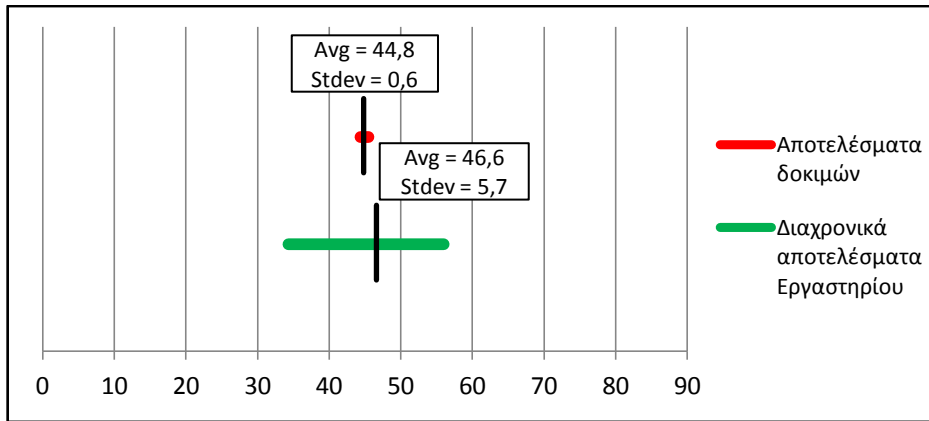
Η μέση αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη είναι 7,07 MPa. Ακολουθεί τη μέση τιμή των πετρωμάτων που έχουν μελετηθεί στο Εργαστήριο.



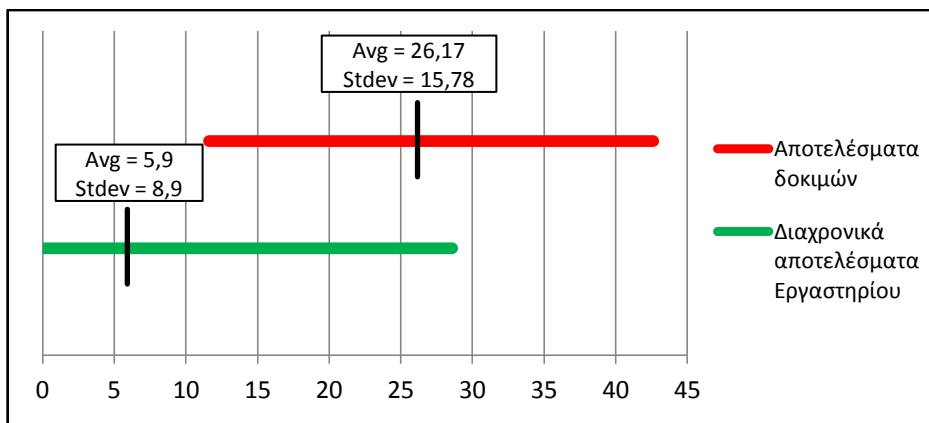
Σχήμα 10.5. Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (MPa)

➤ Προσδιορισμός σκληρότητας Shore

Η μέση σκληρότητα είναι 44,8 και χαρακτηρίζεται ως μέτριας σκληρότητας πέτρωμα όπως και τα περισσότερα πετρώματα του Εργαστηρίου. Ο συντελεστής πλαστικότητας κυμαίνεται από 2,5% έως 23,44% και χαρακτηρίζεται ως ψαθυρό.



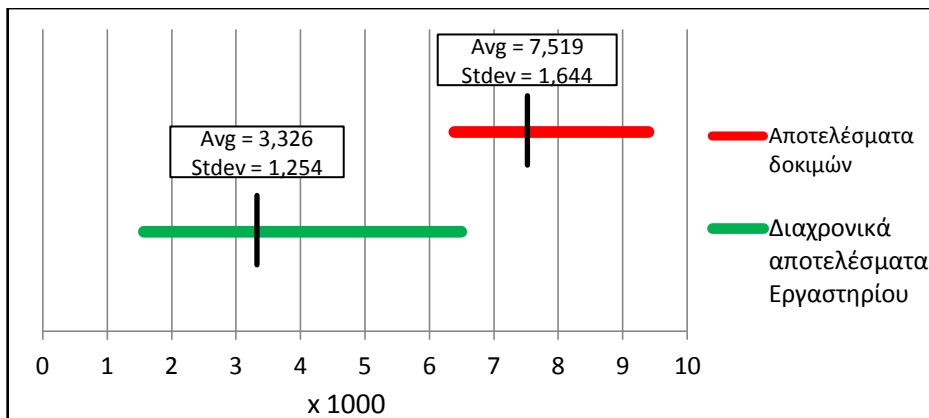
Σχήμα 10.6. Σκληρότητα Shore



Σχήμα 10.7. Δείκτης πλαστικότητας Shore

➤ Δοκιμή ταχύτητας υπερήχων

Η διαμήκης ταχύτητα των υπέρηχων κυμάτων έχει μέση τιμή 7519 m/s. Είναι σχεδόν διπλάσια από τη μέση τιμή των δοκιμών ασβεστόλιθου του Εργαστηρίου. Αυτό σημαίνει ότι είναι συμπαγές πέτρωμα χωρίς πολλές ασυνέχειες.

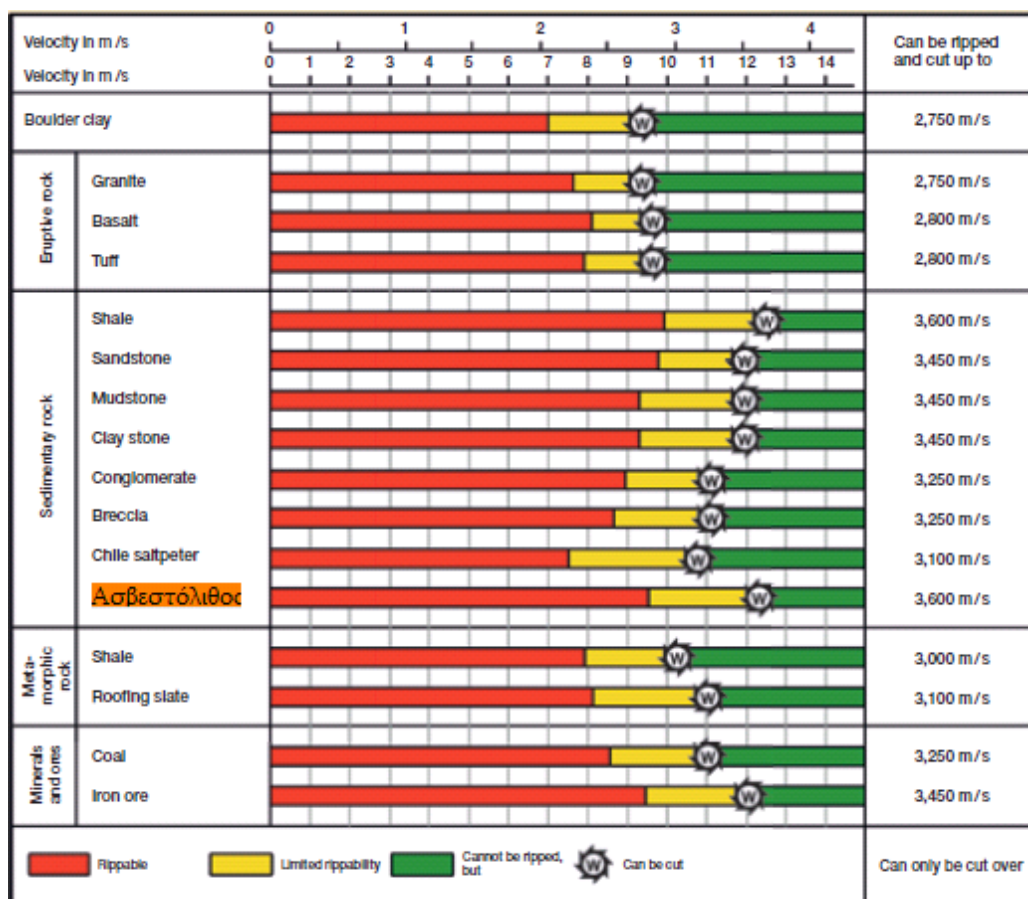


Σχήμα 10.8. Διαμήκης ταχύτητα V_p (m/sec)

10.2. Διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστόλιθου περιοχής Τριπόλεως

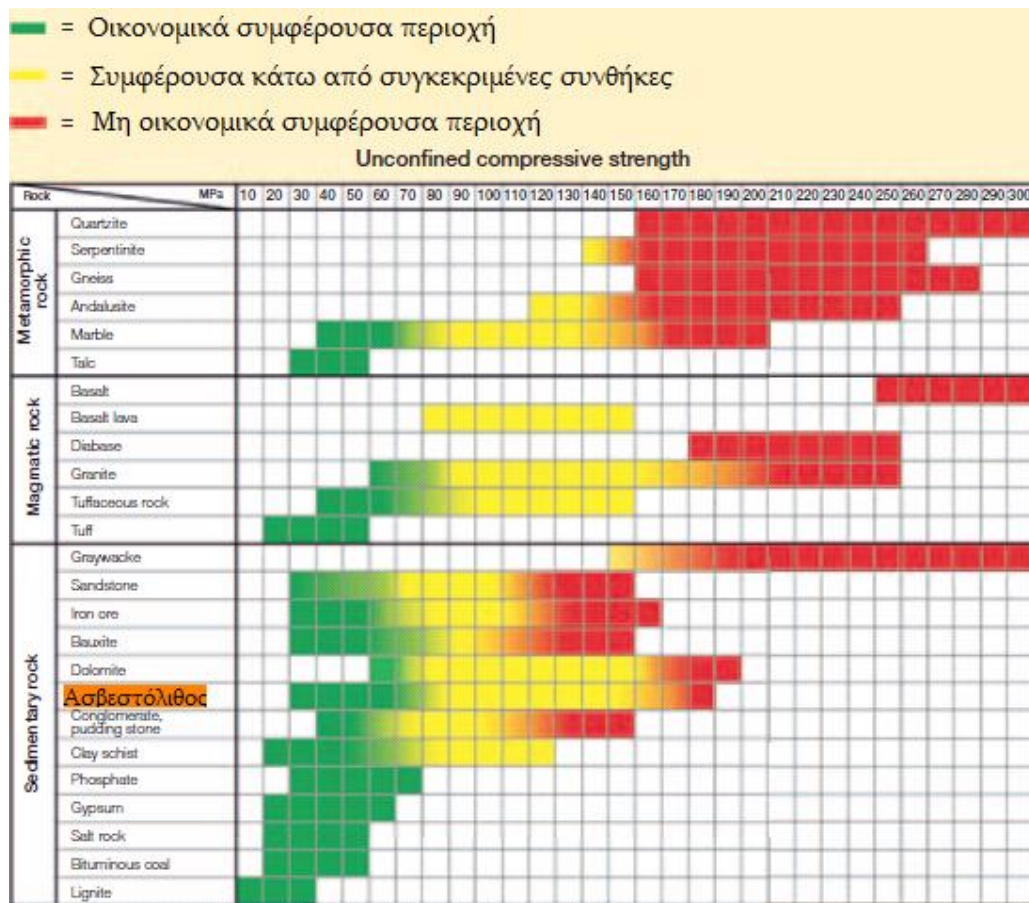
Έπειτα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών περνάμε στο πιο σημαντικό κομμάτι αυτής της διπλωματικής που είναι η διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστόλιθου περιοχής Τριπόλεως με το Surface Miner και συγκεκριμένα με τον τύπο 2500 SM. Μέσα από τα διαγράμματα του ομίλου της Wirtgen θα διαπιστώσουμε αν υπάρχει δυνατότητα εξόρυξης του και αν ναι, να εκτιμήσουμε την σχέση οικονομικότητας και την απόδοση του μηχανήματος.

Από το σχήμα 10.9 διαπιστώνουμε ότι ο ασβεστόλιθος περιοχής Τριπόλεως που εξετάζουμε μπορεί να εξορυχθεί με το Surface Miner.



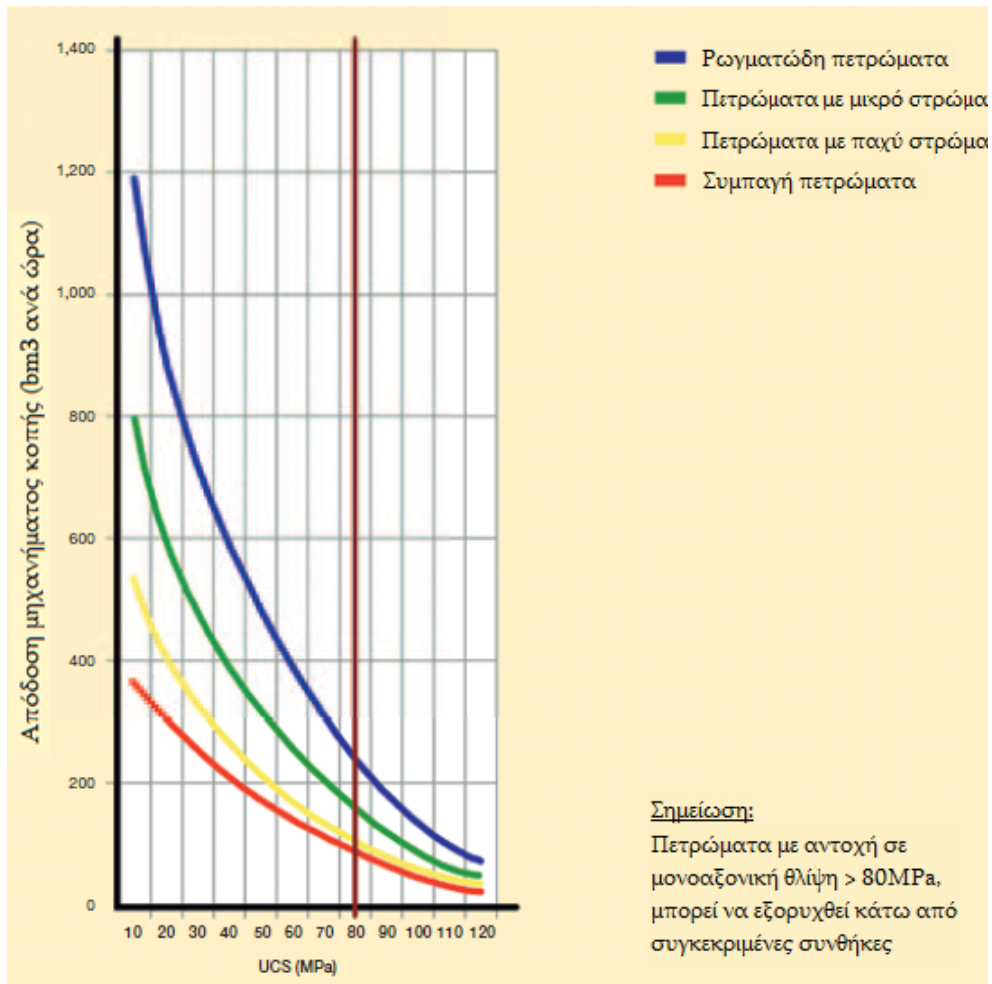
Σχήμα 10.9. Δυνατότητα εξόρυξης πετρωμάτων ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων

Έπειτα, από το σχήμα 10.10 συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος αυτή είναι συμφέρουσα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που δεν μπορούν να αναλυθούν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, όπως είναι ο προσδιορισμός των ασυνέχειων, το εντατικό πεδίο κ.ά.



Σχήμα 10.10. Σχέση οικονομικότητας και αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

Τέλος, με την βοήθεια του σχήματος 10.11 που αναφέρεται σε Surface Miner τύπου 2500 SM μπορούμε να δώσουμε μια τάξη μεγέθους της απόδοσης του για συμπαγή πετρώματα. Αυτή κυμαίνεται από 50 – 100 bm^3 ανά ώρα.



