



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

Τομέας Μεταλλευτικής

**Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης
ασβεστόλιθου περιοχής Καρδίτσας με μηχανικά
μέσα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Δ. Κουτρομάνος

Επιβλέπων:

Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος

Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

Τομέας Μεταλλευτικής

Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστόλιθου
περιοχής Καρδίτσας με μηχανικά μέσα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Δ. Κουτρομάνος

Επιβλέπων: Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις __/__/2012

Θ. Μιχαλακόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Γ. Παναγιώτου, Καθηγητής ΕΜΠ

Π. Νομικός, Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

Πρόλογος

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα κ. Θεόδωρο Μιχαλακόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών. Ο χρόνος που διέθεσε, η καθοδήγηση και οι σημαντικές γνώσεις που μου προσέφερε οδήγησαν στην επιτυχή εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Μαρία Μπασάνου Δρ Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργό και το προσωπικό του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων ΕΜΠ για την επικουρία τους κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία ΛΑΤΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΣ ΒΟΥΛΑΣ ΑΒΕΕ που μου επέτρεψε να συλλέξω δείγματα από λατομείο της στο νομό Τρικάλων, τον διευθυντή του λατομείου κ. Λάζαρο Ζωιτσάκο Μηχανικό Μεταλλείων, καθώς και τους εργαζόμενους στο λατομείο για την βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την επιλογή και φόρτωση των δειγμάτων.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της εξορυξιμότητας ασβεστόλιθου με μηχανικά μέσα. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού συλλέχθηκαν δείγματα από λατομείο της εταιρείας ΛΑΤΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΒΟΥΛΑΣ πλησίον του οικισμού Πετρόπορο, στη λατομική περιοχή Πετρωτού του νομού Τρικάλων.

Ο όρος εξορυξιμότητα αναφέρεται στη δυνατότητα να αποσπαστεί τμηματικά ένα πέτρωμα από τη φυσική του θέση (*in situ*). Για την διερεύνηση της εξορυξιμότητας με μηχανικά μέσα χρειάζεται η εκτίμηση τόσο των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του πετρώματος όσο και η αλληλεπίδραση του με τις μηχανές εξόρυξης. Μηχανικά χαρακτηριστικά ενός πετρώματος είναι η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή, η σκληρότητα κ.α.

Για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός πετρώματος καθώς και την αλληλεπίδραση του πετρώματος με τις μηχανές εξόρυξης πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές, όπως η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης, η σκληρομέτρηση, η δοκιμή αποξεστικότητας, η δοκιμή ταχύτητας υπερήχων κλπ. Με τη διενέργεια αυτών των δοκιμών προσδιορίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Για τον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας εκσκαφής, δηλαδή της ενέργειας που απαιτείται για την εξόρυξη πεπερασμένου όγκου του πετρώματος από τη φυσική του θέση, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή δοκιμή κοπής. Την ειδική ενέργεια εκσκαφής επηρεάζουν πολλοί παράγοντες όπως η απόσταση μεταξύ δύο κοπτικών άκρων, το βάθος κοπής και η φθορά των κοπτικών εργαλείων.

Όπως είναι φυσικό, η ειδική ενέργεια εκσκαφής αποτελεί τον κρίσιμο παράγοντα για μια οικονομικά βιώσιμη εξόρυξη ενός κοιτάσματος με μηχανικά μέσα. Με τον συνδυασμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος, της επίδρασης τους στα κοπτικά εργαλεία και την ειδική ενέργεια εκσκαφής είναι ικανό να αξιολογηθεί η δυνατότητα εξόρυξης του πετρώματος με μηχανικά μέσα.

Abstract

The subject of this thesis is to investigate the excavability of a limestone deposit with mechanical means, based on its mechanical and physical characteristics. Samples of the limestone deposit were collected from LATOMIA VOULAS quarry, in Petroporo's quarry area near Petroto village in the prefecture of Trikala, Greece.

The term “excavability” is referring to the ability of a rock to be excavated from its natural (in situ) position. In order to determine the excavability of the limestone and its interaction with the excavating machines, a two-step procedure has been used.

First its mechanical and physical characteristics were estimated using a number of tests such as uniaxial compressive strength, Brazilian tests, hardness tests, abrasiveness tests, ultrasound velocity tests, laboratory cutting tests etc. Particular emphasis was given to the estimation of the specific energy from the laboratory cutting test. The specific energy, i.e. the energy required to excavate a unit volume of rock, is a good approximation of the energy required during the actual-scale excavation and is considered as a critical factor to estimate the viability of the excavation of the deposit using mechanical means.

Then, based on the tests results and using the appropriate tables, the particular limestone was categorized regarding its excavability. The limestone's effect on the cutting tools (abrasiveness) was determined and the specific energy of the excavation has been calculated. Finally, safe conclusions have been reached regarding the ability for a viable excavation of the limestone deposit using mechanical means.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
1.1 Γενικά.....	21
1.1.1 Η Εξόρυξη	21
1.1.2 Τα Αδρανή υλικά	22
1.2 Σκοπός της εργασίας	22
1.3 Εργαστηριακές δοκιμές.....	24
1.4 Οργάνωση της Διπλωματικής εργασίας.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	27
2.1. Ασβεστόλιθος	27
2.1.1. Ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά.....	27
2.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ασβεστολίθων	28
2.2 Η τοποθεσία του λατομείου	30
2.3 Το κοίτασμα	31
2.4 Δειγματοληψία, διαμόρφωση δοκιμίων και μετρήσεις	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	35
3.1 Γενικά.....	35
3.2. Η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων από οικονομική και επιχειρησιακή σκοπιά	35
3.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την εξορυξιμότητα ενός πετρώματος	37
3.4 Εκτίμηση της εξορυξιμότητας ενός πετρώματος	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	43
4.1 Εισαγωγή.....	43
4.2. Συμπεριφορά του πετρώματος στην κοπή.....	44
4.3. Κοπτικά εργαλεία	46
4.4. Κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	54
5.1. Γενικά.....	54
5.2. Θεωρίες κοπής υπό συνθήκες εφελκυσμού	55
5.2.1. Η θεωρία του Merchant	55
5.2.2. Η θεωρία του Evans	57
5.2.3. Η θεωρία του Nishimatsu	59

5.3. Η κατά Nishimatsu διαδικασία της αστοχίας στην κοπή πετρωμάτων .	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	65
6.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compressive Strength test)	65
6.1.1.Εισαγωγή.....	65
6.1.2 Η δοκιμή	66
6.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα	70
6.2 Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (BTS)	72
6.2.1 Εισαγωγή.....	72
6.2.2 Η δοκιμή	73
6.2.3 Προετοιμασία Δοκιμίων	74
6.2.4 Πειραματικά αποτελέσματα	75
6.3 Δοκιμή ταχύτητας υπερήχων	77
6.3.1 Εισαγωγή.....	77
6.3.2 Σκοπός της δοκιμής.....	78
6.3.3 Εργαστηριακή Συσκευή	79
6.3.4 Δοκιμή - Πειραματικά αποτελέσματα	79
6.4 Σκληρομέτρηση Shore	81
6.4.1 Εισαγωγή.....	81
6.4.2 Σκοπός της δοκιμής.....	82
6.4.3 Η Εργαστηριακή Συσκευή.....	83
6.4.4 Χρησιμοποιούμενα δοκίμια.....	83
6.4.5 Η δοκιμή	84
6.4.6 Πειραματικά Αποτελέσματα	85
6.5 Δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar	87
6.5.1 Εισαγωγή.....	87
6.5.2 Σκοπός της δοκιμής.....	87
6.5.3 Πειραματική συσκευή	88
6.5.4 Η δοκιμή	88
6.5.5 Πειραματικά αποτελέσματα	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ.....	95
7.1. Εισαγωγή.....	95
7.2. Πεδίο εφαρμογής των μεθόδων κοπής πετρωμάτων.....	96

7.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την ειδική ενέργεια εκσκαφής.....	99
7.3.1 Ιδιότητες του πετρώματος.....	99
7.3.2 Παράμετροι εκσκαφής	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ	
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	105
8.1 Εισαγωγή.....	105
8.2 Εργαστηριακή διάταξη	106
8.3. Πειραματική διαδικασία	109
8.3.1. Προετοιμασία - Ρυθμίσεις στην πλάνη.....	109
8.3.2. Ρυθμίσεις δυναμομέτρου και λογισμικού	109
8.3.3. Εκκίνηση πλάνης.....	110
8.3.4. Έναρξη παλινδρόμησης κεφαλής.....	110
8.3.5. Τερματισμός παλινδρόμησης κεφαλής	110
8.3.6. Καταγραφή αποτελεσμάτων	110
8.3 Πειραματικά αποτελέσματα- Υπολογισμοί	110
8.4 Υπολογισμός ειδικής ενέργειας εκσκαφής	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΕΞΟΡΥΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SURFACE MINER	117
9.1 Γενικά.....	117
9.2. Συγκρότηση του Surface Miner.....	117
9.2.1. Υποδομή	118
9.2.2. Ανωδομή	118
9.2.3. Κοπτικό τύμπανο.....	119
9.2.4. Πρωτεύουσα μεταφορική ταινία.....	120
9.2.5. Βραχίονας του μηχανήματος	120
9.3. Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	121
9.4. Διαγράμματα λειτουργίας του Surface Miner	122
9.5. Παραγωγική ικανότητα της μεθόδου	123
9.6. Διαδικασία εξόρυξης ασβεστόλιθου	125
9.7. Τεχνικά προβλήματα από την χρήση του Surface Miner	127
9.8. Περιβαλλοντικά προβλήματα	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	129
10.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα διαχρονικά αποτελέσματα του	
εργαστηρίου.....	129

10.2. Διαγράμματα λειτουργίας SURFACE MINER.....	133
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	136
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 : ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ CERCHAR.....	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 : ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	159
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 : ΔΟΚΙΜΗ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟ SHORE	174
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 : ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ (Brazilian test).....	178
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 : ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ (UCS)	184
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	187

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Γεωλογικός Χάρτης περιοχής	31
Σχήμα 3.1. Διάγραμμα επιλογής μεθόδου εξόρυξης με βάση το δείκτη ασυνεχειών (Γ. Παναγιώτου 2003).....	41
Σχήμα 4.1. Τύποι αποσύνθεσης του πετρώματος κατά την κοπή κατά Deketh et al, 1998 (Αναγνώστου 2006).....	44
Σχήμα 4.2. Διακύμανση της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου για α) πολύ πλαστικό b) πλαστικό c) ψαθυρό δ) πολύ ψαθυρό πέτρωμα, (Παναγιώτου, 1999).	46
Σχήμα 4.3. Δυνάμεις που προκαλούν θραύση του πετρώματος για κοπτικά α) συρόμενου τύπου, β) τύπου δίσκου, (Αναγνώστου 2006).	47
Σχήμα 4.4. Κοπτικά συρόμενου τύπου: α), b), c) κοπτικά τύπου σμίλης d) κοπτικό σημειακής προσβολής, (Αναγνώστου 2006).....	47
Σχήμα 4.5. Κοπτικά τύπου δίσκου: α) κοπτικό δίσκου, b) κοπτικό οδοντωτού δίσκου, c) κοπτικό περιστρεφόμενου τύμπανου με κομβία, (Αναγνώστου 2006).....	48
Πίνακας 4.1. Καταλληλότητα κοπτικών εργαλείων βάσει της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. (Αναγνώστου 2006)	49
Σχήμα 4.6. Τύποι κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου (Αναγνώστου 2006) ..	50
Σχήμα 4.7. Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά Fowell (Αναγνώστου 2006).....	51
Σχήμα 4.8. Οι συνιστώσες της δύναμης που ασκείται σε κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου	52
Σχήμα 5.1. Η κατανομή των τάσεων και των δυνάμεων κοπής στη θεωρία του Merchant.....	57
Σχήμα 5.2. Κατανομή τάσεων και δυνάμεις κοπής στη θεωρία του Evans	59
για τη κοπή γαιανθράκων.....	59
Σχήμα 5.3. Κατανομή τάσεων και δυνάμεις κοπής στη θεωρία του Nishimatsu	60
Σχήμα 5.4. Η επίδραση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης στον παράγοντα διανομής των τάσεων κατά Nishimatsu (Αναγνώστου 2006)	61
Σχήμα 5.5. Η φαινόμενη γωνία τριβής ως συνάρτηση της εμπρόσθιας γωνίας κλίσης του κοπτικού κατά Nishimatsu (Αναγνώστου 2006).....	62