Σχήμα 10.11. Απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος

Πίνακας 10.1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών

	A/A	Κωδικός	Διάμετρος	Μήκος	L/D	Μάζα	Πυκνότητα	Ειδική ενέργεια εκσκαφής	Συντελεστής κοπής	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	Εφαπτομενικό μέτρο Ελαστικότητας	Εφαπτομενικός λόγος Poisson	Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη	Ταχύτητα V _r	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας	Σκληρότητα Shore	Δείκτης πλαστικότητας Shore	CERCHAR 55	CERCHAR 40
			(mm)	(mm)	(—)	(kg)	(kg/m ³)	(MJ/m ³)	(—)	(MPa)	(GPa)	(—)	(MPa)	(m/s)	(GPa)	(—)	(%)	(—)	(—)
Count	10		10	10	10	10	10	2	2	2	2	2	4	3	3	3	3	5	5
Min			53,95				2589,2	42,102	0,526	96,1	50,0	0,429	4,8	6383	13,7	44,4	11,16	0,92	2,02
95% CI of the mean			0,0				17,2	13,592	0,030	19,0	35,0	0,069	2,4	1860	13,7	0,7	17,86	0,15	0,04
Avg			54,01				2640,6	49,037	0,542	105,8	67,9	0,464	7,1	7519	25,9	44,8	26,17	1,11	2,07
StDev			0,03				27,7	9,808	0,022	13,7	25,3	0,049	2,4	1644	12,1	0,6	15,78	0,17	0,05
Max			54,06				2688,5	55,972	0,557	115,5	85,7	0,499	9,4	9404	38,0	45,5	42,63	1,32	2,14
1		Ta_01	54,00	140,37	2,60	0,852	2650,3			115,5	85,7	0,429		6383	38,0	45,5	42,63		
2		Ta_02	54,02	138,64	2,57	0,842	2650,3			96,1	50,0	0,499		9404	13,7	44,6	11,16		
3		Ta_03	54,02	150,34	2,78	0,908	2635,1							6769	26,1	44,4	24,73		
4		Ta_04	53,97	102,10	1,89	0,628	2688,5	42,102	0,526										
5		Ta_05	53,95	124,09	2,30	0,757	2669,1	55,972	0,557										
6		Tb_01 bts_01	54,06	28,61	0,53	0,170	2589,2						9,4					1,32	2,04
7		Tb_02 bts_01	53,99	27,76	0,51	0,167	2628,0						5,2					0,99	2,14
		Tb_02 bts_02	54,05	28,96	0,54	0,176	2648,5						8,9						
8		Tb_03 bts_01	54,02	27,37	0,51	0,164	2615,3						4,8					1,07	2,07
		Tb_03 bts_02	54,00	28,71	0,53	0,173	2632,0												
9		Tb_04																1,27	2,02
10		Tb_05																0,92	2,06

Πίνακας 10.2. Συγκεντρωτικός πίνακας διαχρονικών αποτελεσμάτων Εργαστηρίου

	A/A	Διάμετρος	Πυκνότητα	Ειδική ενέργεια εκσκαφής	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	Εφαπτομενικό μέτρο Ελαστικότητας	Εφαπτομενικός λόγος Poisson	Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη	Ταχύτητα Vp	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας	Σκληρότητα Shore	Δείκτης πλαστικότητας Shore	CERCHAR 55	CERCHAR 40
		(mm)	(kg/m ³)	(MJ/m ³)	(MPa)	(GPa)	(—)	(MPa)	(m/s)	(GPa)	(—)	(%)	(—)	(—)
Count	74	42	42	36	14	11	9	18	20	20	25	24	10	9
Min		54,58	#####	0,010	10,3	37,9	0,250	1,9	1570	4,9	34,3	0,02	1,75	2,72
95% CI of the mean		0,1	18,8	1,627	10,9	6,3	0,077	1,8	550	52,5	2,2	3,55	0,11	0,19
Avg		54,88	#####	7,968	33,4	63,9	0,360	5,9	3326	77,9	46,6	5,85	2,01	3,08
StDev		0,18	62,2	4,981	20,8	10,7	0,117	3,9	1254	119,8	5,7	8,88	0,17	0,30
Max		55,21	#####	22,522	84,9	77,1	0,650	15,5	6497	472,7	56,0	28,57	2,34	3,71

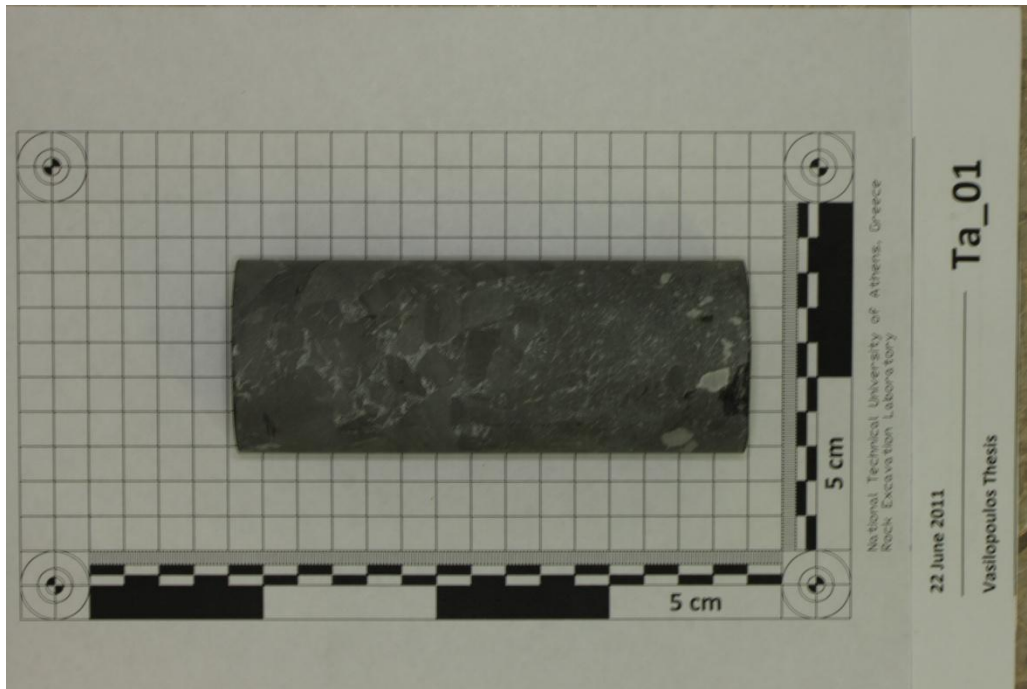
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1979), Vol.16, No.2, pp.137-140
2. Engineering Geology (1970), Vol.4, No.3, pp.177-285
3. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1978), Vol.15, No.3, pp.99-103
4. Rock Mechanics and Rock Engineering (1990), Vol.15, No.3, pp.99-103
5. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (2005), Vol.42, No.1, pp.153-160
6. Rock Mechanics and Rock Engineering (2002), Vol.35, No.2, pp.109-113
7. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1989), Vol.26, No.2, pp.151-160
8. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (2003), Vol.40, No.2, pp.259-263
9. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1978), Vol.15, No.2, pp.53-58
10. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (2007), Vol.44, No.1, pp.1-13
11. F. Roxborough ISRM (1974), «Experimental Studies on the Excavation of Rock Using Picks»
12. Wirtgen Surface Mining Manual (2010), Applications and Planning Guide
13. Σ. Αγαλιανιώτου, Κ. Κακλής και Ζ. Αγιουτάντης (Πανεπιστήμιο Κρήτης 2011), «Εκτίμηση Ανισοτροπίας Ασβεστολιθικών Πετρωμάτων με βάση την Ταχύτητα Διάδοσης Διαμήκων Κυμάτων»

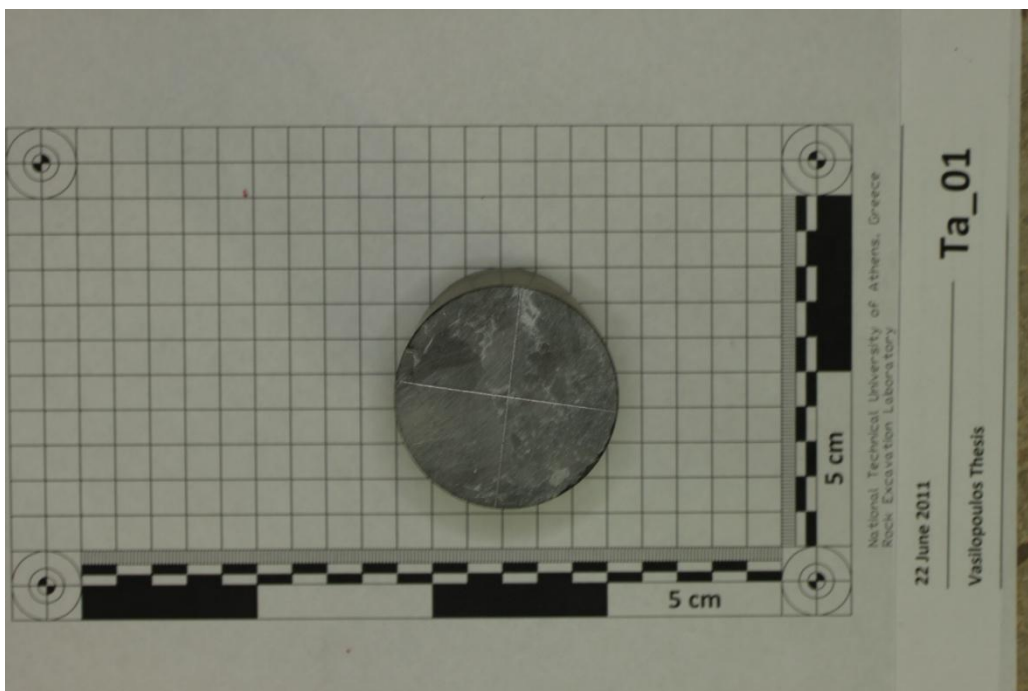
14. Χ. Τσουτρέλης (Αθήνα 1985), «Στοιχεία μηχανικής πετρωμάτων», Μέρος Ι, Βασικά θεωρητικά στοιχεία και πειραματικοί μέθοδοι
15. Χ. Τσουτρέλης, Ν. Γκίκας και Π. Νομικός (Αθήνα 2000), «Εργαστηριακές ασκήσεις Μηχανικής Πετρωμάτων»
16. Γ. Κούκης, και Ν. Σαμπατάκης (Αθήνα 2002), «Τεχνική Γεωλογία»
17. Γ. Κούκης και Ν. Σαμπατάκης (Αθήνα 2007), «Γεωλογία Τεχνικών Έργων»
18. Α. Σοφιανός (Αθήνα 2005), «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων», Σημειώσεις Πανεπιστημιακών Παραδόσεων ΕΜΠ
19. Γ. Παναγιώτου (Αθήνα 2003), «Μηχανική Εξόρυξη των Πετρωμάτων» Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος εξόρυξη πετρωμάτων ΙΙ.
20. Γ. Παναγιώτου και Θ. Μιχαλακόπουλος (Αθήνα 2007), «Συστήματα Φόρτωσης – Μεταφοράς και Μηχανικός Εξοπλισμός Μεταλλείων»
21. Β. Αναγνώστου (Αθήνα 2006), «Προσδιορισμός του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής ιζηματογενών πετρωμάτων», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία
22. Μ. Μενεγάκη (Αθήνα 2010), «Σχεδιασμός Υπαίθριων Εκμεταλλεύσεων»
23. Α. Μανουσάκη – Ορφανουδάκη (Αθήνα 2005), «Ορυκτολογία», Συστηματική Οπτική
24. Σημειώσεις του μαθήματος Εξόρυξης Ι (Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες), 7^ο εξάμηνο
25. Σημειώσεις του μαθήματος Εξόρυξης ΙΙ (Εξόρυξη με μηχανικά μέσα), 8^ο εξάμηνο
26. Ηλεκτρονική διεύθυνση www.wirtgen.com
27. Ηλεκτρονική διεύθυνση www.exorixi.gr
28. Ηλεκτρονική διεύθυνση www.latomet.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

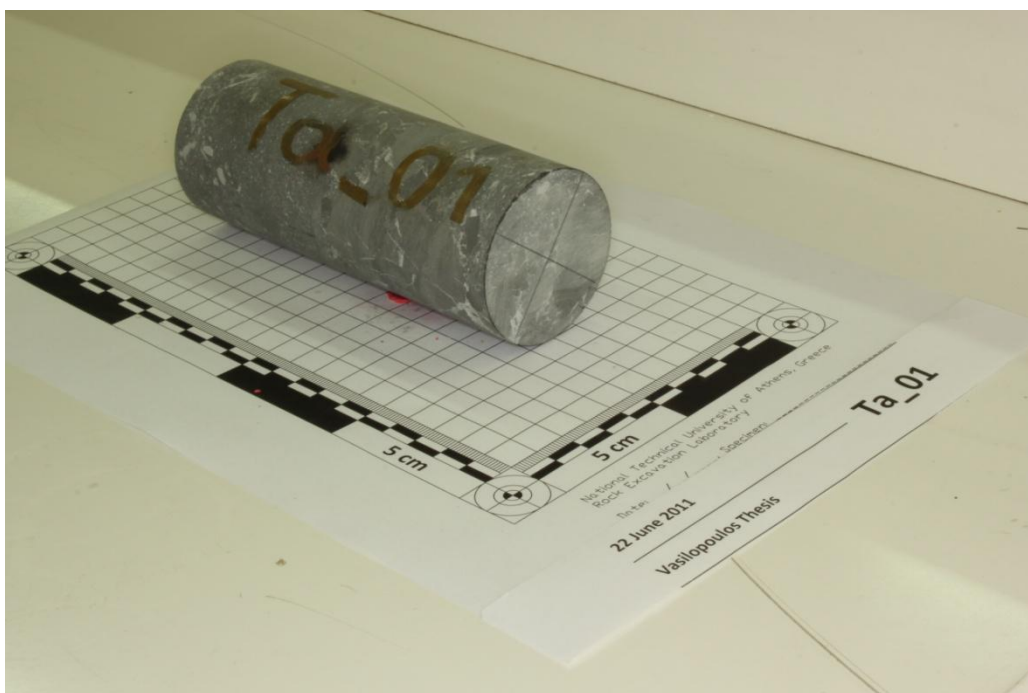
Δοκίμιο Ta_01



Φώτο Π.1.1. Κάτοψη δοκιμίου Ta_01 όπου είναι εμφανές το μήκος του



Φώτο Π.1.2. Κάτοψη δοκιμίου Ta_01 όπου είναι εμφανής η διάμετρος του

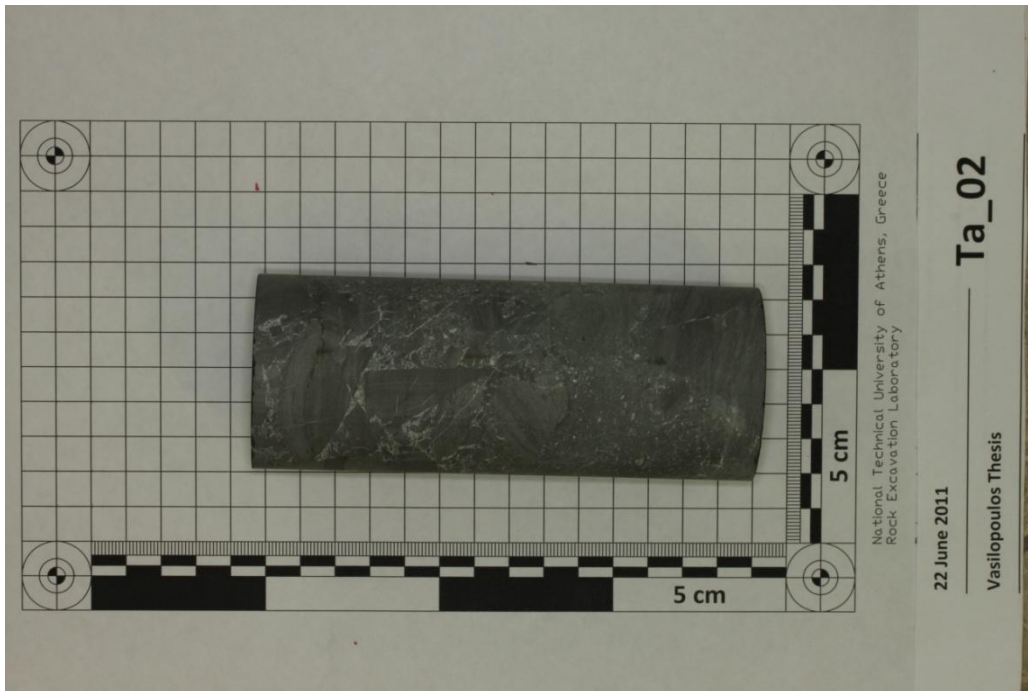


Φώτο Π.1.3. Πλευρική όψη δοκιμίου Ta_01

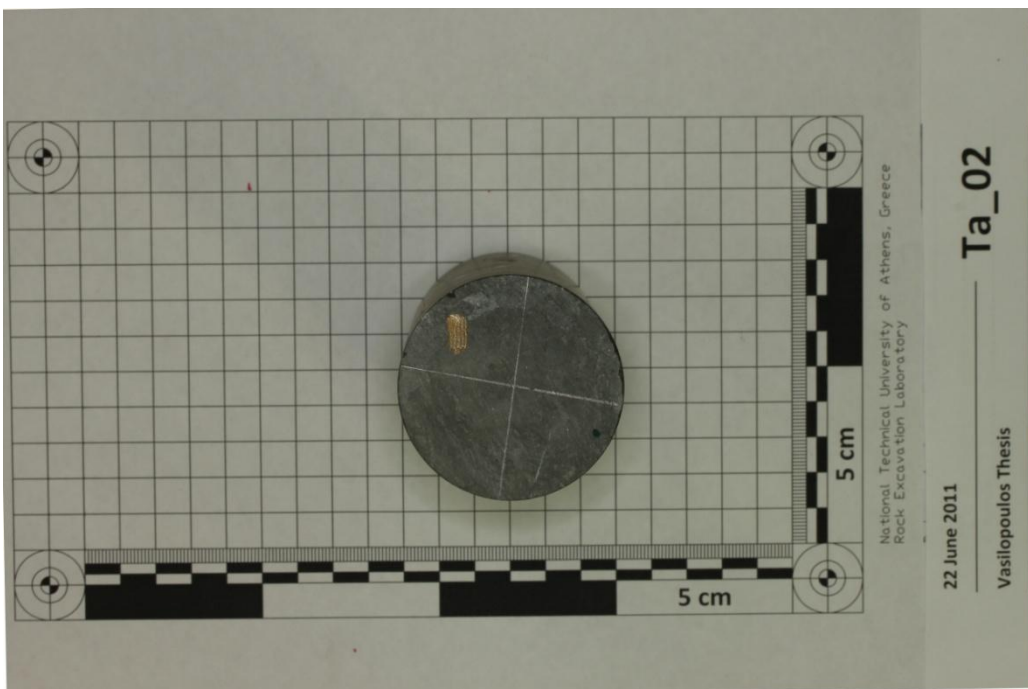


Φώτο Π.1.4. Λεπτομέρεια ορυκτών δοκιμίου Ta_01

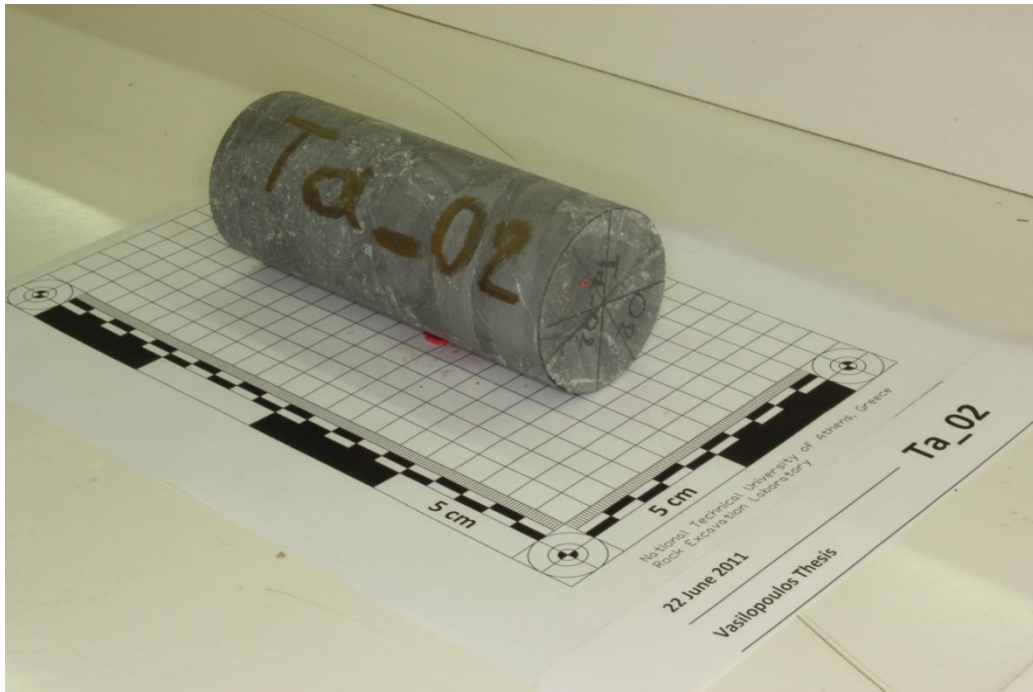
Δοκίμιο Ta_02



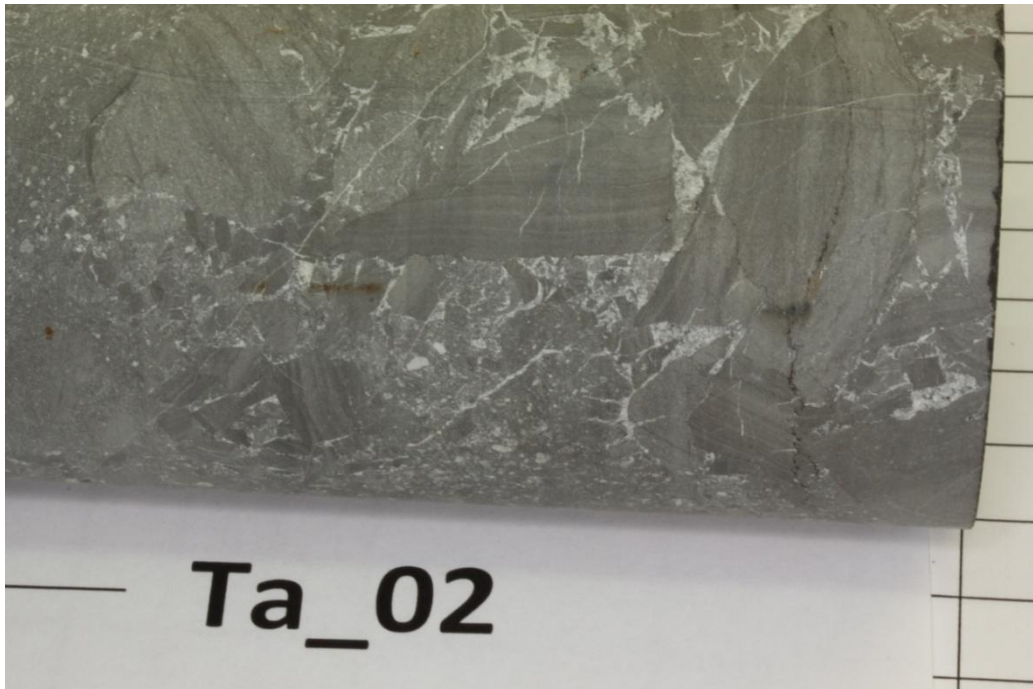
Φώτο Π.1.5. Κάτοψη δοκιμίου Ta_02 όπου είναι εμφανές το μήκος του



Φώτο Π.1.6. Κάτοψη δοκιμίου Ta_02 όπου είναι εμφανής η διάμετρος του

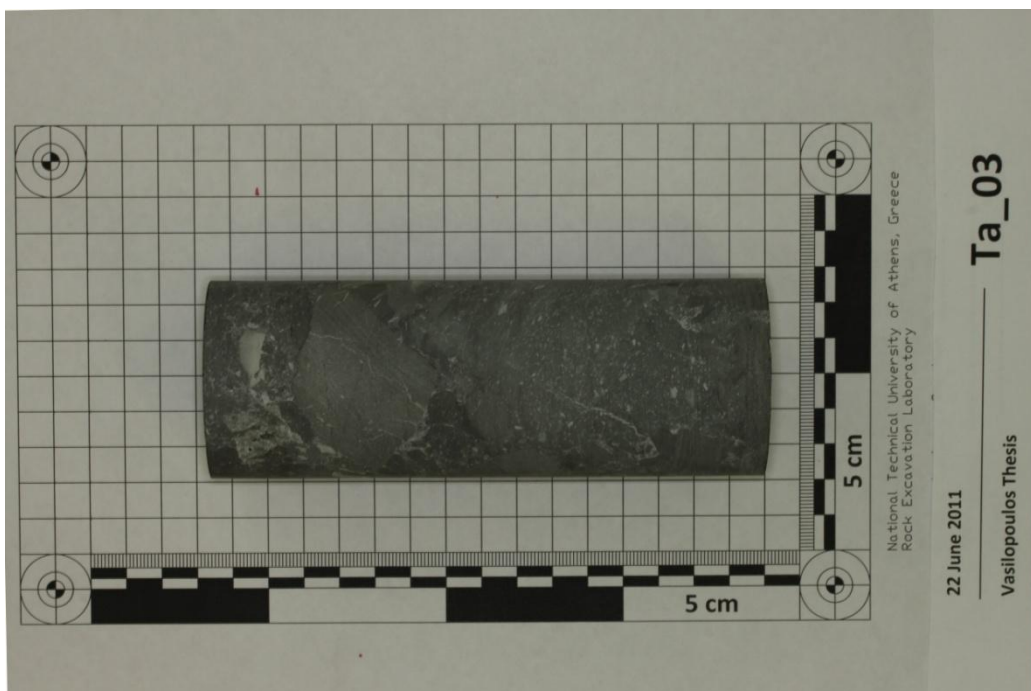


Φώτο Π.1.7. Πλευρική όψη δοκιμίου Ta_02

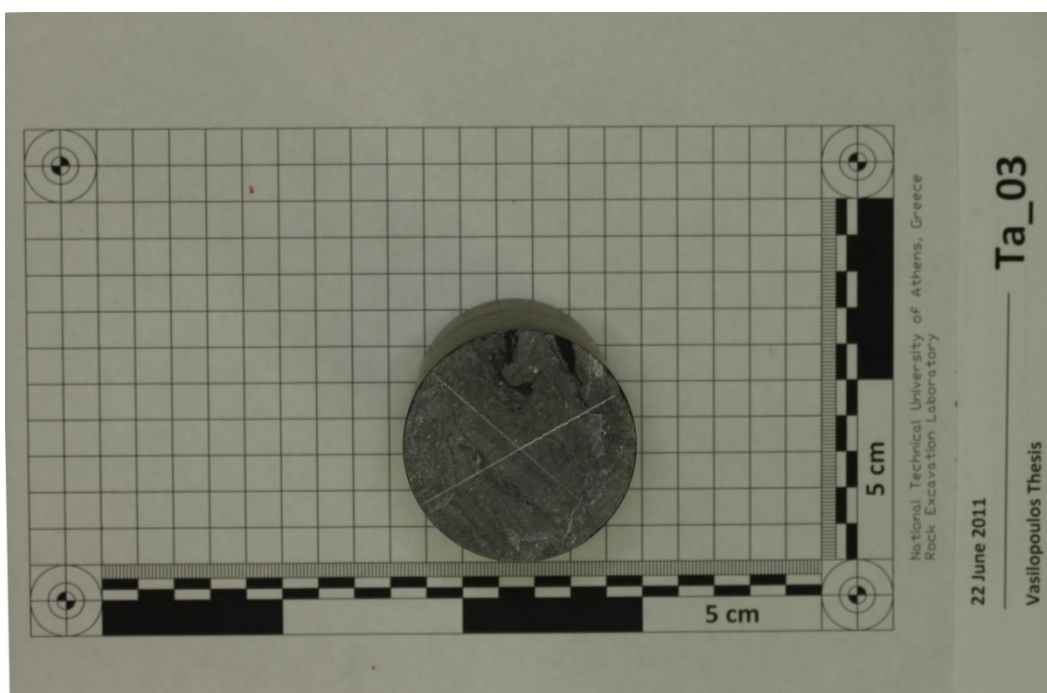


Φώτο Π.1.8. Λεπτομέρεια ορυκτών δοκιμίου Ta_02

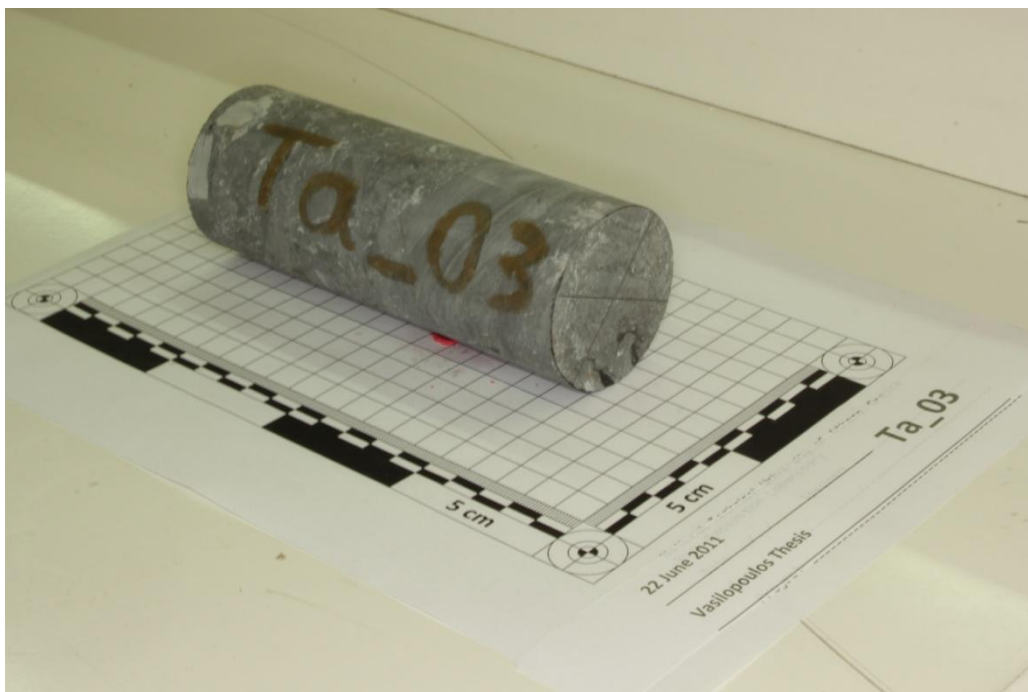
Δοκίμιο Ta_03



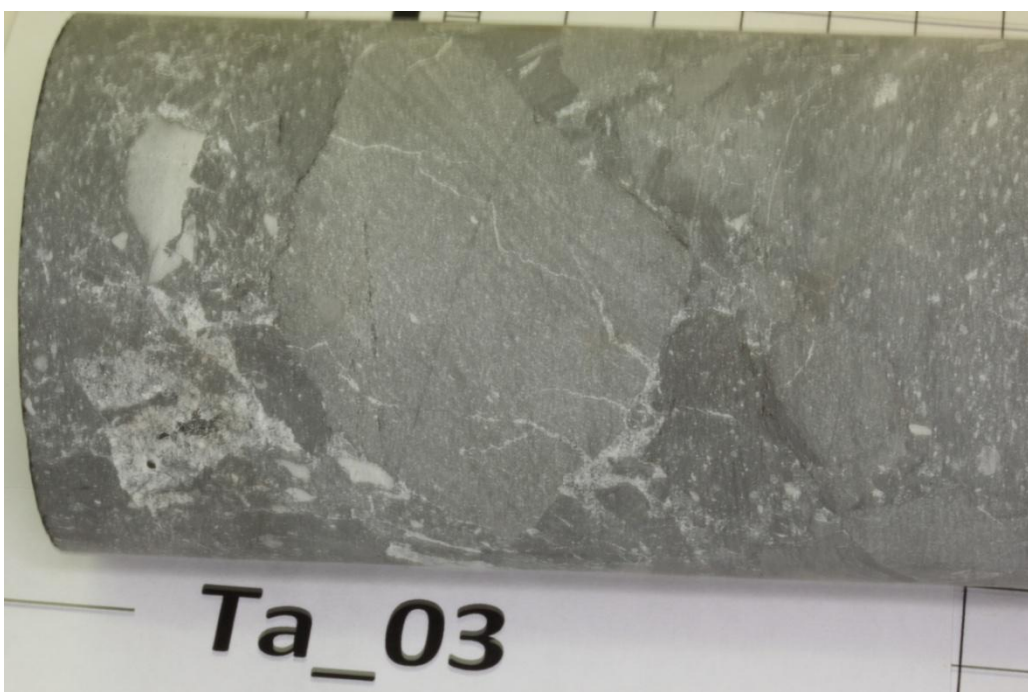
Φώτο Π.1.9. Κάτοψη δοκιμίου Ta_03 όπου είναι εμφανές το μήκος του