Σχήμα 5.6. Μηχανισμός αστοχίας πετρώματος κατά την κοπή κατά Nishimatsu	63
Σχήμα 5.7. Παράδειγμα αυξομείωσης της δύναμης κοπής και της κάθετης δύναμης κατά την κοπή α)δύναμη κοπής και β)κάθετη δύναμη.	64
Σχήμα 6.1. Προσανατολισμός δοκιμίων.	67
Σχήμα 6.2. Τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης	67
Σχήμα 6.3 .Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.....	69
Σχήμα 6.4. Κίνηση σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος σε εγκάρσια και διαμήκη κύματα	78
Σχήμα 6.5. Σκληρόμετρο Shore	83
Σχήμα 6.6. Συσχέτιση μεταξύ σκληρότητας Shore και UCS (Γ. Παναγιώτου 2002).....	86
Σχήμα 6.7. Συσχέτιση τιμών μεταξύ κλίμακας Mohs και Δοκιμών Cerchar για διάφορα ορυκτά	92
Σχήμα 7.1. Διάγραμμα Hood &Roxbough (Αναγνώστου 2006).....	97
Σχήμα 7.2. Επίδραση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στην ειδική ενέργεια εκσκαφής (Αναγνώστου 2006).....	99
Σχήμα 7.3. Επίδραση της απόστασης των ασυνεχειών ιλυολιθικών πετρωμάτων στην ειδική ενέργεια εκσκαφής(Αναγνώστου 2006).....	100
Σχήμα 7.4 Επίδραση της διεύθυνσης των ασυνεχειών ιλυολιθικών πετρωμάτων στην ειδική ενέργεια εκσκαφής, (Αναγνώστου 2006).	101
Σχήμα 7.5. Ειδική ενέργεια εκσκαφής συναρτήσει του βάθους κοπής για α) κοπτικό συρόμενου τύπου, β) κοπτικό τύπου δίσκου (Αναγνώστου 2006)..	102
Σχήμα 7.6. Αλληλεπίδραση διαδοχικών κοπτικών (Αναγνώστου 2006).....	103
Σχήμα 7.7. Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην ειδική ενέργεια εκσκαφής, (Αναγνώστου 2006).	103
Σχήμα 8.1. Προδιαγραφές εργαστηριακής δοκιμής κοπής για τον υπολογισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής. (Αναγνώστου 2006)	106
Σχήμα 8.2. Κινήσεις κοπτικού και επιφάνειας κατεργασίας σε ένα πλήρη κύκλο εργασίας πλανίσματος.	108
Σχήμα 8.3. Βασικά μέρη ταχυπλάνης.....	109
Σχήμα 8.4. Το αρχικό διάγραμμα δύναμης – χρόνου στο δοκίμιο Κα_05 στην 1 ^η κοπή.	111

Σχήμα 8.5. Ο θόρυβος στο δοκίμιο Κα_05 κοπή 1 ^η	112
Σχήμα 8.6. Διάγραμμα δύναμης-χρόνου μετά την διόρθωση των δεδομένων	112
Σχήμα 9.1. Δυνατότητα εξόρυξης πετρωμάτων ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων	122
Σχήμα 9.2. Σχέση οικονομικότητας και αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.....	123
Σχήμα 9.3. Απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά	124
του πετρώματος.....	124
Σχήμα 9.4. Διάγραμμα ενεργού χρόνου κοπής συνάρτηση του μήκους εργασίας.....	125
Σχήμα 10.1. Συγκριτικό διάγραμμα ειδικής ενέργειας εκσκαφής (MJ/m ³).....	129
Σχήμα 10.2. Αποτελέσματα CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 55 (CAI)	130
Σχήμα 10.3. Αποτελέσματα CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 40 (CAI)	130
Σχήμα 10.4 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa).....	131
Σχήμα 10.5. Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (MPa)	131
Σχήμα 10.6. Σκληρότητα SHORE	132
Σχήμα 10.7. Δείκτης πλαστικότητας	132
Σχήμα 10.8. Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	133
Σχήμα 10.9. Ικανότητα εξόρυξης βασικών πετρωμάτων με βάση την ταχύτητα υπερήχων.	134
Σχήμα 10.10. Συσχέτιση οικονομικότητας εξόρυξης και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.....	134
Σχήμα 10.11. Η απόδοση του μηχανήματος με βάση την αντοχή σε UCS (MPa).	135
Σχήματα Π2.1, Π.2.2.. Διάγραμμα 1 ^η Κοπής Δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής	160
Σχήματα Π2.3, Π2.4. Διάγραμμα 2 ^η κοπής Δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής	161

Σχήματα Π2.5, Π2.6. Διάγραμμα 3 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής	162
Σχήματα Π2.7, Π2.8. Διάγραμμα 4 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής	163
Σχήματα Π2.9, Π2.10.. Διάγραμμα 1 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_09 , θόρυβος μηχανής	164
Σχήματα Π2.11, Π2.12 Διάγραμμα 2 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_09 , θόρυβος μηχανής	165
Σχήματα Π2.13, Π2.14.. Διάγραμμα 1 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_10 , θόρυβος μηχανής	166
Σχήματα Π2.15, Π2.16. Διάγραμμα 2 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_10 , θόρυβος μηχανής	167
Σχήματα Π2.17, Π2.18. Διάγραμμα 3 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_10 , θόρυβος μηχανής	168
Σχήματα Π2.19, Π2.20. Διάγραμμα 4 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_10 , θόρυβος μηχανής	169
Σχήματα Π2.21, Π2.22. Διάγραμμα 1 ^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής	170
Σχήματα Π2.23, Π2.24. Διάγραμμα 2 ^{ης} κοπής Δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής	171
Σχήματα Π2.25, Π2.26. Διάγραμμα 3 ^{ης} κοπής Δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής	172
Σχήματα Π2.27, Π2.28. Διάγραμμα 4 ^{ης} κοπής Δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής	173
Σχήμα Π4.1.Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_01 BTS01	180
Σχήμα Π4.2.Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_01 BTS02	181
Σχήμα Π4.3.Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_02 BTS02	182
Σχήμα Π4.4.Σχήματάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_03 BTS01.....	183
Σχήμα Π5.1. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Κα_01	185
Σχήμα Π5.2 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στο δοκίμιο Κα_03.	186

Λίστα Φωτογραφιών

Φωτογραφία 1.1. Αεροφωτογραφία λατομείου.....	30
Φωτογραφία 1.2. Η τοποθεσία του λατομείου.....	30
Φωτογραφία 1.3. Η Τοποθεσία του λατομείου (Πηγή: ΥΠΕΚΑ www.latomet.gr)	31
Φωτογραφία 6.1. Οι μετρητές παραμόρφωσης στο δοκίμιο Ka_03	67
Φωτογραφία 6.2. Το δοκίμιο Ka_03 έτοιμο για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	68
Φωτογραφία 6.3 Δοκίμιο Ka_01.....	71
Φωτογραφία 6.4. Δοκίμιο Ka_03.....	71
Φωτογραφία 6.5. Δοκίμιο Ka_04.....	71
Φωτογραφία 6.6. Πρέσα του εργαστηρίου εξόρυξης πετρωμάτων.	73
Φωτογραφία 6.7. Το δοκίμιο Kb_01 BTS 01 τοποθετημένο στην εργαστηριακή συσσκευή πριν την εκτέλεση της δοκιμής.	74
Φωτογραφία 6.8, 6.9. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	75
Φωτογραφία 6.10. Λεπτομέρεια μετρητικού οργάνου Σκληροσκοπίου Shore	85
Φωτογραφία 6.11. Εργαστηριακή συσκευή Cerchar	88
Φωτογραφία 6.12. Δοκίμιο μετά από 5 δοκιμές	90
Φωτογραφία 6.13. Τα δοκίμια Kb_01, Kb_02 με τις ακίδες που χρησιμοποιήθηκαν	91
Φωτογραφία 6.14. Κοπτική ακίδα πριν χρησιμοποιηθεί.....	91
Φωτογραφία 6.15. Το μικροσκόπιο.....	92
Φωτογραφία 9.1. Το μηχάνημα Surface miner	118
Φωτογραφία 9.2. Το μηχάνημα Surface miner σε λειτουργία	119
Φωτογραφία 9.3. Το κοπτικό τύμπανο του Surface miner	120
Φωτογραφία 9.4. Το μηχάνημα Surface miner σε λειτουργία	126
Φωτογραφίες Π.1.1- Π1.10. Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_01	145
Φωτογραφίες Π.1.11- Π1.20. Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_01	146

Φωτογραφίες Π.1.21- Π1.30. Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_02	147
Φωτογραφίες Π.1.31- Π1.40. Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_02	149
Φωτογραφίες Π.1.41- Π1.50. Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_03	150
Φωτογραφίες Π.1.51- Π1.60. Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_03	152
Φωτογραφίες Π.1.61- Π1.70. Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_04	153
Φωτογραφίες Π.1.71- Π1.80. Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_04	155
Φωτογραφίες Π.1.81- Π1.90. Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_05	156
Φωτογραφίες Π.1.91- Π1.100. Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_05	158
Φωτογραφία Π2.1. Κοπή 1 ^η δοκιμίου Κα_09	164
Φωτογραφία Π2.2. Κοπή 2 ^η δοκιμίου Κα_09	165
Φωτογραφία Π2.3. Κοπή 1 ^η δοκιμίου Κα_10	166
Φωτογραφία Π2.4. 2 ^η κοπή δοκιμίου Κα_10	167
Φωτογραφία Π2.5. 3 ^η κοπή δοκιμίου Κα_10	168
Φωτογραφία Π2.6. 4 ^η Κοπή δοκιμίου Κα_10	169
Φωτογραφία Π2.7. 1 ^η Κοπή δοκιμίου Κα_11	170
Φωτογραφία Π2.8. 2 ^η Κοπή δοκιμίου Κα_11	171
Φωτογραφία Π2.9. 3 ^η Κοπή δοκιμίου Κα_11	172
Φωτογραφία Π2.10. 4 ^η Κοπή δοκιμίου Κα_11	173
Φωτογραφία Π4.1. Κάτοψη των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	179
Φωτογραφία Π4.2. Πλάγια όψη των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.	179
Φωτογραφία Π4.3, Π4.4. Το δοκίμιο Kb_01_BTS01 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	180

Φωτογραφία Π4.5, Π4.6. Το δοκίμιο Kb_01_BTS02 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	181
Φωτογραφία Π4.7, Π4.8. Το δοκίμιο Kb_02_BTS02 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	182
Φωτογραφία Π4.9, Π4.10. Το δοκίμιο Kb_03_BTS01 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	183
Φωτογραφία Π5.1. Το δοκίμιο Κα_01 μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	185
Φωτογραφία Π5.1. Το δοκίμιο Κα_03 μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	186
Φωτογραφίες Π6.1 – Π6.4 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_01	188
Φωτογραφίες Π6.5 – Π6.8 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_02	189
Φωτογραφίες Π6.9 – Π6.12 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_03	190
Φωτογραφίες Π6.13 – Π6.16 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_01	191
Φωτογραφίες Π6.17– Π6.20 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_05	192
Φωτογραφίες Π6.21 – Π6.24 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_06	193
Φωτογραφίες Π6.25 – Π6.28 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_07	194
Φωτογραφίες Π6.29– Π6.32 Κάτοψη , Πλάγια όψη και λεπτομέρειες δοκιμίου Κα_08	195

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1 Διαστασιολόγηση , μέτρηση βάρους και υπολογισμός πυκνότητας	34
Πίνακας 6.1.Χαρακτηριστικά δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για UCS	70
Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	70
Πίνακας 6.3. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson για τα δοκίμια Κα01 και Κα03.....	71
Πίνακας 6.4. Χαρακτηριστικά δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για BTS	75
Πίνακας 6.5. Αποτελέσματα δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης (BTS)	76
Πίνακας 6.6. Αποτελέσματα προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής.....	77
Πίνακας 6.7. Αποτελέσματα δοκιμών	80
Πίνακας 6.8. Αποτελέσματα υπολογισμού ταχύτητας υπερήχων με δεδομένο το ακριβές μήκος των δοκιμών.	80
Πίνακας 6.9. Αποτελέσματα υπολογισμού δυναμικού μέτρου ελαστικότητας	81
Πίνακας 6.10. Χαρακτηρισμός πετρωμάτων με βάση τη σκληρότητα	86
Πίνακας 6.11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής Shore	87
Πίνακας 6.12. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα δοκιμών	93
Πίνακας 6.13. Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον δείκτη αποξεστικότητας..	94
(Θ. Μιχαλακόπουλος et al, 2005).....	94
Πίνακας 6.14. Χαρακτηρισμός δοκιμών βάση της Μ.τ. του δείκτη CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 40.	94
Πίνακας 6.15. Χαρακτηρισμός δοκιμών βάση της μ.τ. του δείκτη CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 55.	94
Πίνακας 8.4. Η Ειδική ενέργειας εκσκαφής	116
Πίνακας 8.3. Ο εξορυγμένος όγκος μετά από κάθε κοπή.....	115
Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα από τη δοκιμή κοπής.....	113
Πίνακας 8.2. Μεταβολή βάρους δοκιμών μετά από κάθε κοπή	115
Πίνακας Π3.5. Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_05.....	177
Πίνακας Π3.1. Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_01	175
Πίνακας Π3.2. Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_02.....	175
Πίνακας Π3.3. Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_03.....	176
Πίνακας Π3.4. Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_04.....	176

Πίνακας Π1.1. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55.	139
Πίνακας Π1.2. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55.	139
Πίνακας Π1.3. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55.	140
Πίνακας Π1.4. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55.	140
Πίνακας Π1.5. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55.	141
Πίνακας Π1.6. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 40.	141
Πίνακας Π1.7. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_02 με ακίδα 40.	142
Πίνακας Π1.8. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_03 με ακίδα 40.	142
Πίνακας Π1.9. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_04 με ακίδα 40.	143
Πίνακας Π1.10. Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_05 με ακίδα 40.	143
Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων	196

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

1.1.1 Η Εξόρυξη

Εξόρυξη των πετρωμάτων ονομάζεται ένα σύνολο εργασιών (unit operations) που πραγματοποιούνται προκειμένου να αποσπαστεί τμηματικά το πέτρωμα από την φυσική του θέση. Τούτο 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. Το μεγαλύτερο ποσοστό της εξορυκτικής βιομηχανίας στην Ελλάδα αφορά την εξόρυξη ασβεστόλιθων κυρίως για την παραγωγή αδρανών υλικών. Ο χώρος όπου πραγματοποιείται η εξόρυξη ονομάζεται μέτωπο. Τα μέτωπα διακρίνονται σε υπόγεια και υπαίθρια, οι δε διαστάσεις και η γεωμετρία τους ποικίλουν ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίον πραγματοποιείται η εξόρυξη, τον επιθυμητό ρυθμό εξόρυξης, την μέθοδο και τα μέσα που χρησιμοποιούνται. Προκειμένου να συνεχίζονται οι εργασίες εξόρυξης του πετρώματος στο μέτωπο (προχώρηση του μετώπου), το εξορυγμένο πέτρωμα πρέπει να απομακρύνεται από αυτό. Επομένως, οι εργασίες της φόρτωσης - μεταφοράς - απόθεσης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του κύκλου της εξόρυξης των πετρωμάτων.

Οι δύο λόγοι που οδηγούν κυρίως στην εξόρυξη των πετρωμάτων είναι οι εξής:

- 1) Επειδή το πέτρωμα έχει οικονομική αξία και αποτελεί αντικείμενο εμπορίας, ως έχει ή κατόπιν επεξεργασίας. Στην περίπτωση αυτή ο όγκος του πετρώματος χαρακτηρίζεται ως κοιτάσμα και η εξόρυξη αποτελεί μέρος των εργασιών εκμετάλλευσης του κοιτάσματος.
- 2) Προκειμένου να δημιουργηθεί κενός χώρος στην μάζα του πετρώματος ή να διαμορφωθεί η επιφάνειά του ώστε να χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια π.χ.

για την θεμελίωση ενός έργου, την διέλευση ενός δρόμου, την κατασκευή ενός υπόγειου έργου κα. Στην περίπτωση αυτή το πέτρωμα δεν έχει, συνήθως, οικονομική αξία και απορρίπτεται.

1.1.2 Τα Αδρανή υλικά

Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα, φυσικά ή βιομηχανικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα τεχνικά έργα είτε με άλλο συγκολλητικό υλικό ή αυτούσια. Ανάλογα με την προέλευση τους χωρίζονται σε φυσικά, τεχνητά ή ανακυκλωμένα. Αδρανή ονομάστηκαν γιατί όταν αναμειχθούν με τσιμέντο ή άλλο υλικό δεν συμμετέχουν ενεργά στην πήξη του κονιάματος. Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Για τον καθορισμό του μεγέθους χρησιμοποιούνται μεγάλα κόσκινα. Για την παρασκευή σκυροδέματος τα αδρανή υλικά περνούν από ελέγχους της χημικής τους σύστασης πριν χρησιμοποιηθούν.

Η εξόρυξη τους πραγματοποιείται κυρίως με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Αυτό συμβαίνει, διότι τα εκρηκτικά παρέχουν χαμηλότερο κόστος στην εξόρυξη των πετρωμάτων. Έτσι και στον ελλαδικό χώρο καθιερώθηκε πως η εξόρυξη των ασβεστόλιθων γίνεται με εκρηκτικές ύλες αγνοώντας ή και παραβλέποντας πολλές φορές τόσο τα μειονεκτήματα από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου εξόρυξης, όσο και τα πλεονεκτήματα της εξόρυξης τους με διαφορετικό τρόπο.

Παρά όλα αυτά αποτελεί απαίτηση της σημερινής εποχής μια ισορροπημένη προσέγγιση και σύνθεση των οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων για τη βέλτιστη λειτουργία της εξορυκτικής βιομηχανίας.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την εξόρυξη ενός πετρώματος αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα. Όμως, σύμφωνα με την εμπειρική προσέγγιση – η οποία κατά κύριο λόγο ακολουθείται στην Ελλάδα - για την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης ισχύει ότι τα «μαλακά» πετρώματα εξορύσσονται με μηχανικά μέσα ενώ τα «σκληρά» με εκρηκτικές ύλες.

Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες

Όταν η εξόρυξη πραγματοποιείται με την χρήση εκρηκτικών υλών, η απαιτούμενη ενέργεια για τον τεμαχισμό και την απόσπαση του πετρώματος από την φυσική του θέση, προέρχεται από την 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 (ωστικό κύμα), ασκεί τάσεις στην μάζα του προς εξόρυξη πετρώματος.

Εξόρυξη με μηχανικά μέσα

Στην περίπτωση της μηχανικής εξόρυξης των πετρωμάτων, με την 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 φυσική τους θέση.

Σε αυτή τη μέθοδο αναγνωρίζονται τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

1. Αποφεύγεται η διάτρηση και η ανατίναξη
 - Λιγότερες δονήσεις
 - Δεν εκτοξεύονται θραύσματα (fly-rock)
2. Λιγότερος θόρυβος και σκόνη
3. Μικρότερη κοκκομετρία απευθείας με την εξόρυξη.
 - Το υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας
 - Λόγω του μεγέθους το υλικό μπορεί να φορτωθεί χωρίς να προκαλεί ζημιά
 - Το υλικό μπορεί να μεταφερθεί απ' ευθείας από το σύστημα μεταφοράς
 - Δεν χρειάζεται προρηγμάτωση

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εργαστηριακή διερεύνηση της εξορυξιμότητας του συγκεκριμένου ασβεστόλιθου με μηχανικά μέσα. Δηλαδή ,μέσω του προσδιορισμού των διαφόρων ιδιοτήτων του πετρώματος που προαναφέρθηκαν, να προσδιορίσουμε αν είναι δυνατή η εξόρυξη του συγκεκριμένου πετρώματος με μηχανικά μέσα.

Επισημαίνεται πως στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της εξορυξιμότητας του συγκεκριμένου πετρώματος με μηχανικά μέσα. Σε καμία περίπτωση δεν προτείνεται συγκεκριμένος τρόπος εξόρυξης καθώς για την σωστή προσέγγιση αυτού του ζητήματος θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και άλλοι παράγοντες (οικονομικοί, περιβαλλοντικοί κλπ.)

1.3 Εργαστηριακές δοκιμές

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την εξορυξιμότητα των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα, της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και της ειδικής ενέργειας εκσκαφής, έγιναν μια σειρά από δοκιμές. Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Uniaxial Compressive Strength)
Με αυτή τη δοκιμή υπολογίσαμε άμεσα την αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη
2. Έμμεση δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό μέσω αντιδιαμετρικής θλίψης(BTS).
Την έμμεση δηλαδή, μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος.
3. Σκληρομέτρηση με σκληρόμετρο Shore
Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της σκληρότητας κατά Shore αλλά και του δείκτη πλαστικότητας του πετρώματος.
4. Δοκιμή μέτρησης της αποξεστικής ικανότητας (Cerchar).
5. Δοκιμή ταχύτητας υπερήχων (Pundit)
6. Δοκιμή κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου για τον προσδιορισμό της ειδικής ενέργειας εκσκαφής.

1.4 Οργάνωση της Διπλωματικής εργασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και τα στοιχεία τα οποία πραγματεύονται.

Κεφάλαιο 1. Παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για το αντικείμενο και το σκοπό της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την γεωλογία και την τοποθεσία της περιοχής καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά των ασβεστόλιθων. Επίσης γίνεται αναφορά στα δείγματα ,την διαμόρφωση των δοκιμίων και τις προκαταρκτικές μετρήσεις που εκτελέστηκαν (διαστάσεις δοκιμίων, πυκνότητα πετρώματος).

Κεφάλαιο 3. Παρατίθενται στοιχεία για την εξορυξιμότητα των πετρωμάτων και αναλύονται οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Κεφάλαιο 4. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η συμπεριφορά του πετρώματος στην κοπή δίνοντας έμφαση στα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου.

Κεφάλαιο 5. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες θεωρίες κοπής που έχουν διατυπωθεί για την κοπή με κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.

Κεφάλαιο 6. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι δοκιμές στις οποίες έγιναν προσδιορίζοντας τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος (μονοαξονική θλίψη, αντιδιαμετρική θλίψη, σκληρομέτρηση, δοκιμή ταχύτητας υπερήχων, δοκιμή αποξεστικότητας CERCHAR).

Κεφάλαιο 7. Περιγράφεται η ειδική ενέργεια εκσκαφής, τα χαρακτηριστικά που την επηρεάζουν και η συσχέτιση της με την μηχανική εξόρυξη ενός πετρώματος.

Κεφάλαιο 8. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην εργαστηριακή δοκιμή της κοπής και στον υπολογισμό της ειδικής ενέργεια εκσκαφής του πετρώματος.

Κεφάλαιο 9. Γίνεται ανάλυση του μηχανήματος Surface miner, τα τεχνικά του χαρακτηριστικά καθώς και η εξόρυξη ασβεστόλιθου με το συγκεκριμένο μηχάνημα.

Κεφάλαιο 10. Μετά τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος, σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και εξάγονται συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

2.1. Ασβεστόλιθος

2.1.1. Ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά

Οι ασβεστόλιθοι είναι ιζηματογενή πετρώματα που έχουν ως κύριο ορυκτολογικό τους συστατικό τον ασβεστίτη (CaCO_3). Επομένως, η χημική σύσταση ενός καθαρού ασβεστολιθικού πετρώματος είναι CaO 56%, CO_2 44%. Συνήθως, όμως, οι ασβεστόλιθοι περιέχουν διάφορες προσμίξεις ενώσεων οξειδίων και υδροξειδίων του αργιλίου, του σιδήρου κ.ά. η παρουσία των οποίων επηρεάζει και το χρωματισμό του πετρώματος.

Όταν οι ασβεστόλιθοι περιέχουν 5-15% MgO καλούνται μαγνησιούχοι ασβεστόλιθοι, ενώ όταν η περιεκτικότητά τους σε MgO είναι πάνω από 15% καλούνται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι.

Οι ασβεστόλιθοι με την επίδραση αραιού υδροχλωρικού οξέος αναβράζουν χαρακτηριστικά λόγω έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα ($\text{CaCO}_2 + 2\text{HCl} > \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) και το γεγονός αυτό διευκολύνει στην ευχερή αναγνώρισή τους στην ύπαιθρο.

Οι ασβεστόλιθοι έχουν προέλθει ή από βιογενή, ή από χημικά ιζήματα, ή από ιζήματα συνδυασμού βιογενούς και χημικής δράσης.

Τα ασβεστολιθικά πετρώματα, εκτός από τα απολιθώματα που τα χαρακτηρίζουν, έχουν και όψη που ποικίλλει ανάλογα με την περίοδο και το χώρο που έλαβε χώρα η ιζηματογένεση. Έτσι, οι ασβεστόλιθοι των διάφορων γεωλογικών περιόδων παρουσιάζουν μακροσκοπικές διαφορές, οι οποίες σε πρώτη αναγνώριση είναι καθοδηγητικά στοιχεία για τη στρωματογραφική τους διαίρεση. Καθώς, λοιπόν, η ιζηματογένεση των ασβεστολιθικών αποθέσεων έλαβε χώρα είτε σε αβαθή, είτε σε βαθιά γεωσύγκλινα, το χρώμα τους που ποικίλλει ανάλογα με τις προσμίξεις, σχετίζεται σε πολλές περιπτώσεις και με το χώρο της ιζηματογένεσης.

Γενικά, οι μαύροι ασβεστόλιθοι σχηματίστηκαν σε αβαθή νερά, κοντά σε παράκτιες ζώνες όπου παρασύρθηκαν διάφοροι χερσαίοι οργανισμοί.

2.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ασβεστολίθων

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 δε 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.

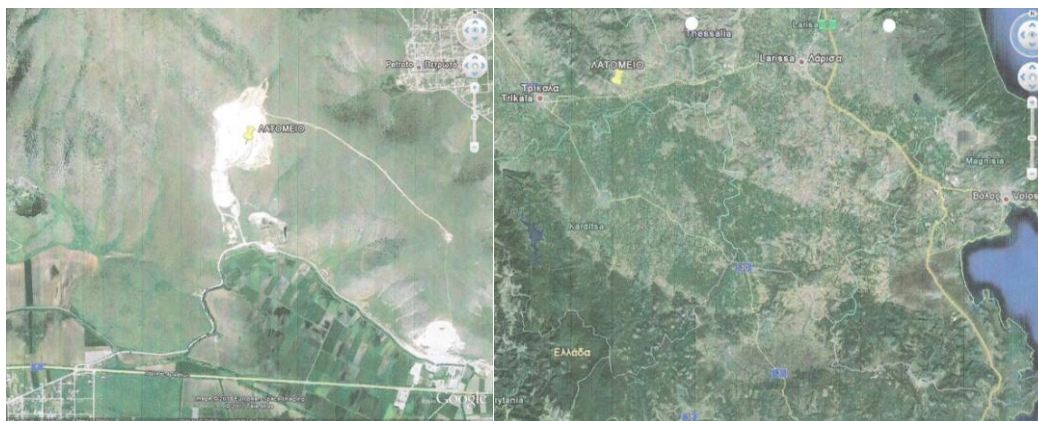
Αντίθετα η περιεχόμενη στους ασβεστόλιθους άργιλος μειώνει την αντοχή τους. Οι καθαροί ασβεστόλιθοι και δολομίτες λειαινούνται και στιλβώνονται εύκολα, όταν δεν έχουν πόρους, και ανήκουν στα μαλακά πετρώματα (σκληρότητα ασβεστίτη=3 Mohs). Οι δολομίτες ανήκουν στα μαλακά ως ημίσκληρα πετρώματα. Ορισμένοι 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 υμένα, 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 ασβεστολίθων και των δολομιτών, η επιφάνειά τους με τη βροχή γίνεται γρήγορα τραχεία. Γι' αυτό οι στιλπνές επιφάνειες των πλακών επενδύσεως από ανθρακικά πετρώματα χάνουν σχετικά γρήγορα τη στιλπνότητα 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 επιφανειακά 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. τραβερτίνες) 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.

2.2 Η τοποθεσία του λατομείου

Το λατομείο βρίσκεται στον νομό Τρικάλων στην λατομική περιοχή Πετρωτού δίπλα στο χωριό Πετρόπορο όπως φαίνεται στις φωτογραφίες 1.1,1.2,1.3. Οι συντεταγμένες της τοποθεσίας είναι $39^{\circ}15'33.70''$ Β, $22^{\circ}20'45.90''$ Ε και σε υψόμετρο περίπου 100 μέτρων από το ύψος της θάλασσας. Την εκμετάλλευση του έχει αναλάβει η εταιρεία ΛΑΤΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΒΟΥΛΑΣ ΑΒΕΕ.