Φώτο Π.1.10. Κάτοψη δοκιμίου Ta_03 όπου είναι εμφανής η διάμετρος του

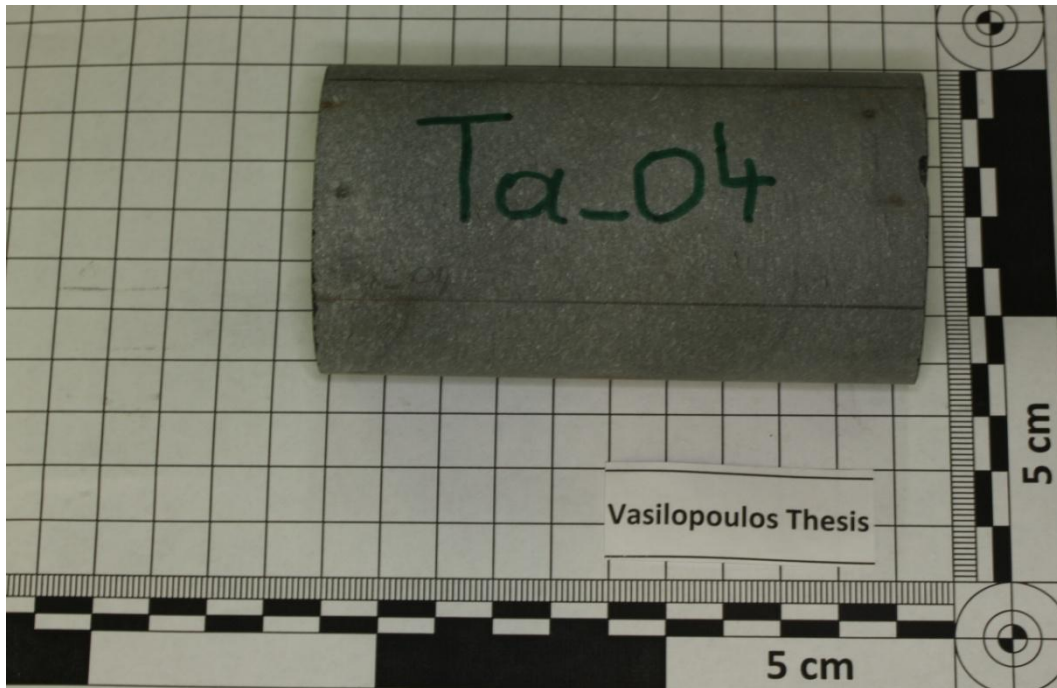


Φώτο Π.1.11. Πλευρική όψη δοκιμίου Ta_03



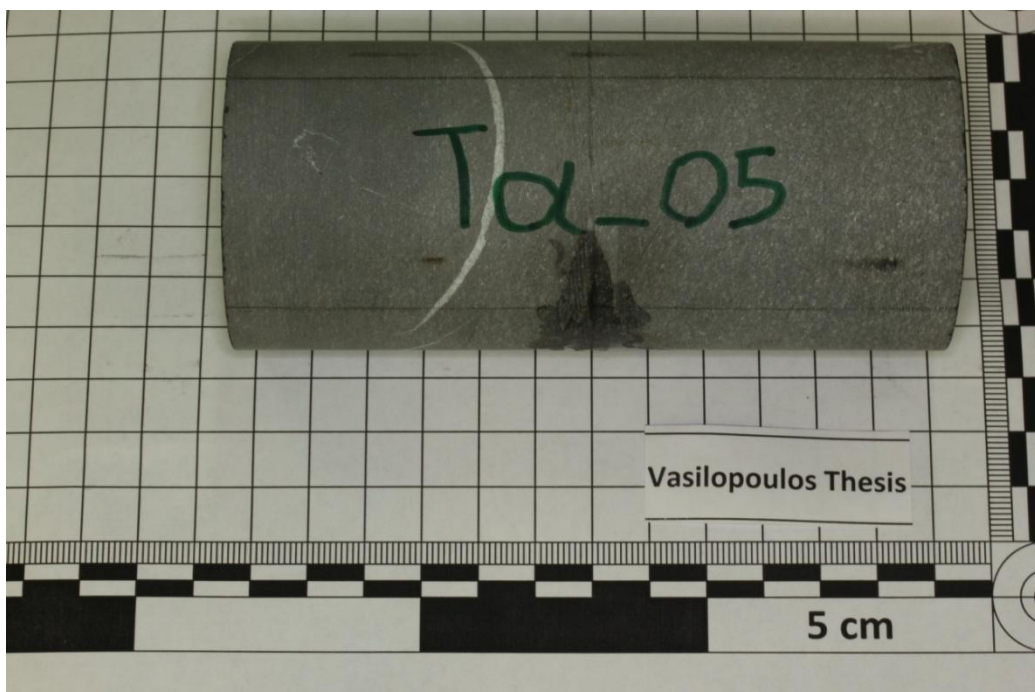
Φώτο Π.1.12. Λεπτομέρεια δοκιμίου Ta_03

Δοκίμιο Ta_04



Φώτο Π.1.13. Κάτοψη δοκιμίου Ta_04 όπου είναι εμφανές το μήκος του

Δοκίμιο Ta_05



Φώτο Π.1.14. Κάτοψη δοκιμίου Ta_05 όπου είναι εμφανές το μήκος του

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ CERCHAR

Οι μετρήσεις Cerchar και ο προσδιορισμός του δείκτη CAI

1. Οι δοκιμές Cerchar στα δοκίμια ασβεστόλιθου με ακίδες HRC 55.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις των δοκιμών Cerchar και ο προσδιορισμός των δεικτών CAI, με ακίδες σκληρότητας HRC 55.

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_01				Ημερομηνία Δοκιμής: 6/7/2011	
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)	
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)		
1	0,1009	0,1591	0,1300	1,30	
2	0,1326	0,1114	0,1220	1,22	
3	0,2121	0,1909	0,2015	2,02	
4	0,1168	0,1220	0,1194	1,19	
5	0,0636	0,1061	0,0849	0,85	
Μέση τιμή				1,32	
Τυπική Απόκλιση				0,43	

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_02				Ημερομηνία Δοκιμής: 6/7/2011	
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)	
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)		
1	0,1061	0,1008	0,1035	1,03	
2	0,1009	0,0955	0,0982	0,98	
3	0,0796	0,1167	0,0981	0,98	
4	0,0849	0,1167	0,1008	1,01	
5	0,1008	0,0903	0,0956	0,96	
Μέση τιμή				0,99	
Τυπική Απόκλιση				0,03	

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_03				Ημερομηνία Δοκιμής: 6/7/2011
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	0,1432	0,1220	0,1326	1,33
2	0,0692	0,0690	0,0691	0,69
3	0,0955	0,0955	0,0955	0,95
4	0,1221	0,1486	0,1354	1,35
5	0,0902	0,1167	0,1034	1,03
Μέση τιμή				1,07
Τυπική Απόκλιση				0,28

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_04				Ημερομηνία Δοκιμής: 6/7/2011
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	0,1584	0,1198	0,1391	1,39
2	0,1026	0,1154	0,1090	1,09
3	0,0855	0,1753	0,1304	1,30
4	0,1668	0,1326	0,1497	1,50
5	0,1069	0,1027	0,1048	1,05
Μέση τιμή				1,27
Τυπική Απόκλιση				0,19

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_05				Ημερομηνία Δοκιμής: 6/7/2011
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	0,1154	0,0983	0,1069	1,07
2	0,0898	0,1069	0,0983	0,98
3	0,0983	0,0941	0,0962	0,96
4	0,0814	0,0727	0,0770	0,77
5	0,0898	0,0684	0,0791	0,79
Μέση τιμή				0,92
Τυπική Απόκλιση				0,13

2. Οι δοκιμές Cerchar στα δοκίμια ασβεστόλιθου με ακίδες HRC 40.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις των δοκιμών Cerchar και ο προσδιορισμός των δεικτών CAI, με ακίδες σκληρότητας HRC 40.

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_01				Ημερομηνία Δοκιμής: 7/7/2011	
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)	
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)		
1	0,1625	0,1753	0,1689	1,69	
2	0,2266	0,1881	0,2074	2,07	
3	0,2095	0,2224	0,2160	2,16	
4	0,2565	0,1882	0,2224	2,22	
5	0,2010	0,2052	0,2031	2,03	
Μέση τιμή				2,04	
Τυπική Απόκλιση				0,21	

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_02				Ημερομηνία Δοκιμής: 7/7/2011	
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)	
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)		
1	0,1924	0,2010	0,1967	1,97	
2	0,2095	0,2052	0,2074	2,07	
3	0,1710	0,2052	0,1881	1,88	
4	0,2480	0,2437	0,2459	2,46	
5	0,2480	0,2181	0,2331	2,33	
Μέση τιμή				2,14	
Τυπική Απόκλιση				0,24	

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_03				Ημερομηνία Δοκιμής: 7/7/2011
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	0,2138	0,1881	0,2010	2,01
2	0,1839	0,2394	0,2117	2,12
3	0,2138	0,2052	0,2095	2,10
4	0,2095	0,1924	0,2010	2,01
5	0,2266	0,2010	0,2138	2,14
Μέση τιμή				2,07
Τυπική Απόκλιση				0,06

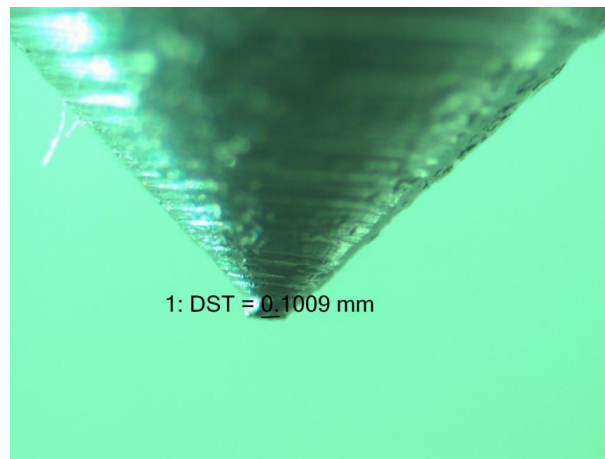
Κωδικός Δοκιμίου: Tb_04				Ημερομηνία Δοκιμής: 7/7/2011
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	0,1368	0,1839	0,1604	1,60
2	0,2480	0,2052	0,2266	2,27
3	0,1881	0,2352	0,2117	2,12
4	0,2138	0,2266	0,2202	2,20
5	0,1796	0,2052	0,1924	1,92
Μέση τιμή				2,02
Τυπική Απόκλιση				0,27

Κωδικός Δοκιμίου: Tb_05				Ημερομηνία Δοκιμής: 7/7/2011
A/A Χαραγής (scratch)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	0,2480	0,2053	0,2267	2,27
2	0,2010	0,1924	0,1967	1,97
3	0,1967	0,2052	0,2010	2,01
4	0,1753	0,2566	0,2160	2,16
5	0,1839	0,1967	0,1903	1,90
Μέση τιμή				2,06
Τυπική Απόκλιση				0,15

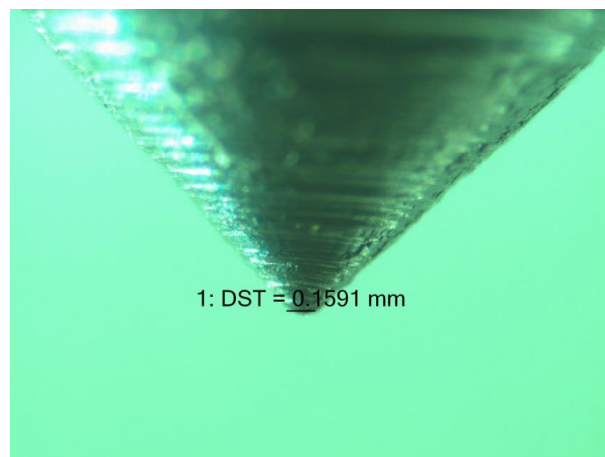
Φωτογραφίες των χαλύβδινων ακίδων έπειτα από τις δοκιμές Cerchar

Παρουσιάζονται ενδεικτικά οι φωτογραφίες των δυο πρώτων ακίδων σκληρότητας HRC 55 και 40, που χρησιμοποιήθηκαν στο δοκίμιο Tb_01. Οι φωτογραφίες είναι έτσι όπως εμφανίζονται από το μικροσκόπιο και πάνω σε αυτές είναι σημειωμένες οι διάμετροι.

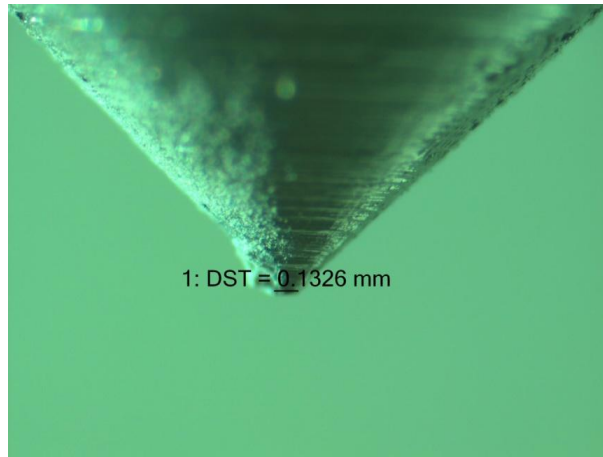
1. Ακίδες σκληρότητας HRC 55



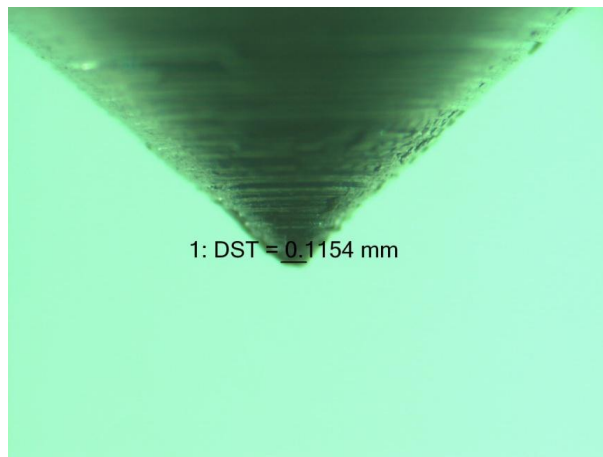
Φώτο Π.2.1. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1



Φώτο Π.2.2. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2

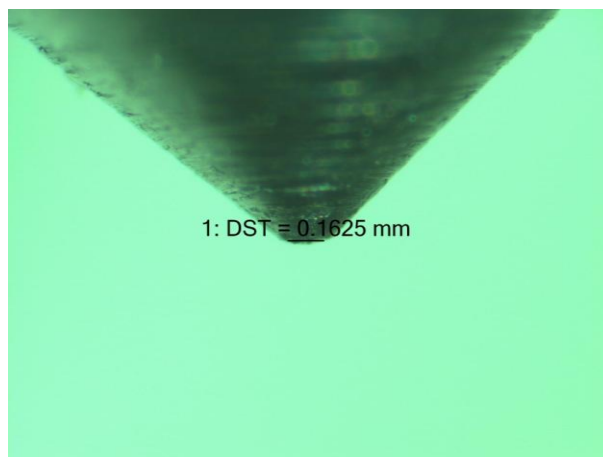


Φώτο Π.2.3. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1

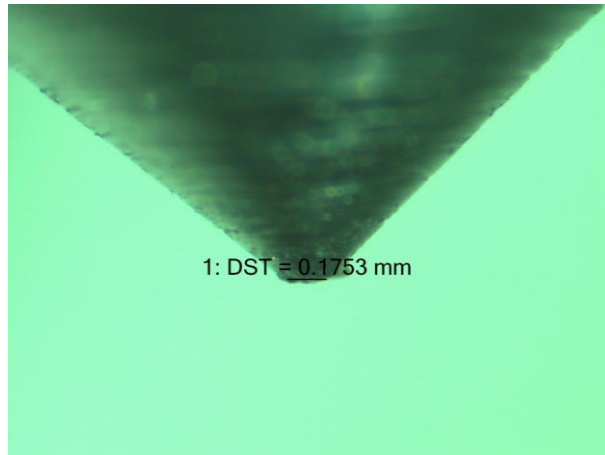


Φώτο Π.2.4. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2

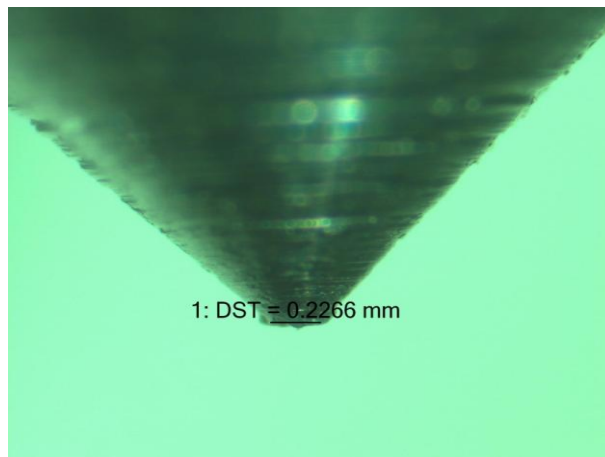
2. Ακίδες σκληρότητας HRC 40



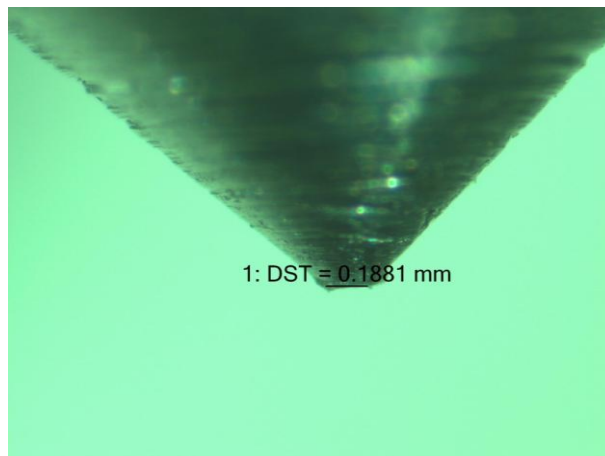
Φώτο Π.2.5. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1