Φωτογραφία 1.1. Αεροφωτογραφία
λατομείου

Φωτογραφία 1.2. Η τοποθεσία του
λατομείου



Φωτογραφία 1.3. Η Τοποθεσία του λατομείου (Πηγή: ΥΠΕΚΑ www.latomet.gr)

2.3 Το κοίτασμα

Πληροφορίες για την φύση του ασβεστολιθικού κοιτάσματος της περιοχής αντλήθηκαν από γεωλογικούς χάρτες της περιοχής. (βλ. Σχήμα 2.1). Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής (χάρτης ΙΓΜΕ, φύλλο Τρίκαλα, 1969, κλίμακα 1:50.000) έχουμε:

- Κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους μεσόκοκκους ή στιφρούς χρώματος λευκού. Επαναπαύονται κανονικά επί των κρυσταλλικών σχιστολίθων.
- Κρυσταλλικούς σχιστόλιθους μη διαχωριζόμενους.



Σχήμα 2.1. Γεωλογικός Χάρτης περιοχής

2.4 Δειγματοληψία, διαμόρφωση δοκιμών και μετρήσεις

Η δειγματοληψία των πετρωμάτων γίνεται συνήθως με τους παρακάτω τρόπους.

- Με την εκτέλεση δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, όπου υπάρχει η δυνατότητα δειγματοληψίας στο επιθυμητό βάθος
- Δειγματοληψία σε επιφανειακές εμφανίσεις πετρώματος

Και στις δύο περιπτώσεις, για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών απαιτείται η κανονική διαμόρφωση δειγμάτων, ανάλογα με το είδος της δοκιμής που πρόκειται να εκτελεστεί. Η δειγματοληψία της επιφανειακής μάζας του πετρώματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και πείρα, καθώς τα δείγματα που θα ληφθούν πρέπει να είναι όσον το δυνατό περισσότερο αντιπροσωπευτικά της μάζας του πετρώματος. Επειδή όμως η μάζα του πετρώματος είναι κατά κύριο λόγο ανομοιογενής τα δείγματα που θα ληφθούν από μια συγκεκριμένη θέση είναι δυνατόν 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 αλλάζουν σημαντικά σε όλη της την έκταση.

Τα δείγματα εξορύσσονται από τη μάζα του πετρώματος σε ογκόλιθους μορφής κύβου. Σε 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 θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το πέτρωμα έχει ήδη υποβληθεί σε μία δυναμική εντατική κατάσταση που ενδεχόμενα να έχει προκαλέσει τη δημιουργία νέων ή την επέκταση των υφιστάμενων μικρορωγμών στο πέτρωμα.

Η δειγματοληψία με τον τρόπο αυτό είναι εύκολη αλλά έχει τρία μειονεκτήματα:

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

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

- Κανονικό, δηλαδή κυλινδρικής ή σπάνια κυβικής μορφής
- Ακανόνιστο
- Ειδικής μορφής

Συνήθως οι μηχανικές ιδιότητες προσδιορίζονται σε κυλινδρικά δοκίμια με τυπικές διαμέτρους μεταξύ 5,4 και 7,5 cm ενώ σπάνια χρησιμοποιούνται διάμετροι μέχρι 10 ή και 15 cm. Τα δοκίμια μορφής πυρήνα που προκύπτουν από τη διάτρηση του δείγματος ελέγχονται μακροσκοπικά και στη συνέχεια αποκόπτονται στα άκρα με αδαμαντοτροχό σε κατάλληλα μήκη ανάλογα με το είδος της προβλεπόμενης εργαστηριακής δοκιμής. Ακολουθεί η λείανση της κυλινδρικής επιφάνειας - εάν είναι αναγκαία - σε τόρνο και των βάσεων σε ειδικό δίσκο λείανσης. Σε ένα ιδανικά διαμορφωμένο δοκίμιο οι βάσεις είναι παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στον κατακόρυφο άξονα του δοκιμίου.

Η διαμόρφωση των δοκιμίων έγινε με τη βοήθεια ειδικού μηχανήματος στο εργαστήριο εξόρυξης πετρωμάτων ΕΜΠ. Το σχήμα των δοκιμίων είναι κυλινδρικό με διάμετρο 54,7 mm (NX).

Μετρήσεις

Για να υπολογιστεί η πυκνότητα του πετρώματος αλλά και για να αποκτηθεί πλήρης εικόνα για τις ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων διενεργήθηκαν οι μετρήσεις που φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πραγματοποιήθηκαν έξι μετρήσεις της διαμέτρου του πετρώματος και δύο μετρήσεις του μήκους του - για να προσεγγιστούν όσο το δυνατόν περισσότερο τα πραγματικά μήκη- και μέτρηση του βάρους των δοκιμίων.

Θεωρώντας την επιφάνεια του δοκιμίου ελλειπτική υπολογίστηκε το εμβαδό της επιφάνειας των βάσεων και στη συνέχεια ο όγκος των δοκιμίων και η πυκνότητα του πετρώματος όπως φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 2.1.

	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ (mm)						ΜΕΤ. ΜΗΚΟΥΣ (mm)		
Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	1	2	ΒΑΡΟΣ(gr)
Ka_01	53,95	53,98	54,01	53,97	53,91	53,93	143,93	143,38	884,8
Ka_02	53,92	53,91	54,16	53,93	54,03	54,11	152,48	152,54	944,5
Ka_03	54,00	53,94	54,02	54,01	54,07	54,00	146,63	146,58	906,1
Ka_04	54,00	54,00	54,18	53,94	53,98	54,05	129,80	129,73	801,6
Ka_05	53,96	54,06	53,98	54,05	53,96	53,88	146,26	146,22	902,0
Ka_06	53,90	53,84	53,96	53,92	54,05	54,06	146,43	146,60	905,3
Ka_07	53,96	53,98	54,05	54,16	54,01	54,02	149,34	149,40	924,4
Ka_08	54,06	54,02	53,91	53,98	53,98	54,01	143,66	143,54	882,6

	ΕΜΒΑΔΟ 10 ⁻² m ²					
M.T. ΜΗΚΟΥΣ	1	2	3	M.T. ΕΜΒ.	ΟΓΚΟΣ 10 ⁻⁴ m ³	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ t/m ³
143,655	0,2286	0,229	0,230	0,2285	3,28328	2,695
152,510	0,2282	0,229	0,230	0,2289	3,49234	2,704
146,605	0,2287	0,229	0,230	0,2289	3,35671	2,699
129,765	0,2289	0,229	0,230	0,2291	2,97315	2,696
146,240	0,2290	0,229	0,230	0,2287	3,34525	2,696
146,515	0,2278	0,228	0,230	0,2285	3,34824	2,704
149,370	0,2287	0,230	0,230	0,2291	3,42297	2,701
143,600	0,2292	0,228	0,230	0,2288	3,28628	2,686

Πίνακας 2.1. Διαστασιολόγηση , μέτρηση βάρους και υπολογισμός πυκνότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1 Γενικά

Τα πετρώματα ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους και τις μεταγενετικές επιδράσεις που υπέστησαν, παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες, με συνέπεια να παρουσιάζουν ποικίλη συμπεριφορά κατά την εξόρυξή τους. Είναι σαφές, ότι η εξορυξιμότητα του πετρώματος θα επηρεάζεται και από τον εξοπλισμό ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξόρυξή του. Έτσι λοιπόν η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων θα πρέπει να αναφέρεται σε συγκεκριμένο μηχανικό μέσο εξόρυξης αλλά και μέθοδο εκσκαφής.

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 αερόσφουρα, μέχρι τα πλέον ισχυρά και ογκώδη όπως είναι ο υδραυλικός μετωπικός εκσκαφέας (shovel) ή ο καδοφόρος εκσκαφέας.

Η εκσκαπτική αερόσφουρα 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 αερόσφουρας και

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

Συνεπώς, για την επίτευξη χαμηλού κόστους εξόρυξης και μεγάλης παραγωγής το πρώτο σύστημα (εκσκαπτική αερόσφουρα) 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 είναι διαθέσιμα.

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 ενός 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 ιδιότητές 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. Σημειώνεται ότι η έννοια του πετρώματος είναι ευρεία και καλύπτει όλο το φάσμα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στις εκμεταλλεύσεις και τα τεχνικά έργα, όπου πραγματοποιείται μηχανική εξόρυξη. Την εξόρυξη του πετρώματος με μηχανικά μέσα επηρεάζουν οι παρακάτω ιδιότητες (παράμετροι) του πετρώματος:

1. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, όπως προκύπτει από την κλασική δοκιμή ή από την δοκιμή σημειακής φόρτισης, μέσω του Δείκτη Σημειακής Φόρτισης (I_s). Ο δείκτης I_s ή η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, που προκύπτει με βάση τον I_s , χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση της εξορυξιμότητας και την ταξινόμηση των πετρωμάτων, μαζί με άλλα χαρακτηριστικά τους.

2. Η αντοχή σε εφελκυσμό. Η δύναμη κοπής, που πρέπει να αναπτύξουν κοπτικά εργαλεία τύπου σφήνας και κωνικής σφήνας για την εξόρυξη ψαθυρών πετρωμάτων, είναι συνάρτηση της αντοχής των τελευταίων σε εφελκυσμό (Βλέπε π.χ. θεωρία κοπής πετρωμάτων του Evans).

3. Η αντοχή σε διάτμηση. Η διατμητική αντοχή αποτέλεσε την βάση για την διατύπωση θεωριών αστοχίας των πετρωμάτων, όπως των θεωριών Coulomb και Mohr. Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί ως η βασική παράμετρος για την διατύπωση των θεωριών κοπής των πετρωμάτων του Merchant και του Nishimatsu.

4. Η σκληρότητα των πετρωμάτων έχει χρησιμοποιηθεί από μεγάλο αριθμό ερευνητών για την εκτίμηση της εξορυξιμότητάς των καθώς και της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Έχει επικρατήσει στα πετρώματα να προσδιορίζεται η σκληρότητα διείσδυσης και η σκληρότητα ανάκρουσης 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 (Brown, 1981 - McFeat-Smith, 1977):

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

όπου:

K : Συντελεστής πλαστικότητας, %

H₂₀ : Τελική τιμή σκληρότητας ύστερα από 20 ανακρούσεις στο ίδιο σημείο

H₁ : Τιμή σκληρότητας ύστερα από μία ανάκρουση

Με βάση τον συντελεστή πλαστικότητας τα πετρώματα διακρίνονται σε πλαστικά (μεγάλες τιμές του συντελεστή K) και ψαθυρά (μικρές τιμές του συντελεστή K). Τα πλαστικά πετρώματα παραμορφώνονται περισσότερο από τα ψαθυρά κάτω από την επίδραση της ίδιας τάσης. Πολλά μαλακά πετρώματα, όπως είναι ο άνθρακας και ο μη συνεκτικός ψαμμίτης, παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές συντελεστή πλαστικότητας, καθόσον είναι εξαιρετικά ψαθυρά. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ψαθυρότητα/πλαστικότητα των πετρωμάτων και η σκληρότητα των

πετρωμάτων, όπως αυτές προκύπτουν από την δοκιμή κατά Shore, είναι δύο τελείως διαφορετικές ιδιότητες.

5. Η τριβή μεταξύ πετρώματος και μετάλλων. Κατά προσέγγιση ο συντελεστής τριβής πετρώματος/χάλυβα υπολογίζεται με την βοήθεια του συντελεστή εσωτερικής τριβής του πετρώματος.

6. Η αντίσταση στην κοπή. Η αντίσταση κοπής των πετρωμάτων εκφράζει την δύναμη που πρέπει να αναπτύξει η κοπτική ακμή του εργαλείου κοπής, προκειμένου να αστοχήσει το πέτρωμα κατά την εκσκαφή του. Ως ειδική αντίσταση κοπής ή εκσκαφής ορίζεται η ανηγμένη αντίσταση κοπής στην μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής του εργαλείου (kg/cm) ή στην μονάδα επιφανείας του αποκοπτόμενου τμήματος του πετρώματος (kg/cm²). Οι τιμές της ειδικής αντίστασης εκσκαφής των πετρωμάτων είναι προφανές ότι, ανεξαρτήτως του τρόπου εκφράσεως, κυμαίνονται εντός ευρέων ορίων, καθόσον αυτή εξαρτάται από την μορφή του κοπτικού εργαλείου, τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται η δύναμη κοπής και από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης εκσκαφής επιτυγχάνεται με την βοήθεια κατάλληλων διατάξεων στο εργαστήριο ή επί τόπου.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης κοπής των πετρωμάτων επί τόπου, και κυρίως όταν εξορύσσονται με καδοφόρους εκσκαφείς, ο οίκος Orenstein & Koppel (Ο&Κ) σχεδίασε φορητή συσκευή, με την οποία επιτυγχάνεται η θραύση πρισματικών ή κυλινδρικών δοκιμίων κατά την δειξοδυσή μιας τυποποιημένης σφήνας,. Από τις δοκιμές με την συσκευή αυτή (μέθοδος Ο&Κ) υπολογίζεται η ειδική αντίσταση κοπής του πετρώματος σύμφωνα με τις σχέσεις (Orenstein & Koppel,-):

$$P = F/L \text{ (kg/cm)}$$

όπου:

P : ειδική αντίσταση κοπής, kg/cm

F : φορτίο κατά την θραύση, kg

L : μήκος ακμής σφήνας, cm

7. Τα συστήματα ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος. Η πλέον σημαντική διαφορά μεταξύ της μάζας πετρώματος και του αντίστοιχου άρρηκτου πετρώματος, από το οποίο συγκροτείται η μάζα του πετρώματος, είναι ως γνωστόν η παρουσία στην πρώτη των πάσης φύσεως συστημάτων ασυνεχειών, που διαφοροποιούν κατά πολύ τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων στην κλίμακα που πραγματοποιείται η εξόρυξή τους με μηχανικά μέσα.

Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά του εξορυγμένου πετρώματος, που επηρεάζουν την επίδοση του συστήματος εξόρυξης - φόρτωσης - αποκόμισης, 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 όγκου του χαλαρού (εξορυγμένου) πετρώματος. Ο συντελεστής επιπλήσματος προσδιορίζει τον όγκο του πετρώματος που γεμίζει τους κάδους των μηχανημάτων εξόρυξης.

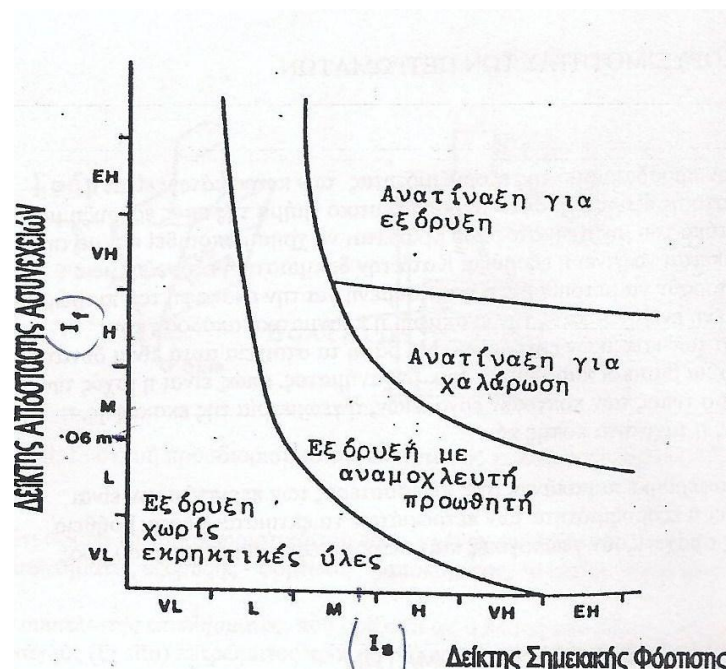
2. Το μέγεθος των παραγομένων τεμαχίων. Το μέγεθος των τεμαχίων του εξορυγμένου πετρώματος εξαρτάται από τις διαστάσεις της εντομής που πραγματοποιεί το μηχάνημα εξόρυξης στο μέτωπο, τα συστήματα των ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος και από την διάταξη των κοπτικών εργαλείων. Το σχήμα και το μέγεθος 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 συγκόλλησης στις μεταλλικές επιφάνειες. Πετρώματα γαιώδους μορφής, ορισμένες άργιλοι και μάργες, έχουν την τάση να προσκολλώνται στις μεταλλικές επιφάνειες των κάδων των μηχανημάτων εξόρυξης, μειώνοντας την ωφέλιμη χωρητικότητά τους, καθώς και στις επιφάνειες των μηχανημάτων και διατάξεων φόρτωσης-μεταφοράς. Η τάση συγκόλλησης εξαρτάται από την φύση του πετρώματος και το ποσοστό της υγρασίας του.

3.4 Εκτίμηση της εξορυξιμότητας ενός πετρώματος

Τα κριτήρια εξορυξιμότητας αφορούν γενικά την εξόρυξη πετρωμάτων με διάφορους τύπους μηχανημάτων. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες εκτίμησης της εξορυξιμότητας ενός πετρώματος.

Χρησιμοποιώντας τον δείκτη ασυνεχειών του πετρώματος και τον δείκτη σημειακής φόρτισης κατατάσσεται η μάζα του πετρώματος από πλευράς εξορυξιμότητας όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα για την επιλογή μεθόδου εξόρυξης με βάση το δείκτη ασυνεχειών κατά Franklin. (Γ. Παναγιώτου 2003)

Ο Atkinson (1971) κρίνει την δυνατότητα εξόρυξης ενός πετρώματος από την ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων. Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί ο γεωλογικός χαρακτηρισμός των πετρωμάτων ως μια πρώτη εκτίμηση της εξορυξιμότητας τους.

Σύμφωνα με τους Muftuoglu και Scoble προτείνεται ένας δείκτης εξορυξιμότητας. Ο Δείκτης εξορυξιμότητας προκύπτει, κατά τους ανωτέρω, από την αξιολόγηση τεσσάρων παραμέτρων:

- Του βαθμού αποσάθρωσης του πετρώματος.

- Της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ή εναλλακτικά του δείκτη σημειακής φόρτισης του άρρηκτου πετρώματος.
- Της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών.
- Της απόστασης μεταξύ των επιπέδων διάστρωσης του πετρώματος.

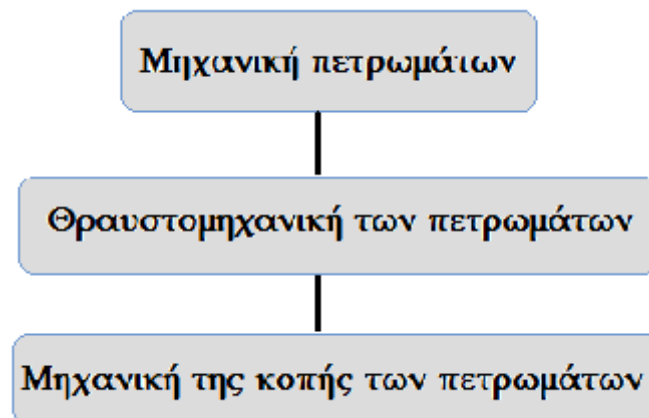
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

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, ανομοιόμορφου εντατικού πεδίου λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας των μηχανικών μέσων επιβολής του φορτίου (κοπτικά εργαλεία)

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

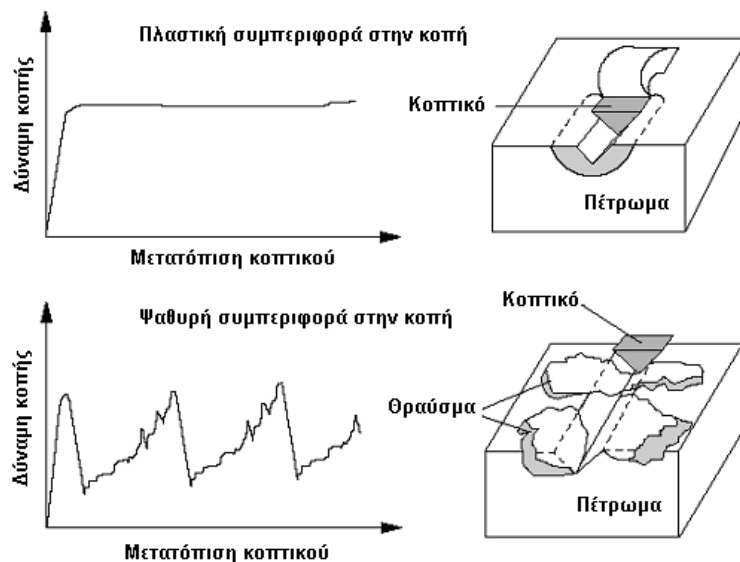
γ) εμφάνιση δυναμικών φαινομένων λόγω της μεταβλητής διεπιφάνειας πετρώματος-κοπτικού εργαλείου

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 στο Κεφάλαιο 5 .

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.



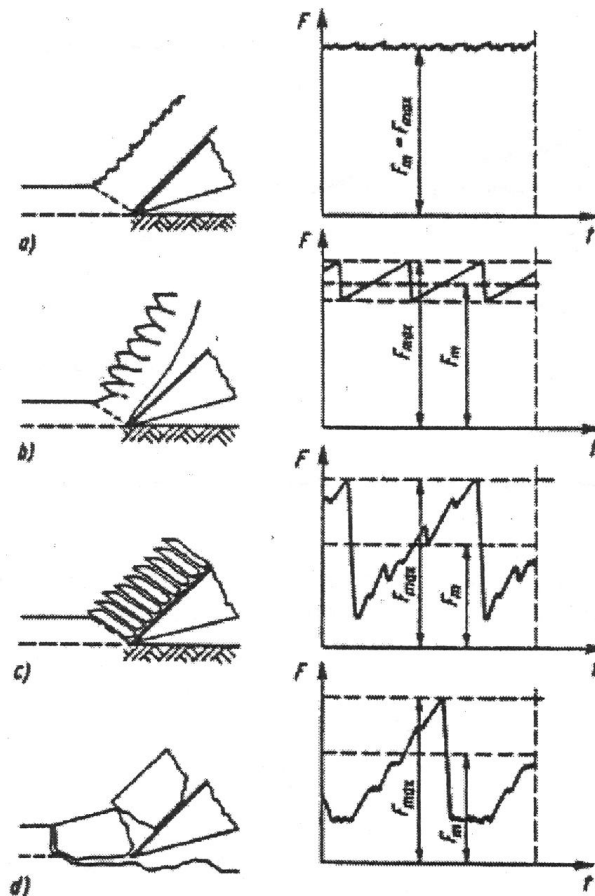
Σχήμα 4.1. Τύποι αποσύνθεσης του πετρώματος κατά την κοπή κατά Deketh et al, 1998 (Αναγνώστου 2006)

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, Johnston, 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.



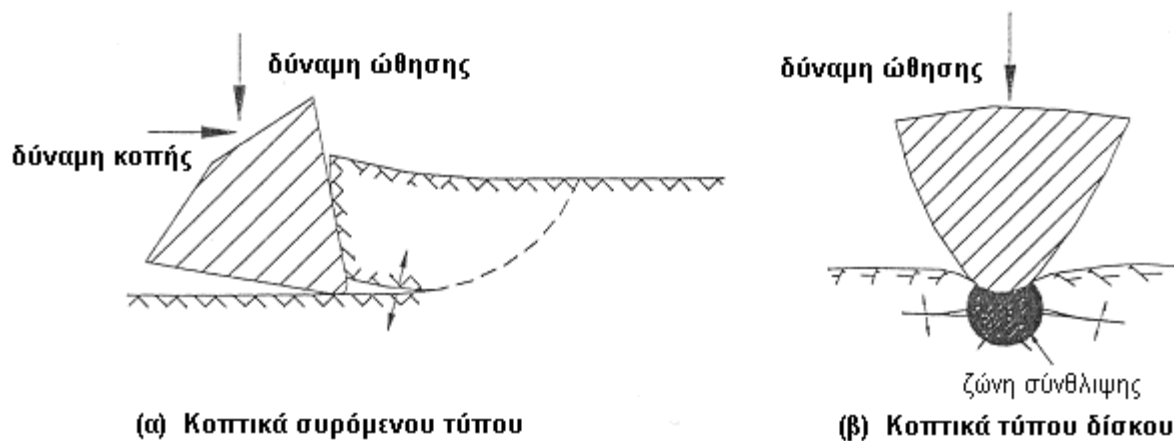
Σχήμα 4.2. Διακύμανση της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου για α) πολύ πλαστικό β) πλαστικό γ) ψαθυρό δ) πολύ ψαθυρό πέτρωμα, (Παναγιώτου, 1999)

4.3. Κοπτικά εργαλεία

Υπάρχουν δύο κύριες 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 σ' 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

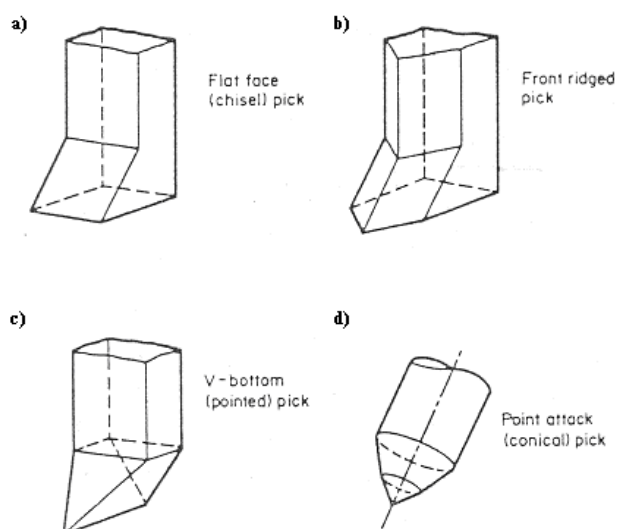
εργαλεία τύπου δίσκου η κύρια δύναμη που προκαλεί την θραύση του πετρώματος είναι η ώθηση (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3. Δυνάμεις που προκαλούν θραύση του πετρώματος για κοπτικά α) συρόμενου τύπου, β) τύπου δίσκου. (Αναγνώστου 2006)

Τα κοπτικά συρόμενου τύπου διακρίνονται περαιτέρω σε:

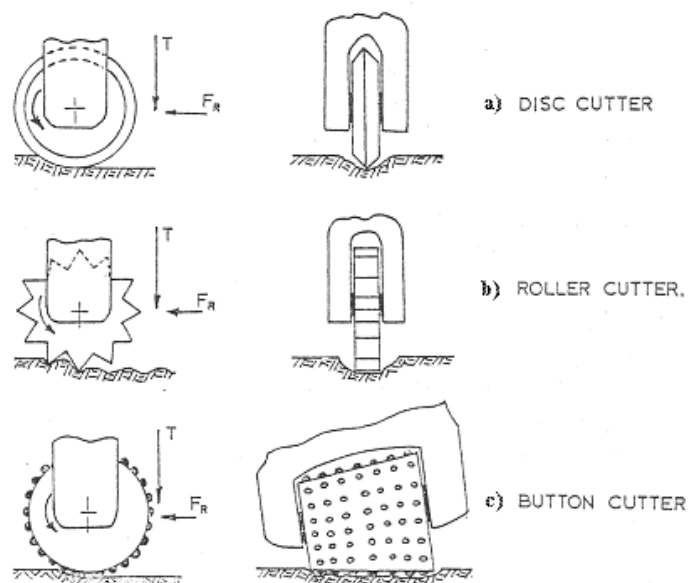
- α) κοπτικά τύπου σμίλης (chisel picks) και
- β) κοπτικά σημειακής προσβολής (point attack picks). (βλ. σχήμα 4.4)



Σχήμα 4.4. Κοπτικά συρόμενου τύπου: α), β), γ) κοπτικά τύπου σμίλης δ) 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 4.5. 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 γίνεται βάσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος το οποίο μπορούν “αποτελεσματικά” να προσβάλλουν, (πίνακας 4.1). Η αποτελεσματικότητα ενός κοπτικού σχετίζεται 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.