Φώτο Π.2.6. Φθαρμένη πρώτη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2



Φώτο Π.2.7. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 1

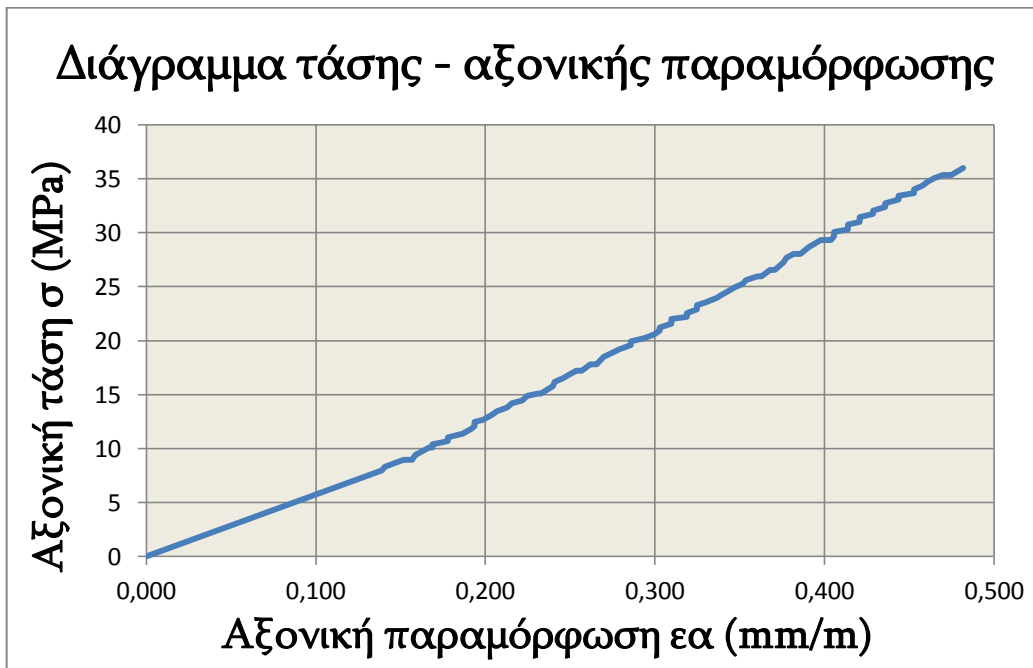


Φώτο Π.2.8. Φθαρμένη δεύτερη ακίδα στο δοκίμιο Tb_01 – Διάμετρος 2

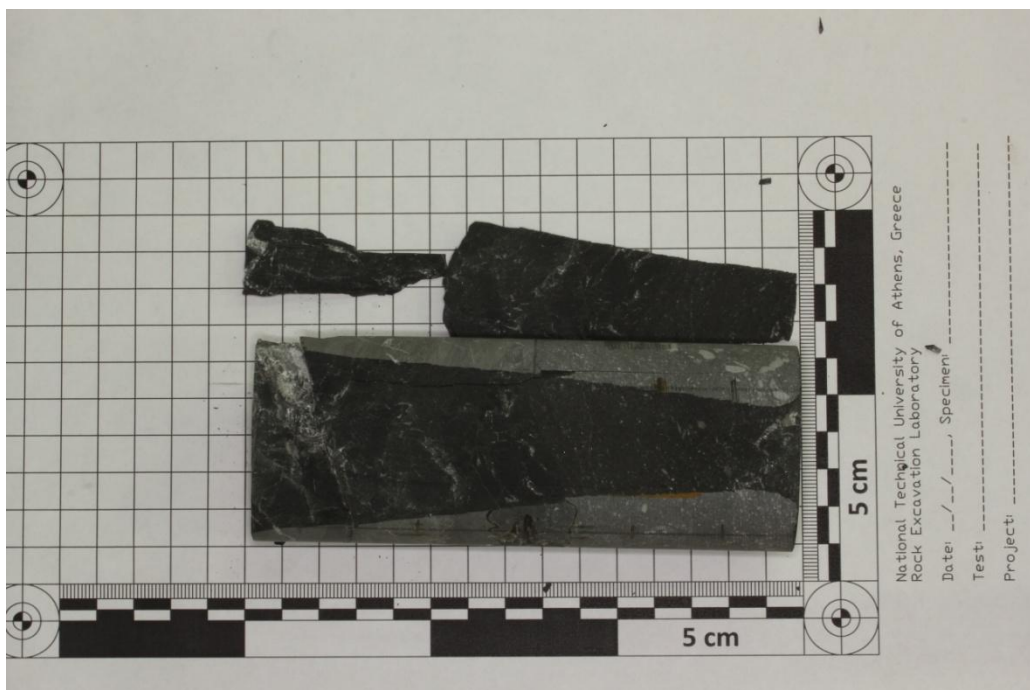
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

ΔΟΚΙΜΗ UCS

Δοκίμιο Ta_01

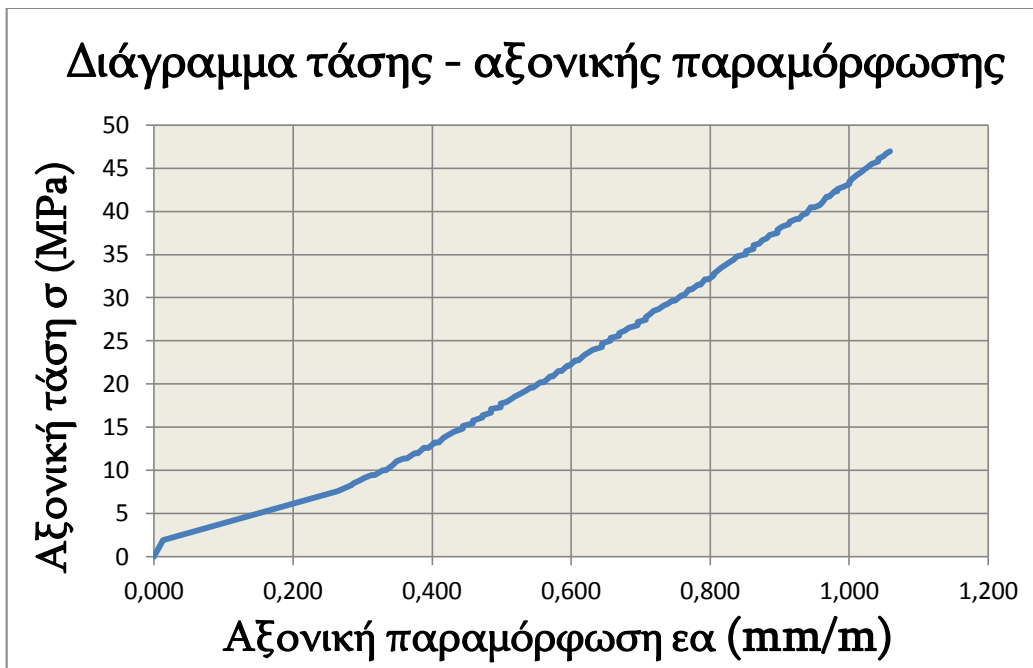


(*) Μερικό διάγραμμα τάσης - αξονικής παραμόρφωσης. Δυστυχώς δεν μπορούσαμε να έχουμε άλλα σημεία πάνω στο διάγραμμα καθώς όταν ασκήθηκε αξονική τάση 36 MPa κόπηκε το αξονικό strain gages. Η αντοχή του σε μονοαξονική αντοχή βρέθηκε 115,5 MPa.



Φώτο Π.3.1. Το δοκίμιο Ta_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής

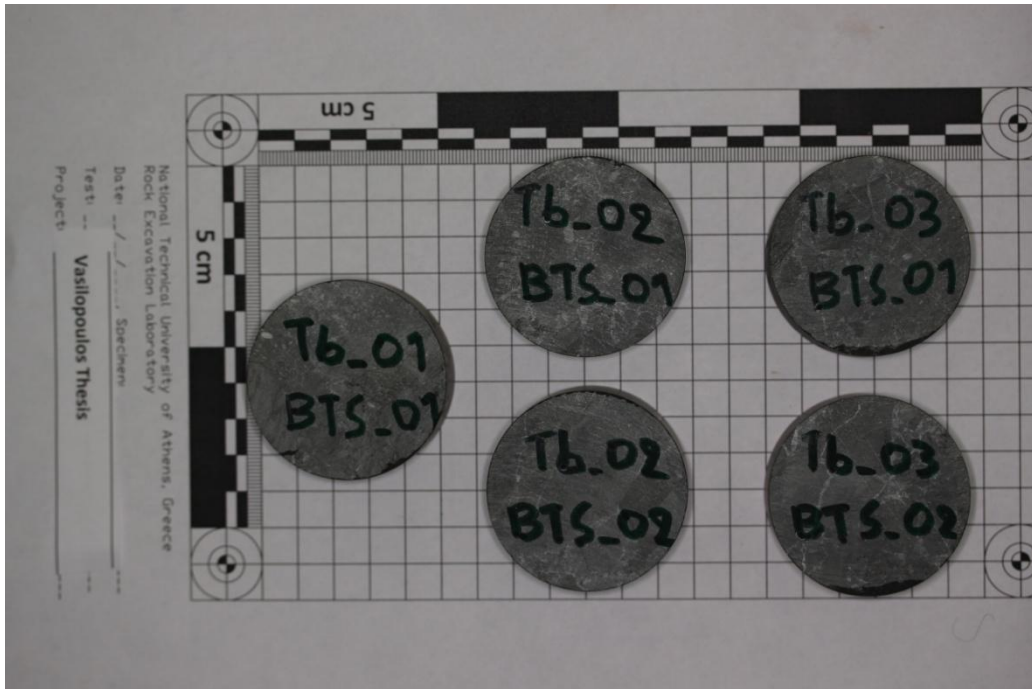
Δοκίμιο Ta_02



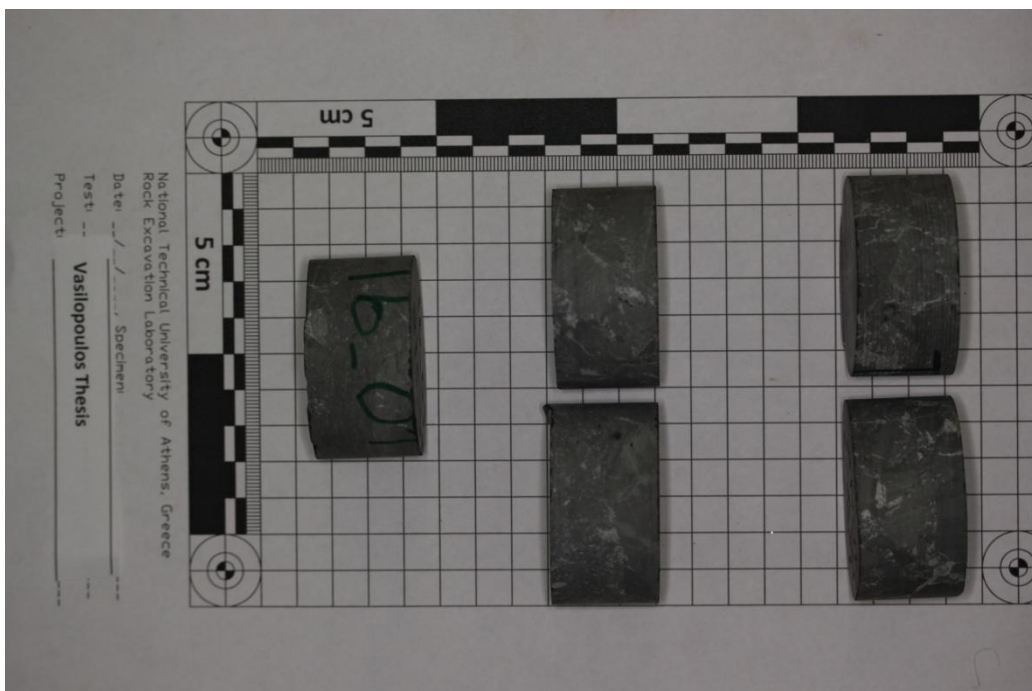
Φώτο Π.3.2. Το δοκίμιο Ta_02 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4
ΔΟΚΙΜΗ BRAZILIAN

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή Brazilian παρουσιάζονται στις παρακάτω φωτογραφίες.

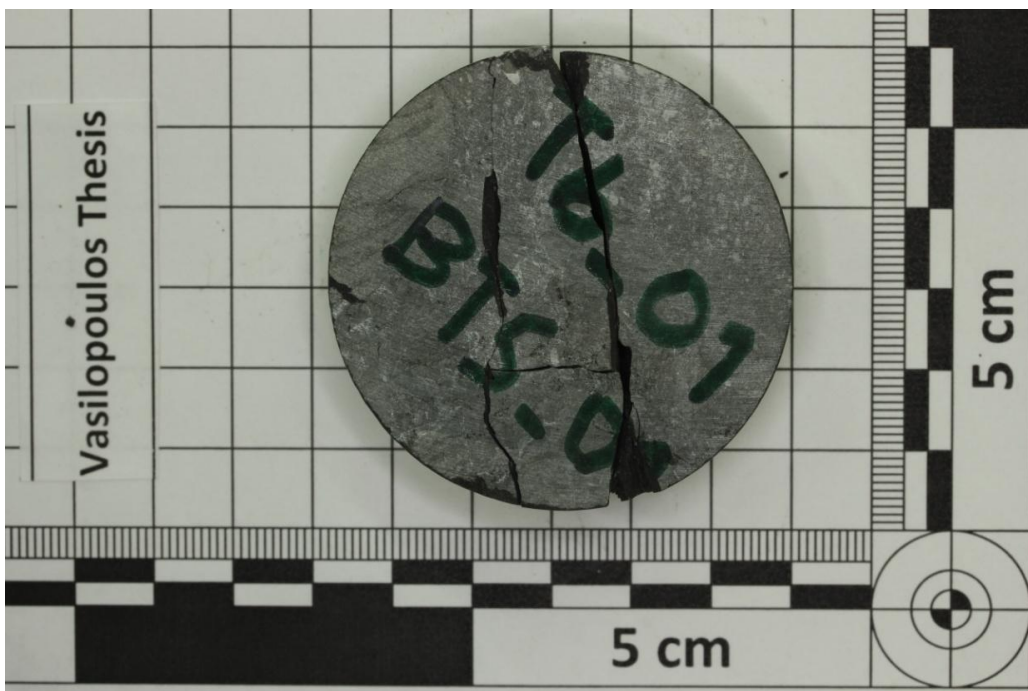
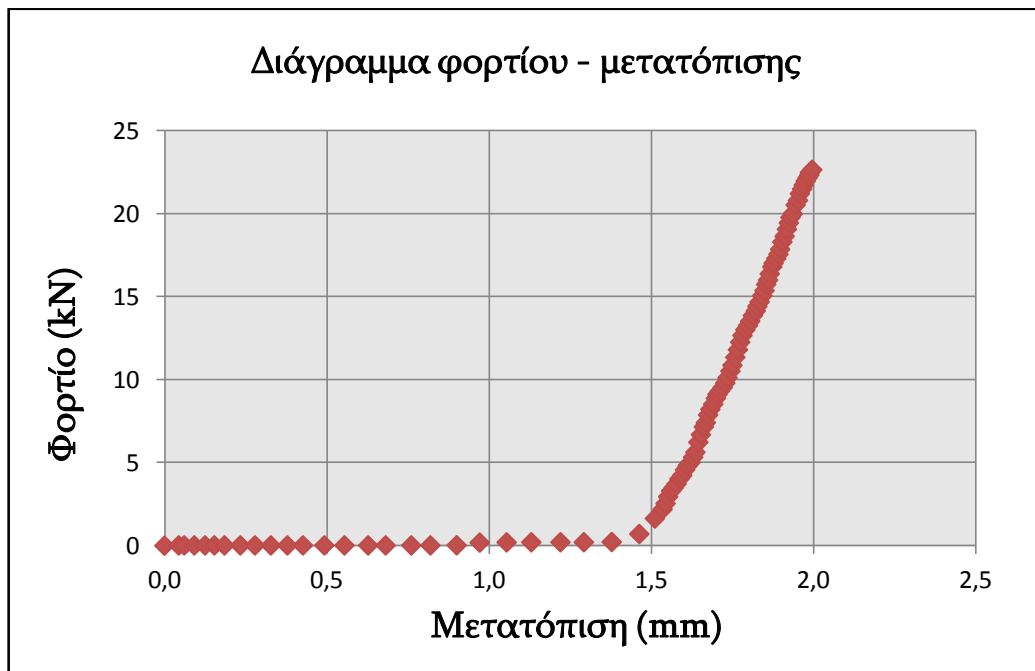