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

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

4.4. Κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου

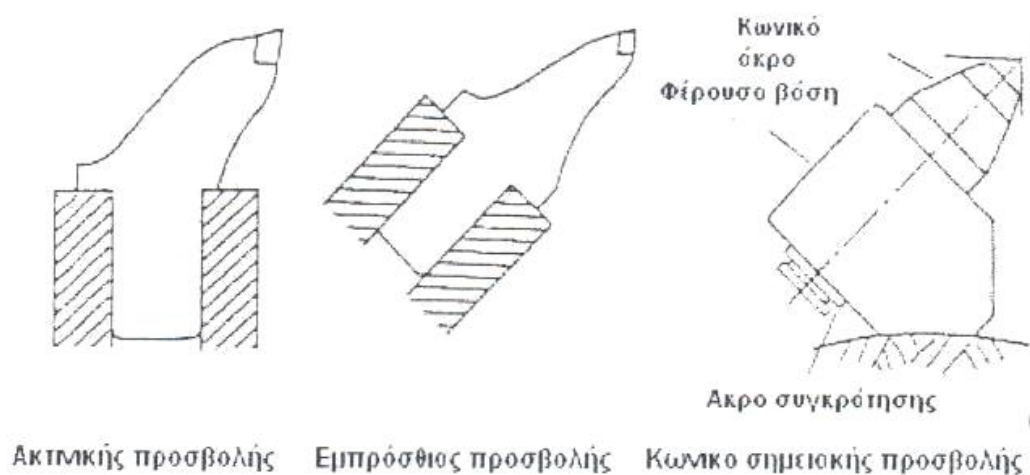
Τα κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου χρησιμοποιούνται σε όλα τα μηχανήματα εκσκαφής γαιάνθρακα και “μαλακών” πετρωμάτων και έχουν διάφορα σχήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Συνίστανται από ένα σώμα από χαλύβδινο κράμα με προσθήκη μιας κοπτικής ακμής από καρβίδιο του βολφραμίου.

Τα κοπτικά σημειακής προσβολής είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα σε παγκόσμια κλίμακα διότι έχουν 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.

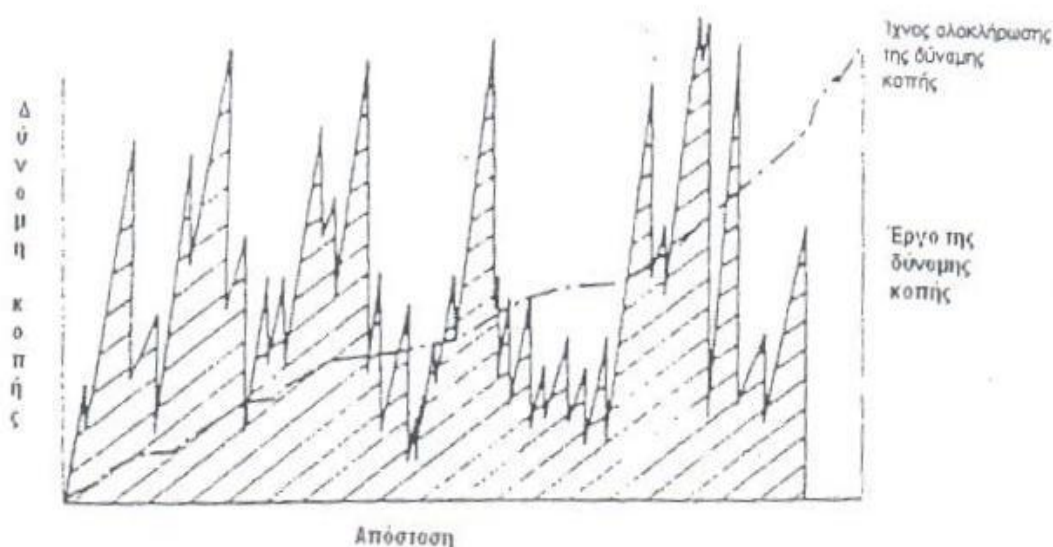
Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι ενός κοπτικού άκρου συρόμενου τύπου είναι:

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



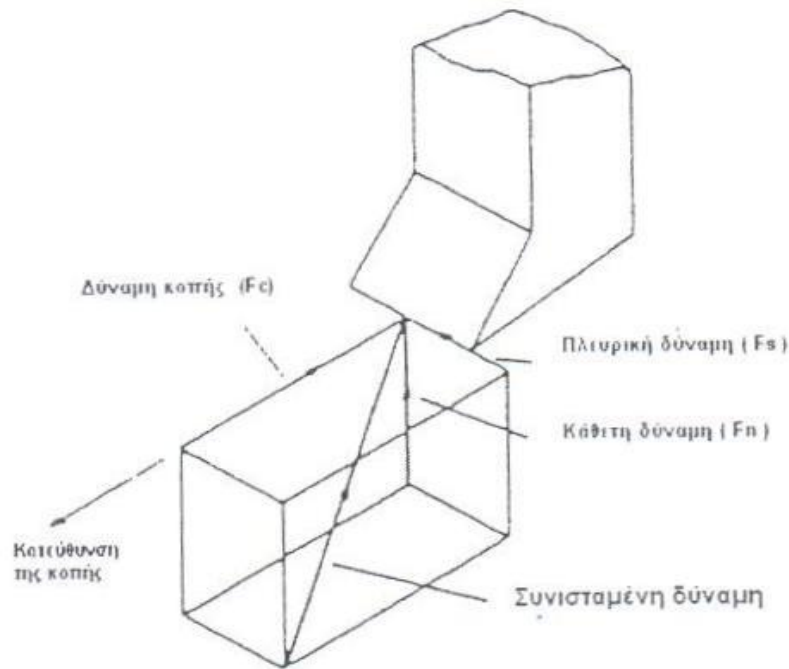
Σχήμα 4.6. Τύποι κοπτικών άκρων συρόμενου τύπου (Αναγνώστου 2006)

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 4.7. Διάγραμμα δύναμης κοπής κατά *Fowell* (Αναγνώστου 2006)

Στο σχήμα 4.7 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 4.8: τη δύναμη κοπής, τη δύναμη ώσης (κάθετη δύναμη) και τις πλευρικές συνιστώσες. Λόγω της μεταβλητής φύσης των δυνάμεων αυτών, οι συνιστώσες μπορούν να εκφραστούν με περισσότερους από έναν τρόπους.



Σχήμα 4.8. 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 4.7 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 πρόκληση 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 αποδοτικότητας 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 εξετάζονται οι πλέον συνήθεις μεταβλητές που αφορούν την κοπή με κοπτικά άκρα συρόμενου τύπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 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. Παρόλα 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 από τεχνικής και οικονομικής άποψης. Παρόλα 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. 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:

$$P = t_0 * t * B * \frac{\cos(\varphi - \chi)}{\sin\theta * \cos(\theta + \varphi - \chi)} \quad (2)$$

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.

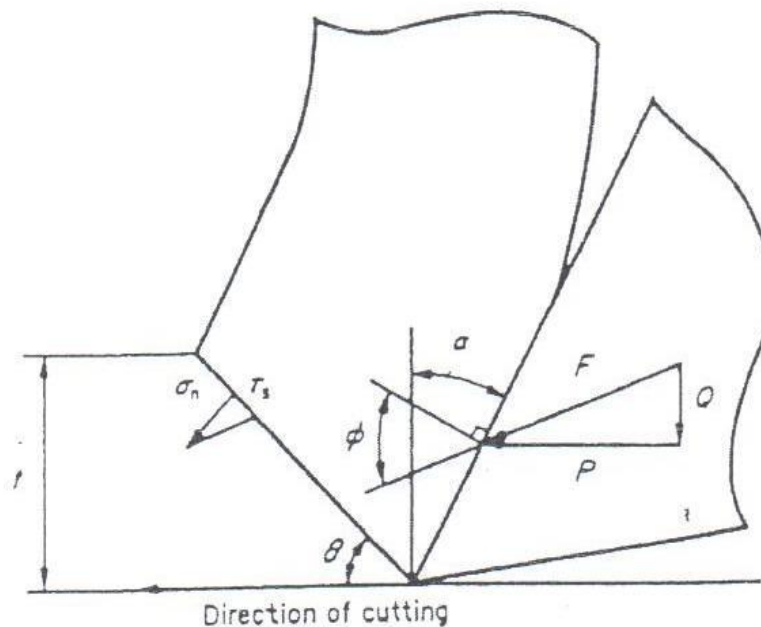
Όπως προκύπτει από το σχήμα 5.1, η κάθετη δύναμη Q δίνεται από τη σχέση (3):

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

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:

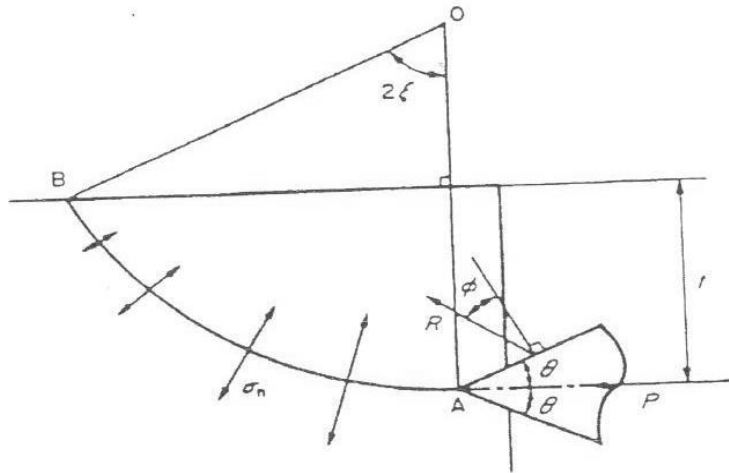
- Η ρωγμή που ξεκινά από την κορυφή της σφήνας A διευρύνεται σχηματίζοντας κυκλικό τόξο έως το σημείο B στην επιφάνεια του δοκιμίου όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.
- Μια εφαπτομένη του τόξου της ρωγμής, συμπίπτει με τη διχοτόμο της γωνίας της κοπτικής ακμής στην κορυφή της σφήνας A.
- Η εφελκυστική τάση που δρα κάθετα στο τόξο της ρωγμής είναι ανάλογη της απόστασης από το σημείο B της επιφάνειας υψωμένης σε κάποια δύναμη n.
- Η ρωγμή σχηματίζεται και διευρύνεται όταν οι εφελκυστικές τάσεις στην κορυφή της σφήνας A φθάσουν την τιμή S_t του γαιάνθρακα (όπου S_t 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:

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

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

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



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

5.2.3. Η θεωρία του Nishimatsu

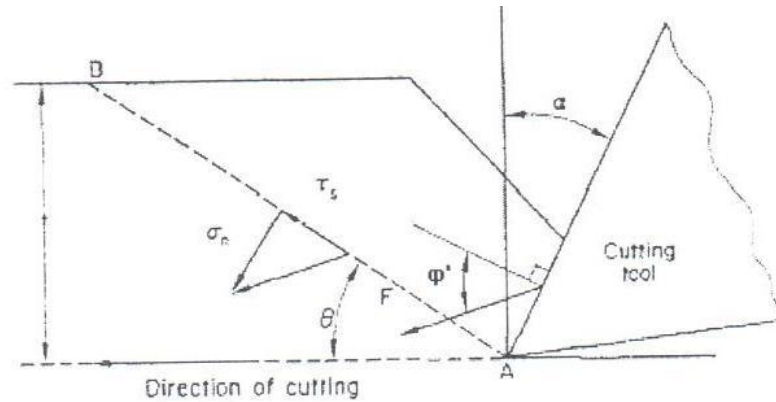
Ο Nishimatsu παρουσίασε μια θεωρία για την κοπή των πετρωμάτων και πρότεινε μια εξίσωση για τη δύναμη κοπής με τη χρήση κοπτικού άκρου με τη μορφή σφήνας. Σε αυτήν τη θεωρία γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- 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 συνισταμένη 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:

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

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 προσδιοριστεί η άγνωστη γωνία θ , εφαρμόζοντας την αρχή της ελάχιστης ενέργειας, τελικά προκύπτει:

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

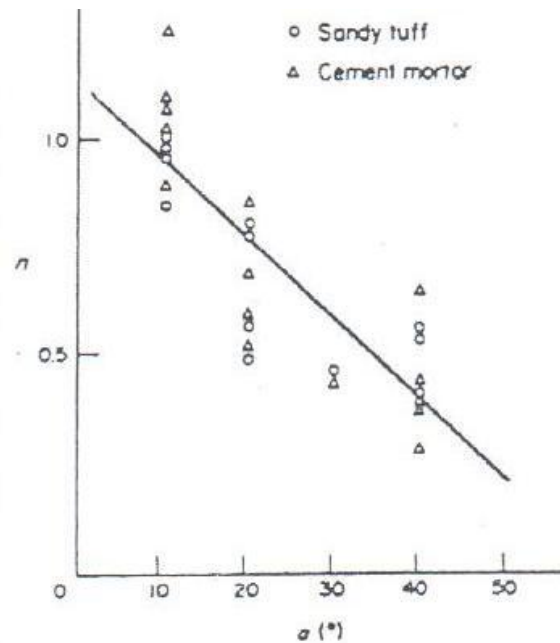
Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα κοπής πετρωμάτων με ορθογώνιο κοπτικό άκρο συρόμενου τύπου, η φαινόμενη γωνία τριβής και ο παράγοντας κατανομής των τάσεων εξαρτώνται από την εμπρόσθια γωνία κλίσης του κοπτικού όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.4 και 5.5. Είναι ευνόητο το γιατί ο παράγοντας κατανομής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

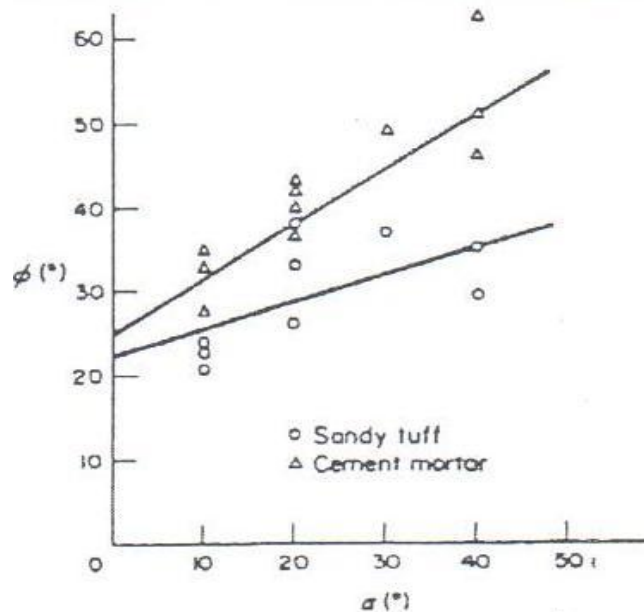
κοπή πετρωμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Αυτό υποδηλώνει ότι η φαινόμενη γωνία τριβής στην κοπή των πετρωμάτων, είναι μια παράμετρος που ελέγχει την αναλογία ανάμεσα στη δύναμη κοπής και την κάθετη δύναμη όπως φαίνεται παρακάτω (σχέση 9):

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

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)

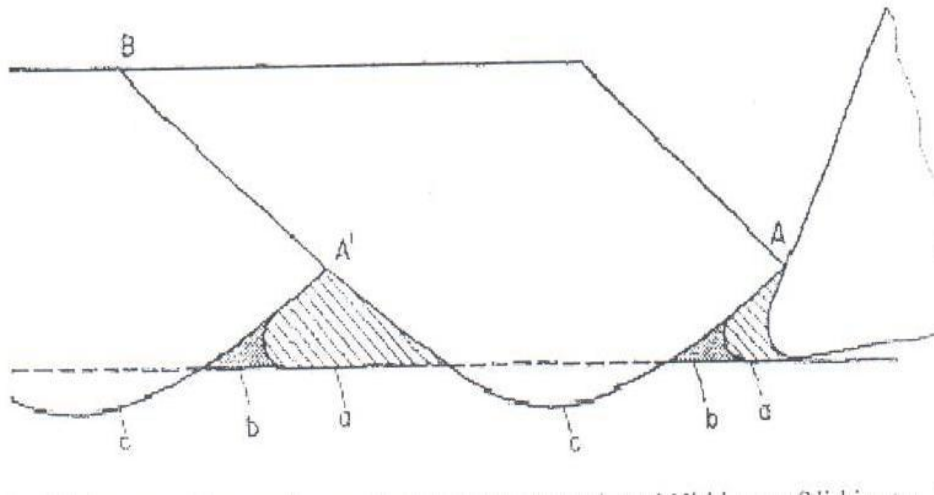
5.3. Η κατά Nishimatsu διαδικασία της αστοχίας στην κοπή πετρωμάτων

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 διείσδυση της κοπτικής ακμής τόσο μεγαλύτερη τιμή παίρνει η δύναμη κοπής. Όταν επιτευχθεί μια κρίσιμη τιμή του βάθους διείσδυσης 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.

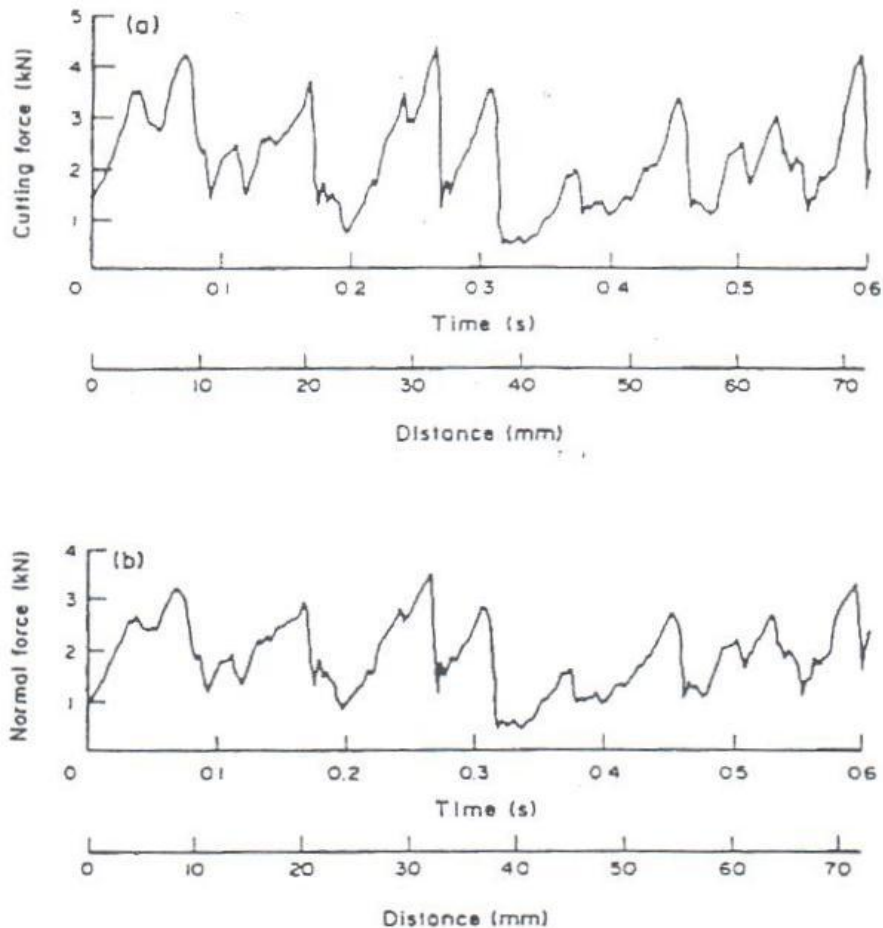


Σχήμα 5.6. Μηχανισμός αστοχίας πετρώματος κατά την κοπή κατά Nishimatsu

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 θεωρείται 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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

6.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Uniaxial Compressive Strength test)

6.1.1.Εισαγωγή

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, εκτελούμενη σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων, είναι η συνηθέστερα εκτελούμενη εργαστηριακή δοκιμή. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_c , και των ελαστικών σταθερών E και ν του άρρηκτου πετρώματος. Στην δοκιμή αυτή γίνεται ταυτόχρονη μέτρηση των αξονικών και διαμετρικών(πλευρικών) παραμορφώσεων του δοκιμίου.

Για παρόμοια ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, η σ_c μειώνεται με το πορώδες, το βαθμό αποσάθρωσης, τις μικρορωγματώσεις, και την περιεκτικότητα σε νερό. Γι αυτό η αντοχή δοκιμών με την ίδια γεωλογική ονομασία δύναται να διαφέρει σημαντικά. Για παράδειγμα, η αντοχή του ψαμμίτη διαφέρει με το μέγεθος των κόκκων, την πυκνότητα, τη φύση και έκταση συγκόλλησης των κόκκων, και το βαθμό συμπίεσης και θερμοκρασίας που το πέτρωμα υπέστη μέχρι σήμερα. Εν τούτοις η γεωλογική ονομασία δίνει χρήσιμα στοιχεία όπως για παράδειγμα ένας σχιστόλιθος αναμένεται να παρουσιάζει σχιστότητα και ένας χαλαζίτης θα είναι γενικά ένα σκληρό ψαθυρό υλικό.

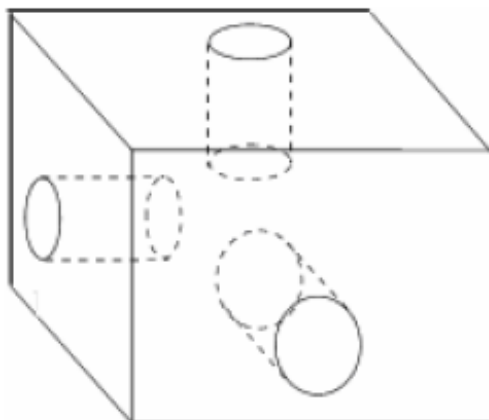
Παρακάτω δίνονται κάποιοι βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό της μηχανικής απόκρισης των πετρωμάτων. Αντοχή ή μέγιστη αντοχή, είναι η μέγιστη τάση που το πέτρωμα δύναται να αναλάβει για δεδομένες συνθήκες. Μετά την επίτευξη της μέγιστης τιμής το δοκίμιο μπορεί να εξακολουθεί να αναλαμβάνει κάποιο φορτίο. Η παραμένουσα αντοχή, όταν επιτυγχάνεται, συμβαίνει μετά από σημαντική παραμόρφωση. Ψαθυρή θραύση είναι η διαδικασία κατά την οποία συμβαίνει ξαφνική απώλεια αντοχής

με ελάχιστη ή μηδενική πλαστική παραμόρφωση. Όλκιμη παραμόρφωση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία το πέτρωμα συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς να χάνει τη φέρουσα ικανότητά του. Διαρροή ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων αποκλίνει από την ελαστική συμπεριφορά. Η τάση διαρροής αντιστοιχεί στην έναρξη της διαρροής. Αστοχία είναι ένας γενικότερος όρος που άλλες φορές ταυτίζεται με την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, άλλες φορές με την αδυναμία ανάληψης των δρώντων φορτίων, άλλοτε με υπερβολικές παραμορφώσεις, κ.α.

6.1.2 Η δοκιμή

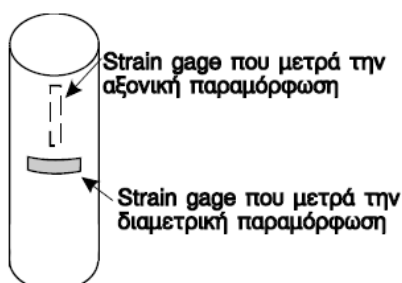
Οι προτεινόμενες τεχνικές εκτέλεσης της δοκιμής για τον καθορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος δίνονται από την Επιτροπή προτυποποίησης εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών της Διεθνούς Ένωσης Βραχομηχανικής (ISRM, 1979). Βασικά χαρακτηριστικά της συνιστώμενης διαδικασίας είναι:

- Μετριέται η διάμετρος D του δοκιμίου με ακρίβεια 0,1mm, με τη λήψη του μέσου όρου των δύο μετρήσεων της διαμέτρου σε ορθή γωνία μεταξύ τους στο μέσο του δοκιμίου, καθώς και στο άνω και κάτω άκρο αυτού. Έπειτα μετριέται το μήκος του δοκιμίου.
- Καταγράφεται το βάρος του δοκιμίου για τον υπολογισμό της πυκνότητας. Οι συνθήκες υγρασίας κατά τη δοκιμή θα ήταν καλό να είναι οι συνθήκες φυσικής υγρασίας του πετρώματος.
- Το δοκίμιο τοποθετείται στην πρέσα η οποία διαθέτει δύο χαλύβδινες πλάκες κυκλικού σχήματος και σκληρότητας όχι μικρότερης του HRC 58. Η μια από τις πλάκες πρέπει να έχει σφαιρική έδραση και η άλλη να είναι άκαμπτη και επίπεδη. Το δοκίμιο, οι χαλύβδινες πλάκες και η σφαιρική έδραση είναι κεντρωμένα σε σχέση με τον άξονα φόρτισης.
- Εφαρμόζεται το φορτίο στο δοκίμιο συνεχώς και βαθμιαία με σταθερή φόρτιση.
- Σε κάθε περίπτωση τα δοκίμια λαμβάνονται έτσι ώστε να σημειώνεται ο προσανατολισμός τους ως προς το μητρικό πέτρωμα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.

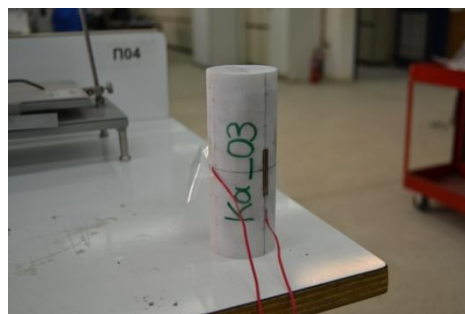


Σχήμα 6.1. Προσανατολισμός δοκιμίων

Για την εκτέλεση της δοκιμής, κατάλληλα διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή του πετρώματος, δηλαδή η μέγιστη τάση (μέση τιμή σε ένα επίπεδο) την οποία ένα πέτρωμα δύναται να αντέξει. Επίσης με βάση το διάγραμμα ενεργών τάσεων-τροπών (ανηγμένων παραμορφώσεων), που σχεδιάζεται από τη δοκιμή αυτή, μπορούν να υπολογιστούν διάφορα μέτρα ελαστικότητας E (Young's Modulus) του πετρώματος καθώς και ο λόγος του Poisson ν . Στη συνήθη περίπτωση που δεν υφίσταται πίεση νερού των πόρων, η ενεργή τάση ταυτίζεται με την δρώσα αξονική δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου. Η μέτρηση των παραμορφώσεων επιτυγχάνεται συνήθως με την τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) που επικολλώνται με τη χρήση ειδικής κόλλας όπως φαίνεται παρακάτω. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, και ο οριζόντιος την διαμετρική παραμόρφωση.