Φώτο Π.4.1. Κάτοψη των δοκιμίων όπου είναι εμφανείς οι διάμετροι τους



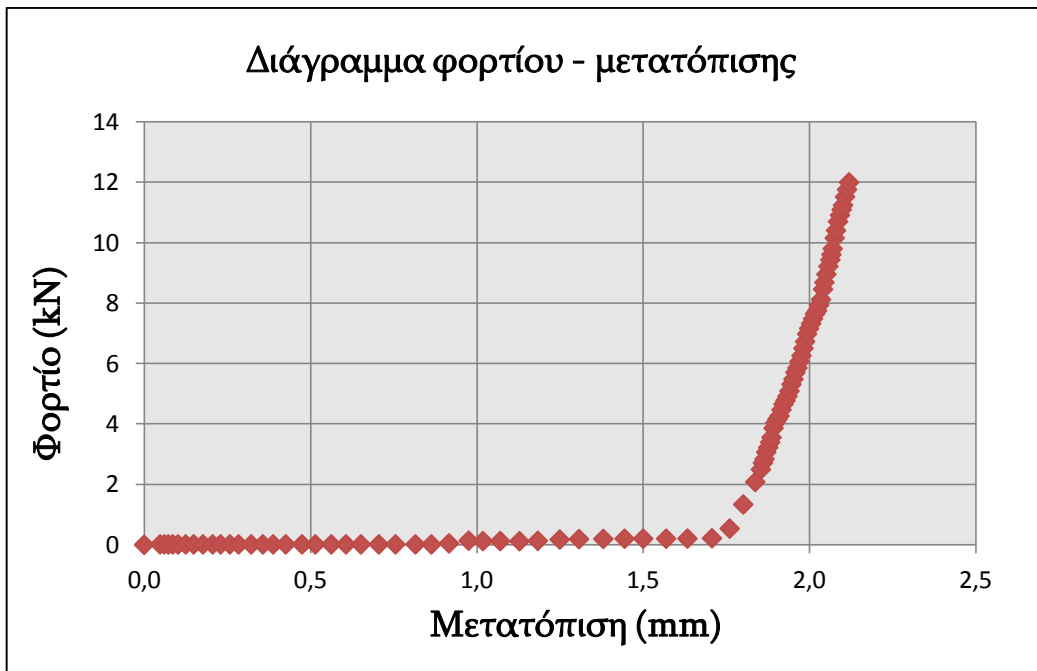
Φώτο Π.4.2. Κάτοψη των δοκιμίων όπου είναι εμφανή τα μήκη τους

Δοκίμιο Tb_01 bts_01



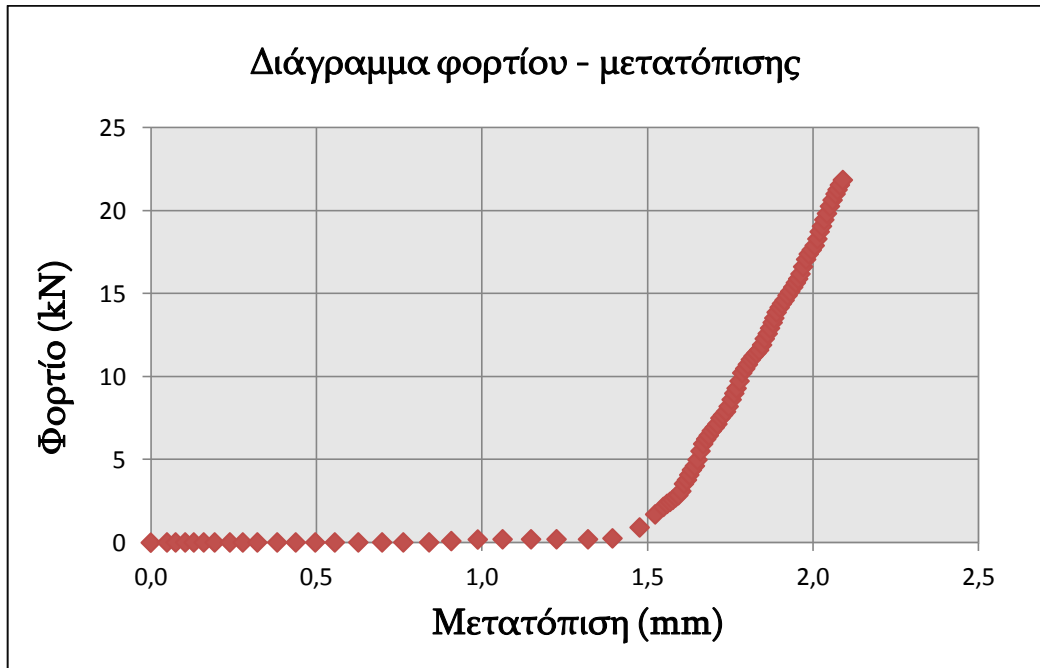
Φώτο Π.4.3. Το δοκίμιο Tb_01 bts_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής

Δοκίμιο Tb_02 bts_01



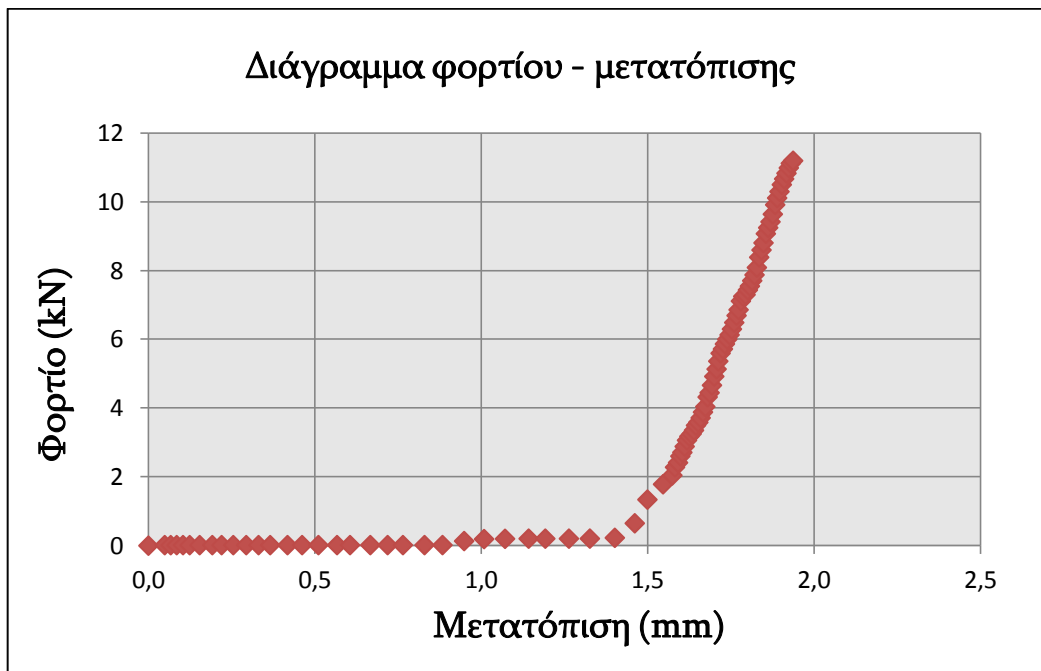
Φώτο Π.4.4. Το δοκίμιο Tb_02 bts_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής

Δοκίμιο Tb_02 bts_02



Φώτο Π.4.5. Το δοκίμιο Tb_02 bts_02 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής

Δοκίμιο Tb_03 bts_01



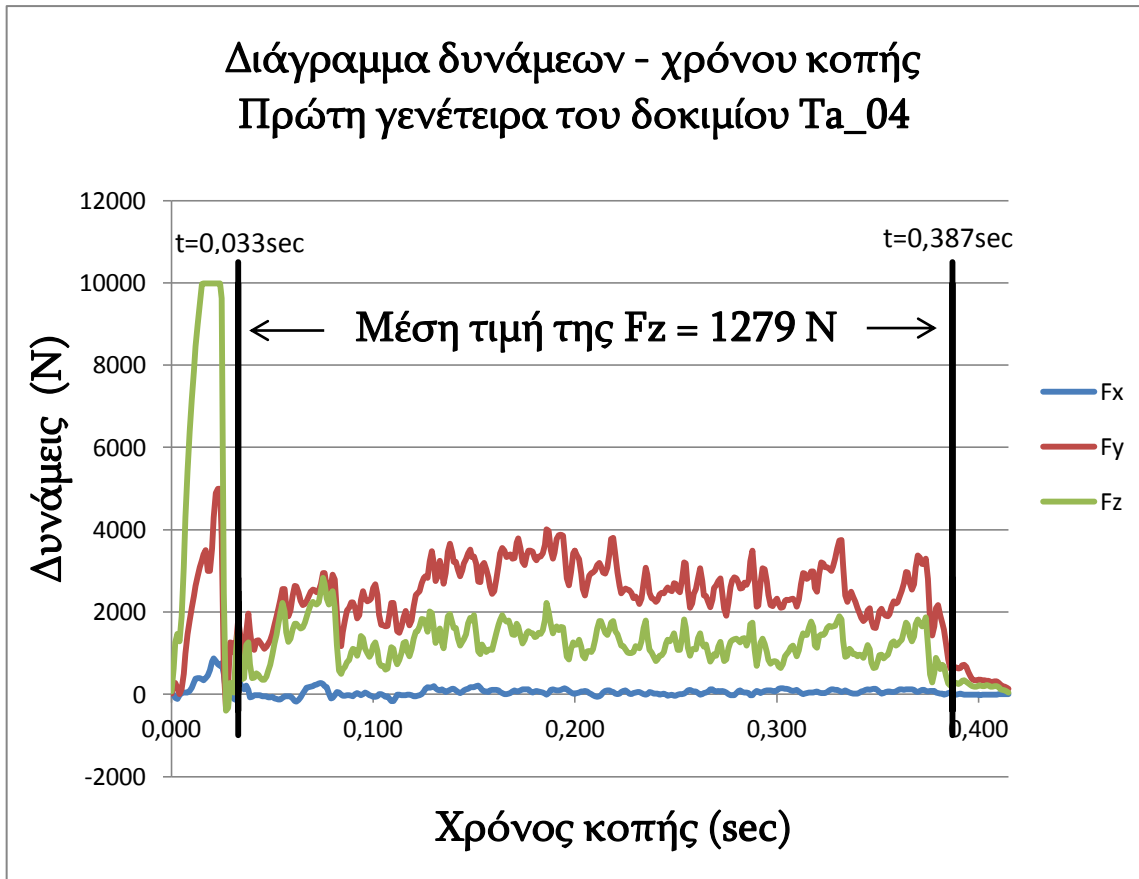
Φώτο Π.4.6. Το δοκίμιο Tb_03 bts_01 έπειτα από την εκτέλεση της δοκιμής

Τέλος, στην παρακάτω φωτογραφία είναι το δοκίμιο **Tb_03 bts_02**, το οποίο δεν αστόχησε.

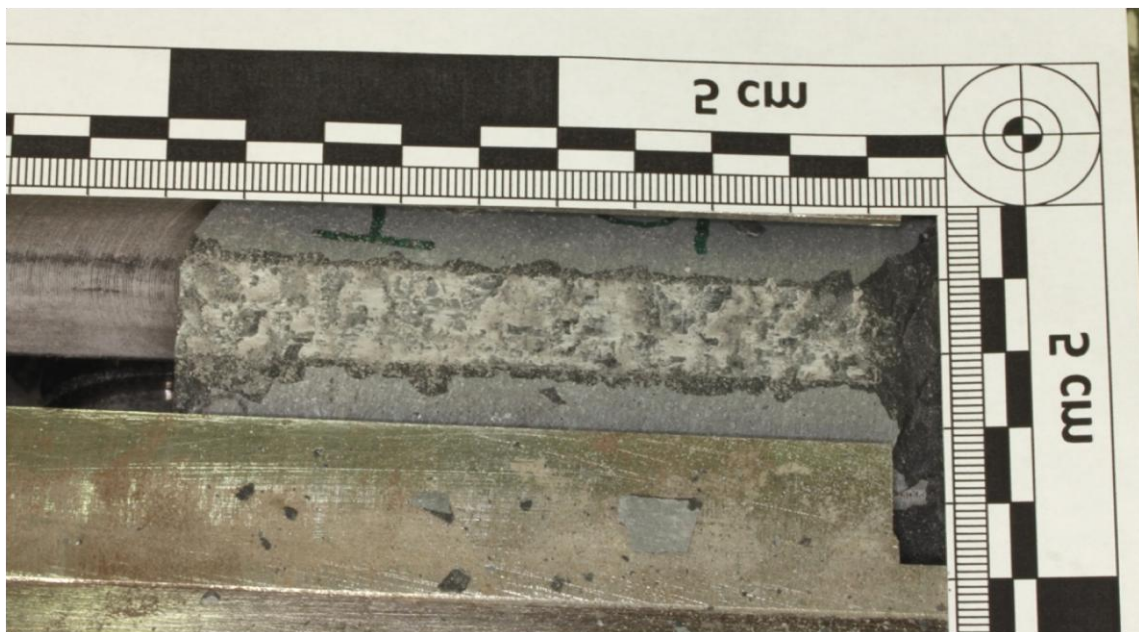
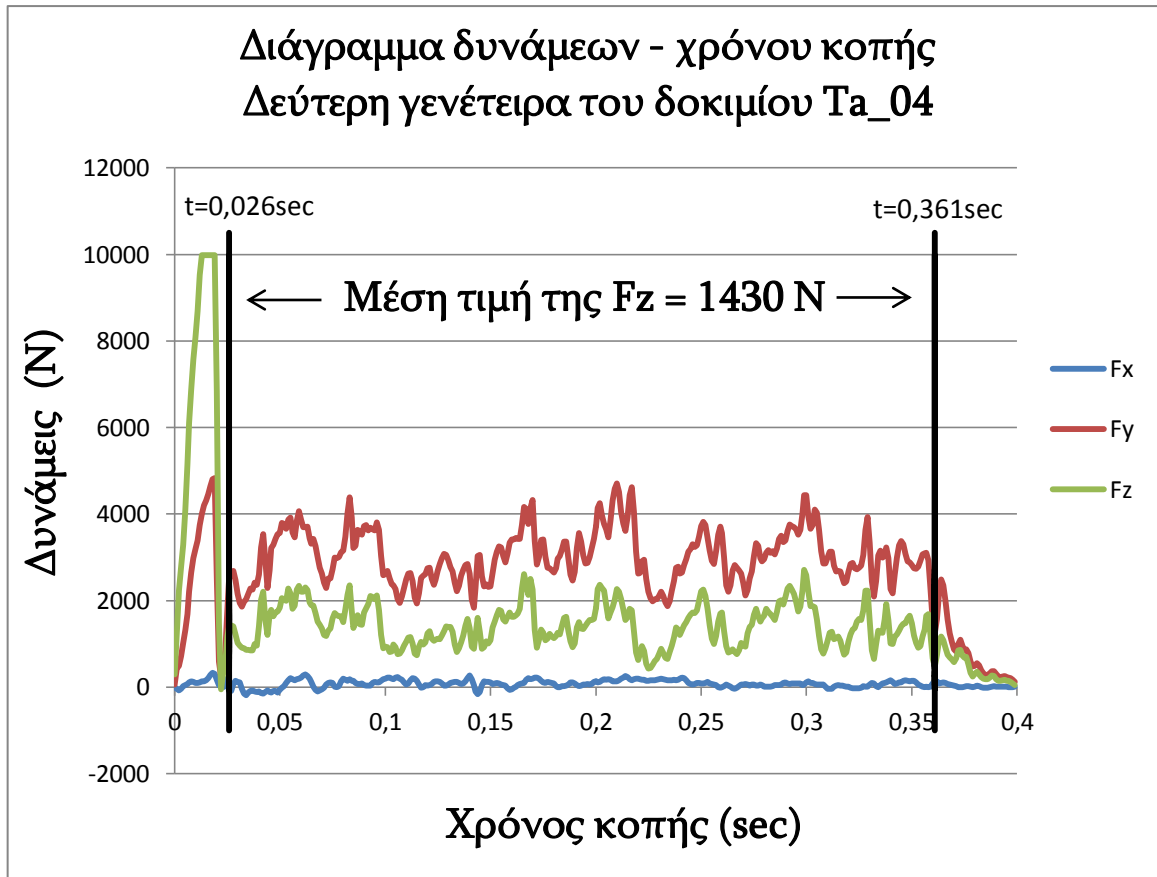


Φώτο Π.4.7. Το δοκίμιο **Tb_03 bts_02** που δεν αστόχησε

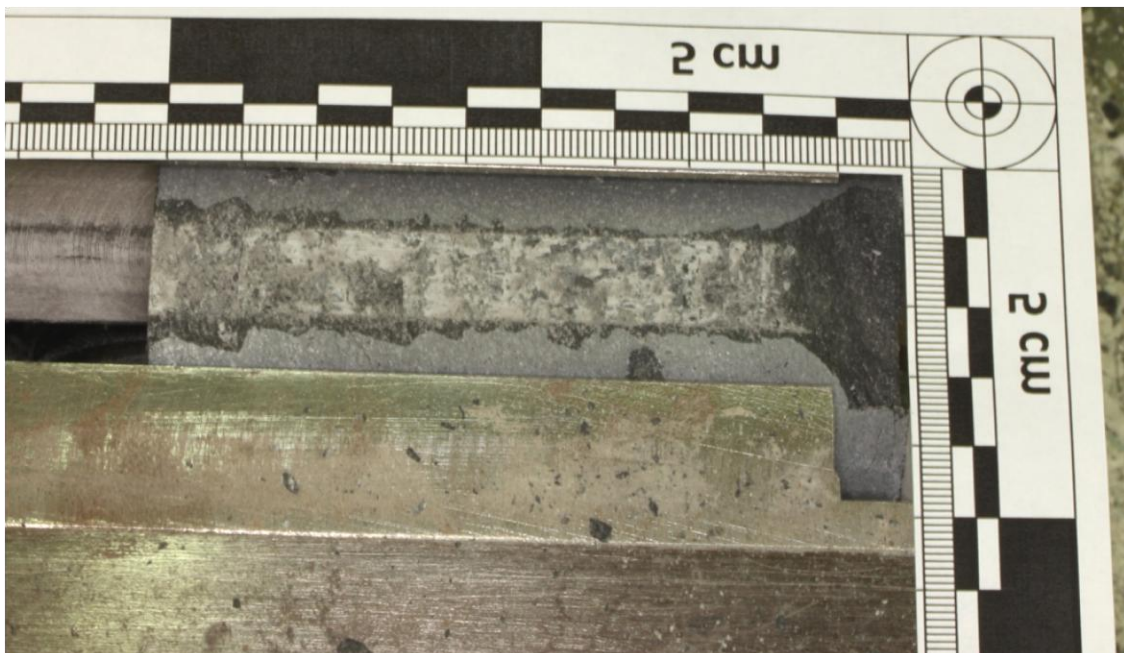
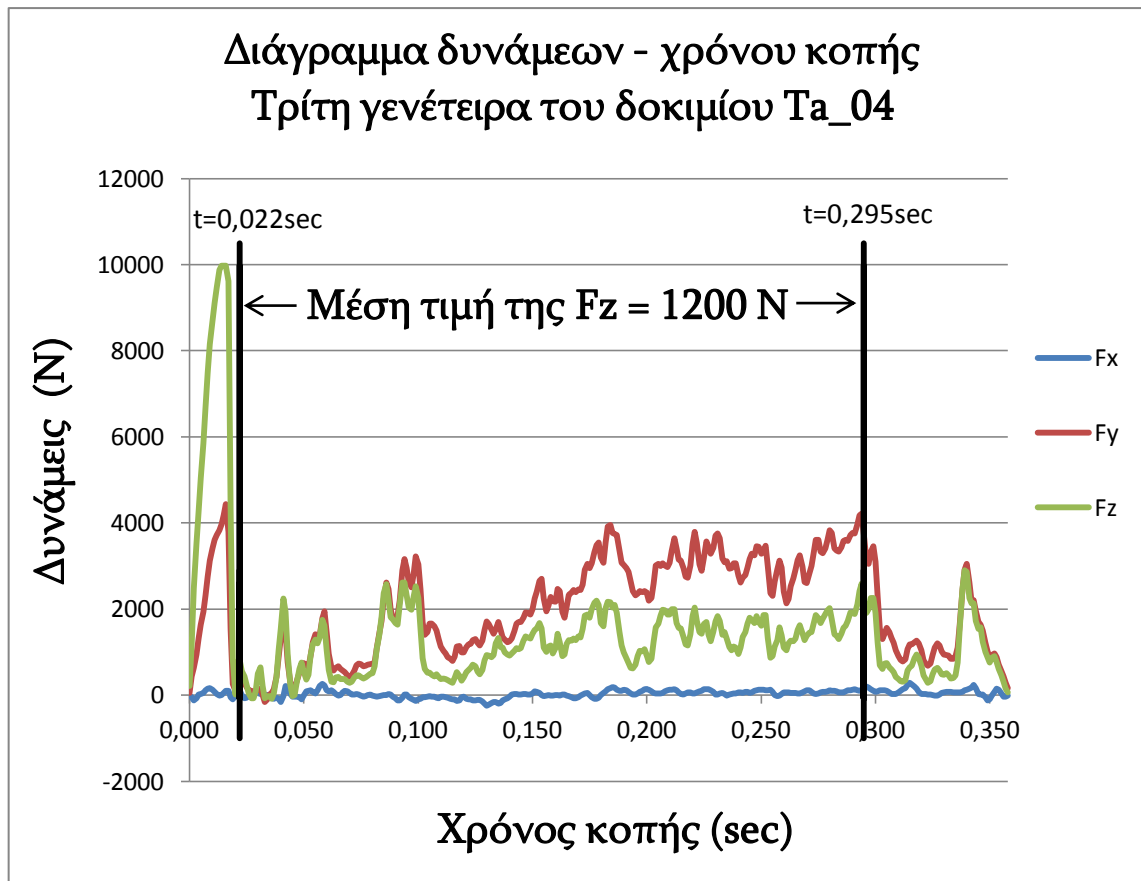
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5
ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ



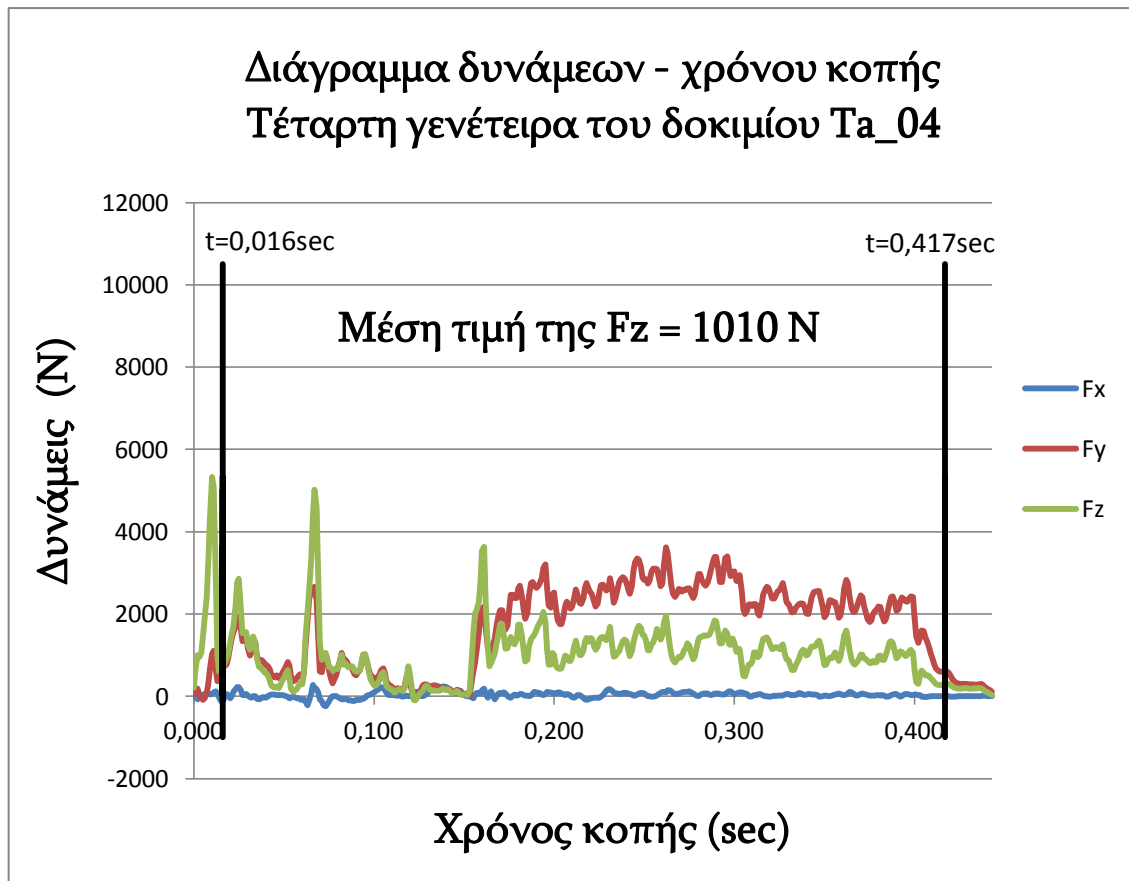
Φώτο Π.5.1. Πρώτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



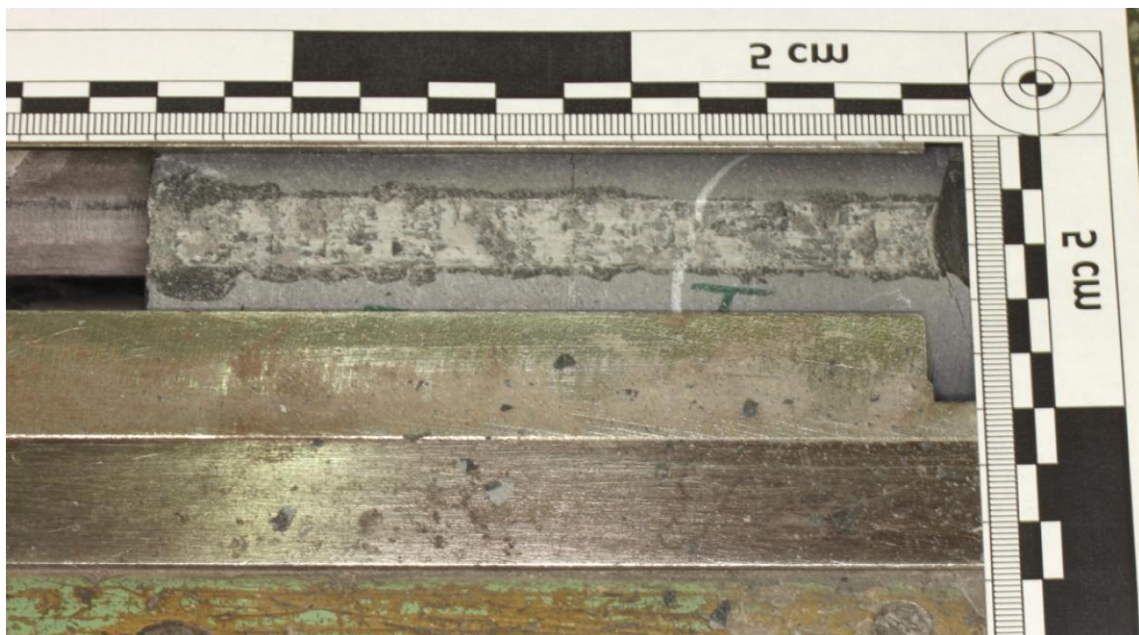
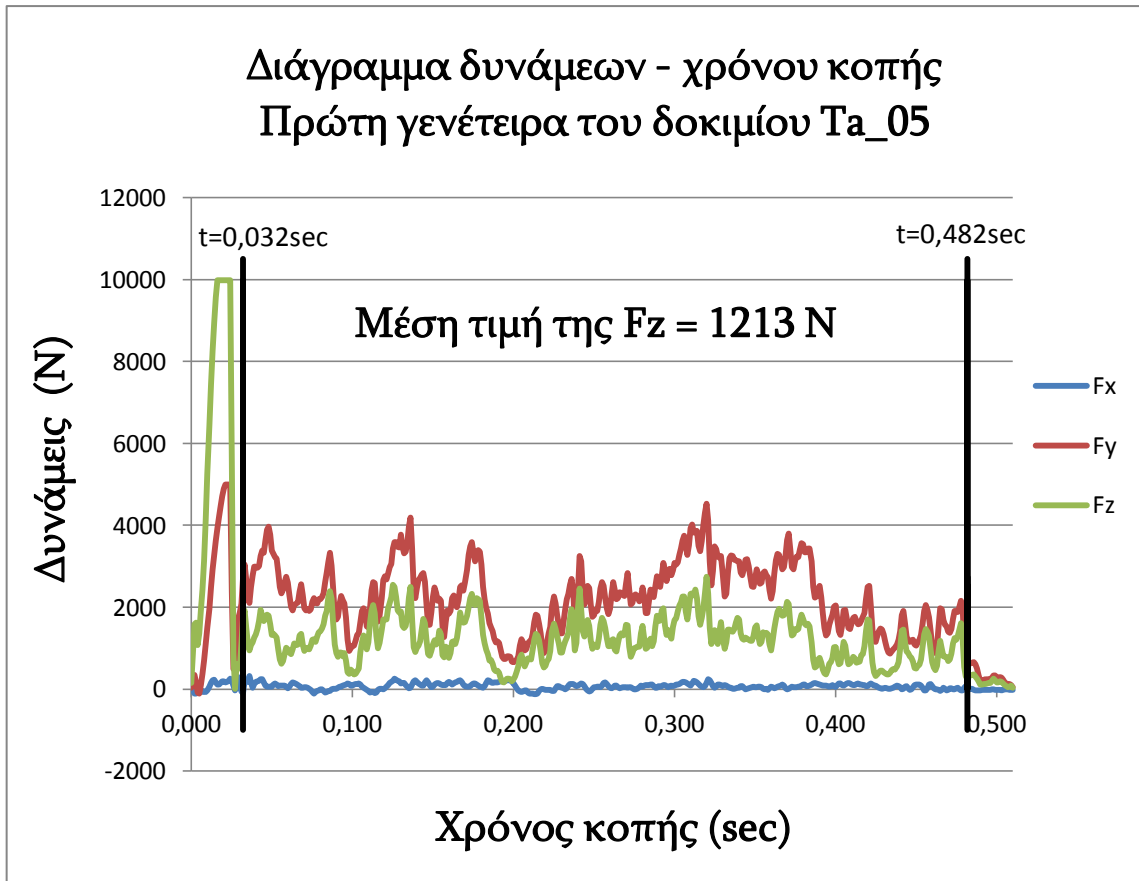
Φώτο Π.5.2. Δεύτερη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



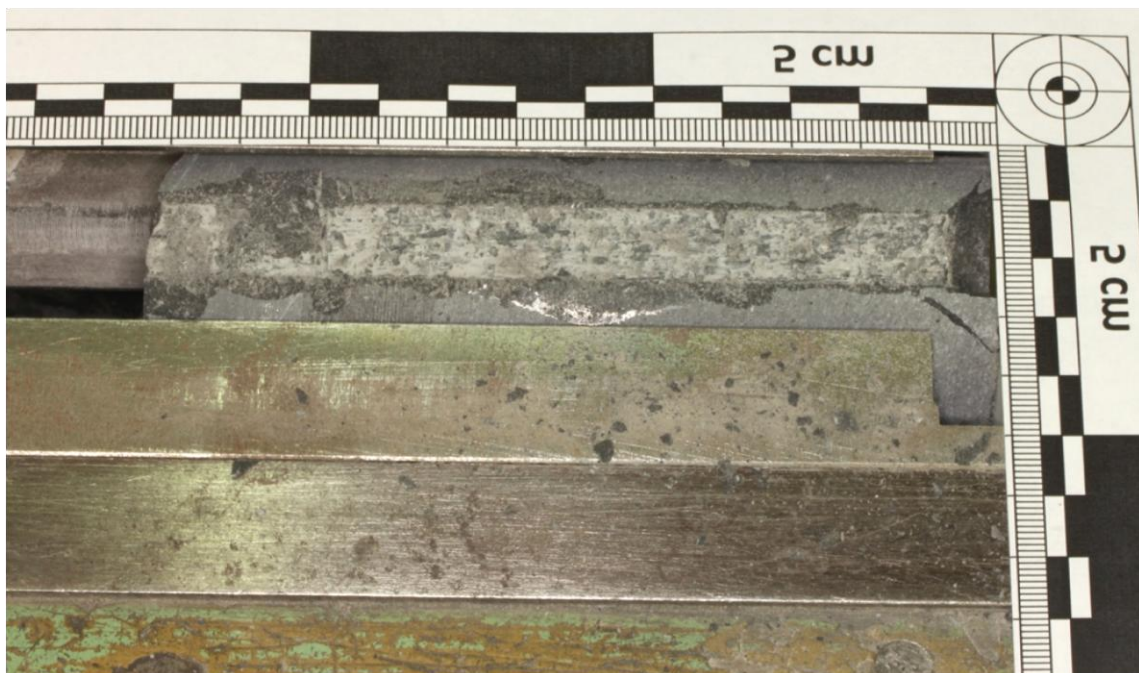
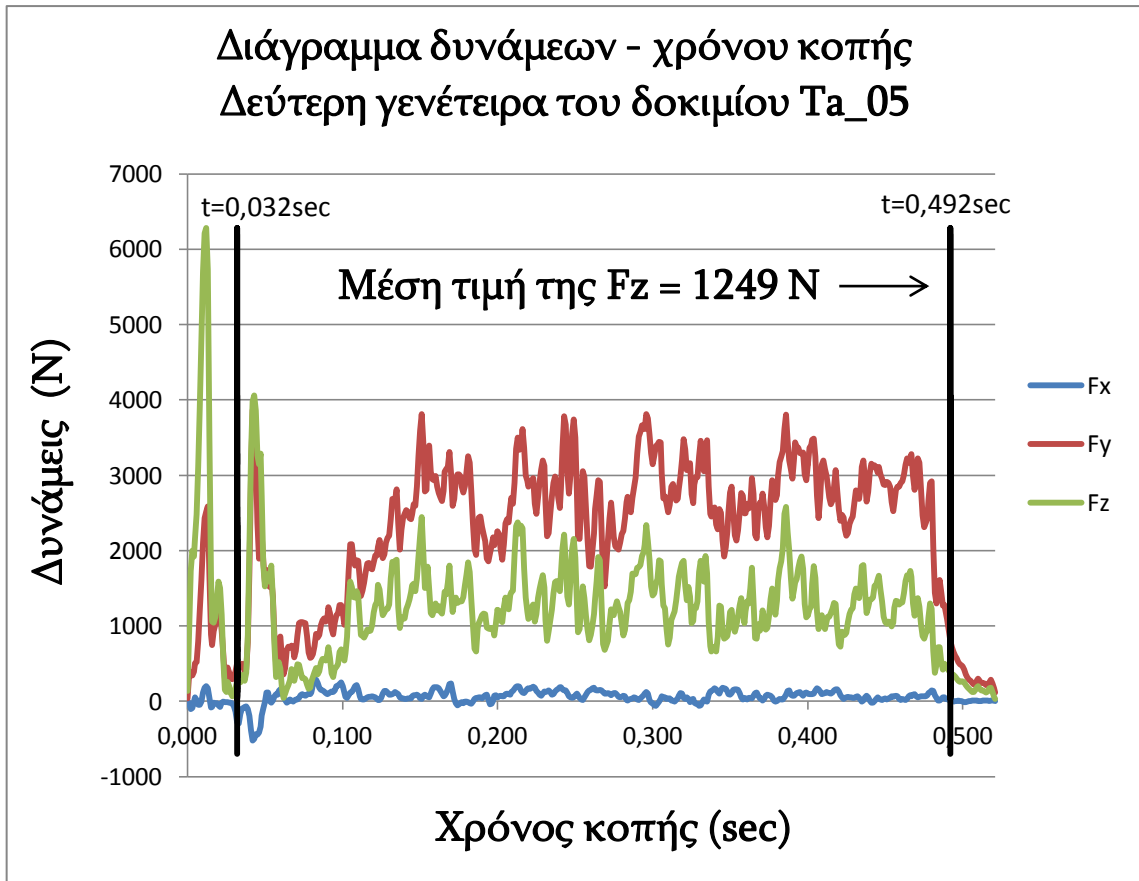
Φώτο Π.5.3. Τρίτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



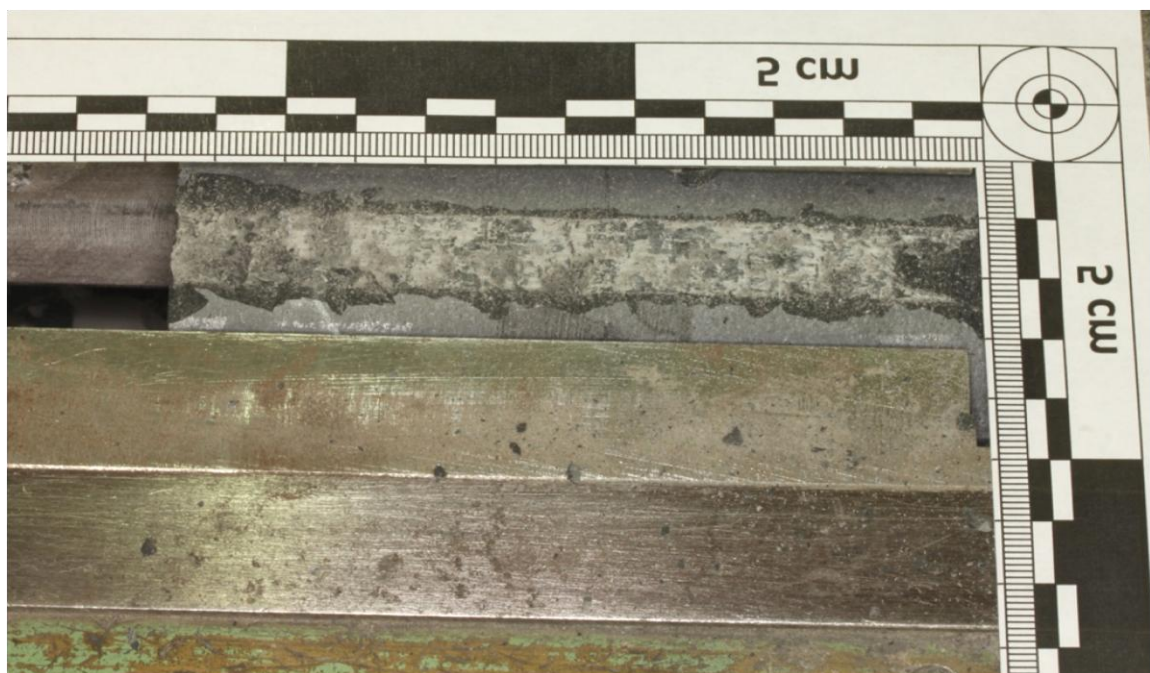
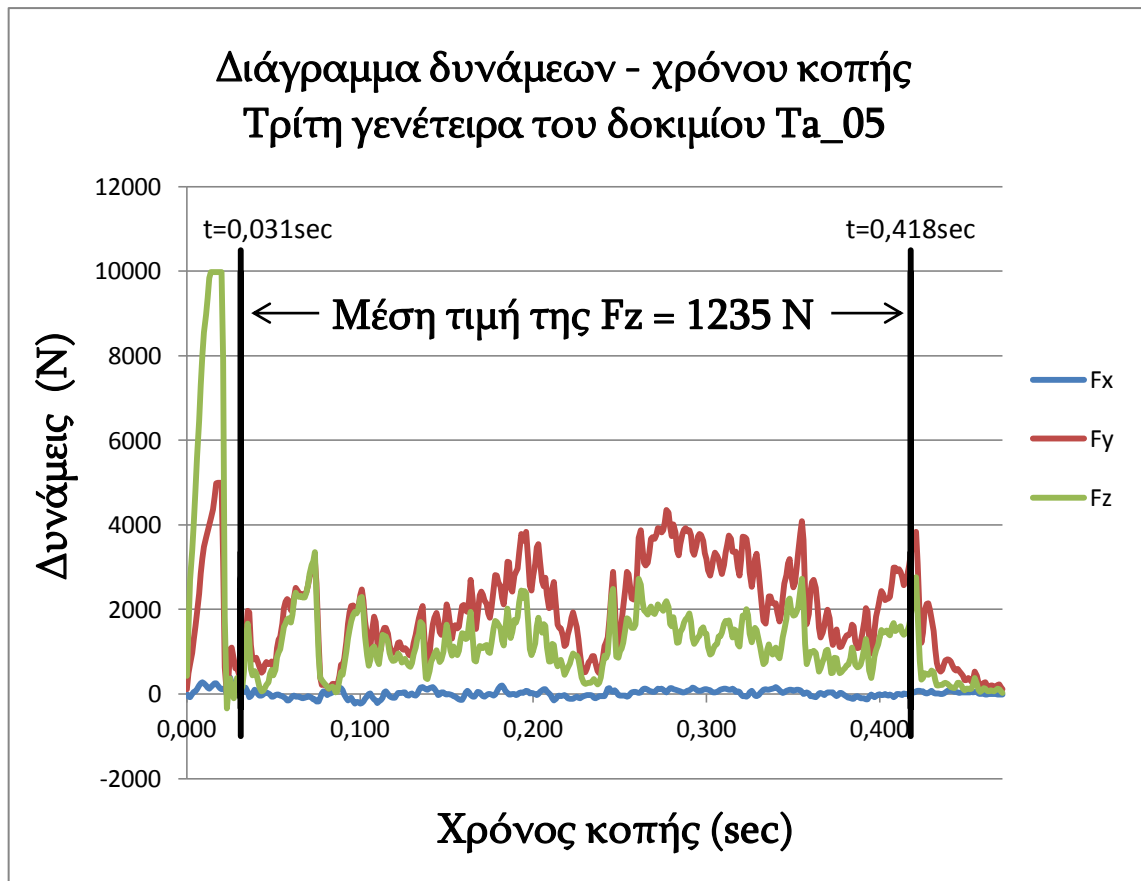
Φώτο Π.5.4. Τέταρτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_04 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



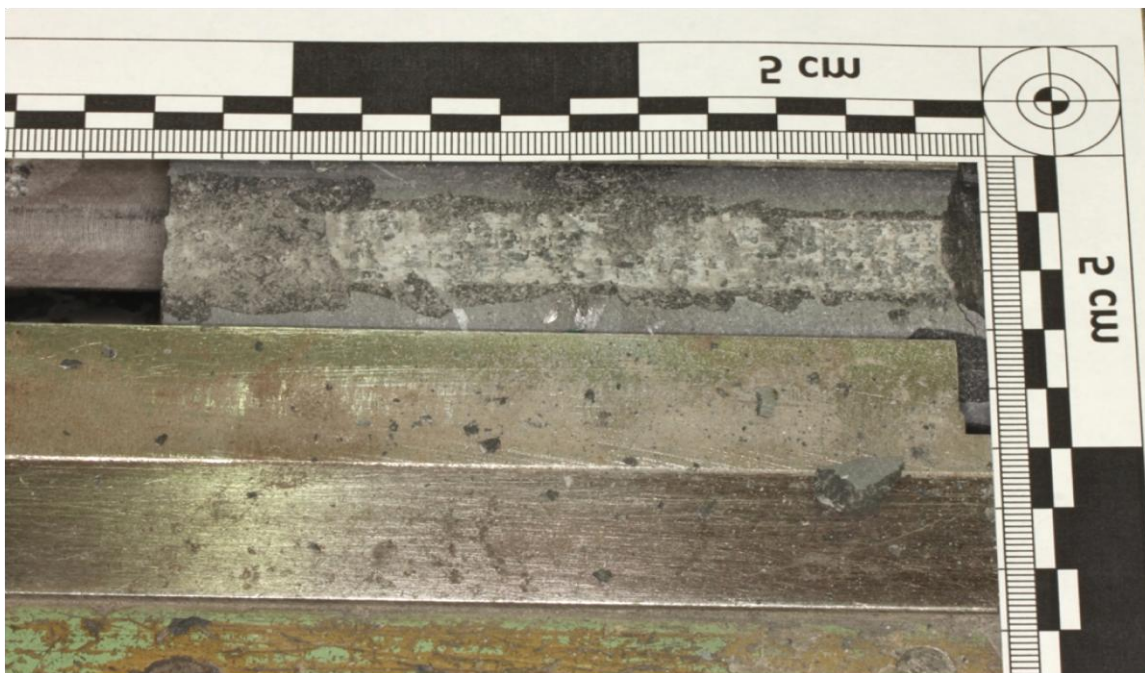
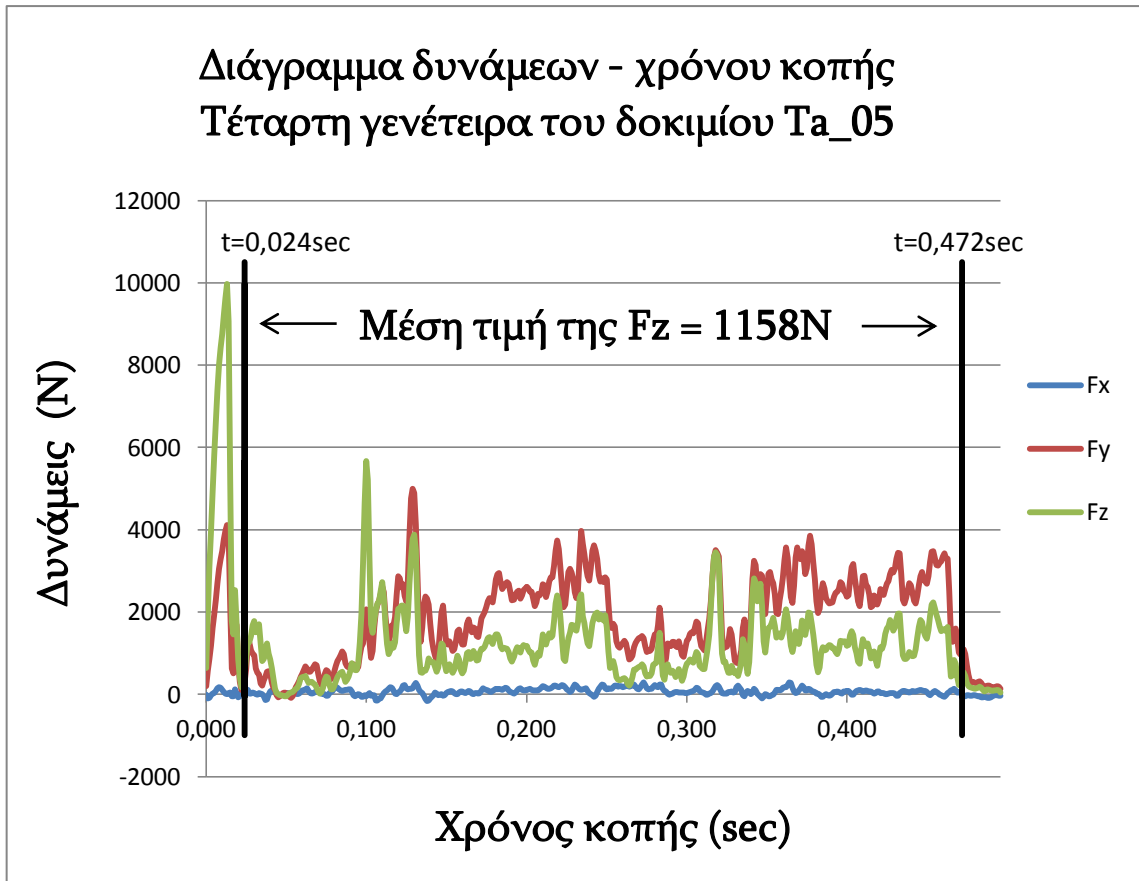
Φώτο Π.5.5. Πρώτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



Φώτο Π.5.6. Δεύτερη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



Φώτο Π.5.7. Τρίτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)



Φώτο Π.5.8. Τέταρτη γενέτειρα δοκιμίου Ta_05 (φορά κοπής από αριστερά προς δεξιά)