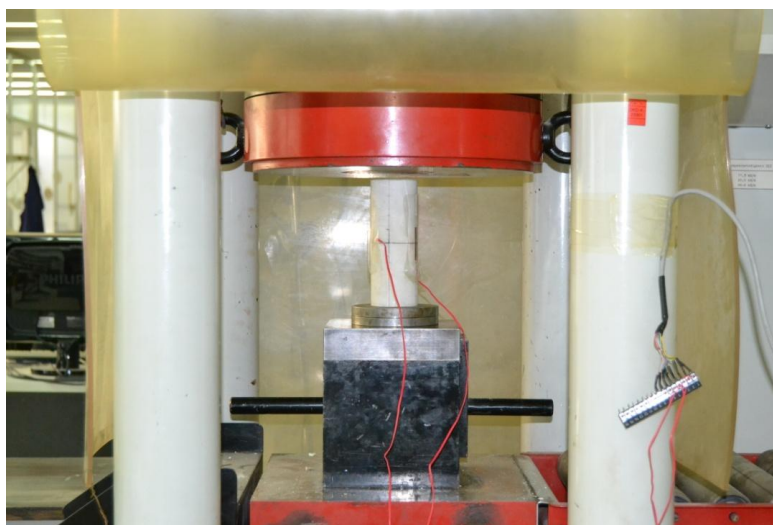


Σχήμα 6.2. Τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης



Φωτογραφία 6.1. Οι μετρητές παραμόρφωσης στο δοκίμιο Ka_03

Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχόμενη με σταθερό ρυθμό. Η θραύση του δοκιμίου, ανάλογα με την αντοχή του, επιτυγχάνεται συνήθως μέσα σε 5 έως 10 λεπτά. Κατά την διεξαγωγή της δοκιμής καταγράφονται οι ενδείξεις φορτίου της θλιπτικής μηχανής και οι ενδείξεις παραμορφώσεων των δύο ενισχυτών σήματος. Στη φωτογραφία 6.2 φαίνεται δοκίμιο με συνδεδεμένους τους μετρητές παραμορφώσεων, έτοιμο για τη δοκιμή.



Φωτογραφία 6.2. Το δοκίμιο Κα_03 έτοιμο για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Η αξονική και η διαμετρική παραμόρφωση, ϵ_x , ϵ_y , δίνονται από τις σχέσεις:

$$\epsilon_x = \Delta l_x / l_x, \epsilon_y = \Delta l_y / l_y$$

Για την περίπτωση των ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων, τα μεγέθη ϵ_x , ϵ_y δίνονται από τις ενδείξεις των ενισχυτών του, πολλαπλασιαζόμενες με κατάλληλο συντελεστή. Η θλιπτική τάση με την οποία καταπονείται το δοκίμιο, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = P / A_0 \quad (2)$$

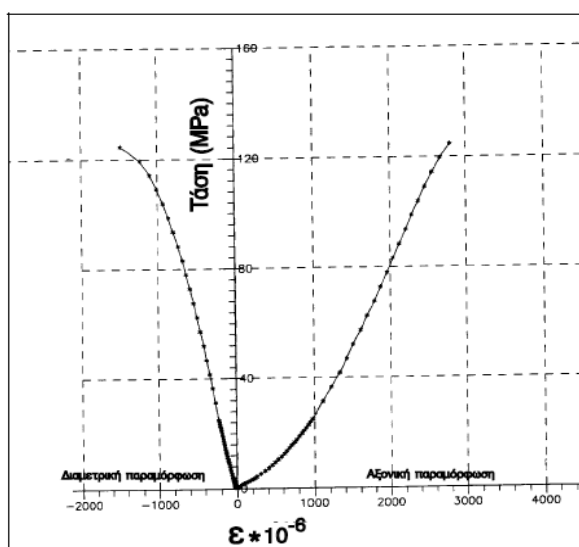
όπου P το θλιπτικό φορτίο σε kN, και A_0 το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου όπως μετρήθηκε πριν από τη δοκιμή.

Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης - αξονικής τροπής 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. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας ($E_{μσο}$) υπολογίζεται από την μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης. Το τέμνον μέτρο υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσεως μεταξύ 0 και συνήθως 50% της μέγιστης τάσεως. Τα μέτρα ελαστικότητας εκφράζονται συνήθως σε GPa. Για τον προσδιορισμό του λόγου του Poisson σχεδιάζονται οι καμπύλες αξονικής τάσης-αξονικής τροπής και αξονικής τάσης - διαμετρικής τροπής που φαίνονται στο . Σε συνέχεια υπολογίζονται οι κλίσεις τους $\Delta\sigma/\Delta\epsilon_a$, $\Delta\sigma/\Delta\epsilon_d$.

Ο λόγος του Poisson υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\nu = -(\Delta\sigma/\Delta\epsilon_a)/(\Delta\sigma/\Delta\epsilon_d)$$

όπου η κλίση της καμπύλης τάσεως-διαμετρικής παραμόρφωσης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε κάθε μία από τις τρεις κλίσεις της καμπύλης τάσεως- αξονικής παραμόρφωσης, για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας. Παρακάτω φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.(σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3. Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Δοκίμιο	Μέση τιμή μήκους(mm)	Διάμετρος(mm)	Πυκνότητα
Κα_01	143,6	NX 54,7	2,695
Κα_03	152,5	NX 54,7	2,704
Κα_04	129,76	NX 54,7	2,696

Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για UCS

6.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με ρυθμό φόρτισης 0,75kN/s.

Τα πρώτα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την συσκευή μονοαξονικής θλίψης (πρέσα) φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Δοκίμια	Μέγιστο φορτίο kN (ένδειξη μηχανής)	Χρόνος δοκιμής (min)
Κα_01	187,6	3,84
Κα_03	270,6	5,67
Κα_04	199,3	4,80

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Σημείωση: Στο δοκίμιο Κα_04 δεν εξήχθησαν αποτελέσματα λόγω της αστοχίας του ηλεκτρικού μηκυσιόμετρου.

Τα διαγράμματα που σχεδιάστηκαν μετά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης βρίσκονται στο **Παράρτημα 5**.

Μετά το σχεδιασμό των διαγραμμάτων υπολογίστηκαν το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας(50%) και ο λόγος του Poisson από τους τύπους που

αναφέρονται παραπάνω. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.3.

Δοκίμια	E(GPa)	ν
Ka_01	97,13	0,20
Ka_03	74,72	0,22

Πίνακας 6.3. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson για τα δοκίμια Ka01 και Ka03

Ακολούθως φωτογραφήθηκαν εκ νέου τα δοκίμια μετά την αστοχία τους στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης όπως φαίνεται παρακάτω.

Εικόνες 1,2,3 Τα δοκίμια μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Φωτογραφία 6.3. Δοκίμιο Ka_01

Φωτογραφία 6.4. Δοκίμιο Ka_03



Φωτογραφία 6.5. Δοκίμιο Ka_04

6.2 Δοκιμή Αντιδιαμετρικής Θλίψης (BTS)

6.2.1 Εισαγωγή

Τα πετρώματα γενικά είναι πιο αδύναμα σε εφελκυσμό σε αντίθεση με την σημαντική αντοχή τους σε θλίψη. Θεωρητικά ο λόγος μονοαξονικής θλιπτικής προς εφελκυστική αντοχή είναι 8/1 περίπου. Πρακτικά ο λόγος αυτός διαφέρει από την τιμή αυτή, συνήθως προς τα επάνω αλλά δεν είναι εύκολο να καθορισθεί, κυρίως γιατί υπάρχουν δυσκολίες στον προσδιορισμό μιας αξιόπιστης τιμής για την εφελκυστική αντοχή τους.

Η εφελκυστική αντοχή των πετρωμάτων, όπως έχει προαναφερθεί έχει μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της απόκρισης τους κατά την υποβολή τους, τόσο σε στατικά φορτία όσο και σε δυναμικά. Συνθήκες που πλησιάζουν τη στατική μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση παρατηρούνται κυρίως στα τοιχώματα των υπογείων ανοιγμάτων όπως σήραγγες, γεωτρήσεις κλπ. Η διάτρηση, η ανατίναξη και η κοπή των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα δημιουργούν συνθήκες δυναμικής εφελκυστικής καταπόνησης. Παρά τη σημασία της αντοχής σε εφελκυσμό που σχετίζεται με τη δυνατότητα του πετρώματος να ανθίσταται σε δυναμικά ή στατικά φορτία η τιμή της χρησιμοποιείται ελάχιστα ως παράγοντας σχεδιασμού.

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή το δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι την θραύση του. Υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο της φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση που προκαλεί την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκίμιου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικό εντατικό πεδίο αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μια κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση είναι θλιπτική και εφ' όσον το μέγεθος της τελευταίας δεν ξεπερνά το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης.



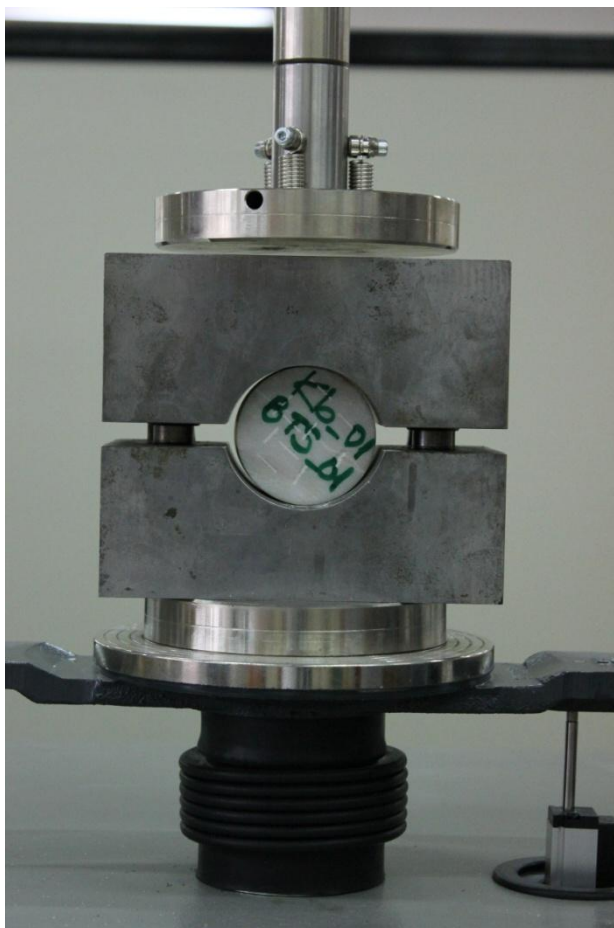
Φωτογραφία 6.6. Πρέσα του εργαστηρίου εξόρυξης πετρωμάτων

6.2.2 Η δοκιμή

Σύμφωνα με τις οδηγίες της ISRM (1978), η δοκιμή πραγματοποιείται σε δοκίμια πετρώματος μορφής δίσκου. Βάση αυτής, τα δοκίμια πρέπει να αποκόπτονται και να προετοιμάζονται με χρήση καθαρού νερού. Οι κυλινδρικές επιφάνειες θα πρέπει να είναι ελεύθερες από εμφανή σημεία των εργαλείων και οι όποιες ανωμαλίες τους δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 0,025 mm. Ο προσανατολισμός του δοκιμίου θα πρέπει να είναι γνωστός, ενώ η διάμετρος του δεν πρέπει να είναι μικρότερη από NX (54,7 mm), και το πάχος του ίσο με την ακτίνα του. Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχής και να πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό. Προτεινόμενος ρυθμός φόρτισης είναι 200 N/s (20 kgf/s).

Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι τη στιγμή της αστοχίας του. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην μέτρηση του φορτίου αστοχίας, καθώς συν υπάρχουν περιπτώσεις όπου το δοκίμιο εξακολουθεί να αναλαμβάνει αυξημένα φορτία ακόμη και ύστερα από την αστοχία του. Σημειώνεται ότι κατά την αρχική αστοχία του δοκιμίου παρατηρείται μια μικρής διάρκειας παύση στην κίνηση του σχετικού δείκτη. Παρά ταύτα, η διαφορά μεταξύ του φορτίου

αρχικής θραύσεως και του τελικού φορτίου, που δύναται να αναλάβει το δοκίμιο είναι το πολύ 5 %. Ο αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών ανά δείγμα καθορίζεται από τη διαθέσιμη ποσότητα δείγματος. Η ISRM προτείνει 10 δοκιμές ανά δείγμα.



Φωτογραφία 6.7. Το δοκίμιο Kb_01 BTS 01 τοποθετημένο στην εργαστηριακή συσκευή πριν την εκτέλεση της δοκιμής

6.2.3 Προετοιμασία Δοκιμίων

Τα δοκίμια είναι σχήματος δίσκου του οποίου το ύψος είναι περίπου ίσο με το μισό της διαμέτρου. Οποσδήποτε η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να είναι 10-πλάσια από τη διάμετρο του μεγαλύτερο κόκκου των ορυκτών που συμμετέχουν στη δομή του πετρώματος. Τα άκρα του δοκιμίου είναι επίπεδα και παράλληλα μεταξύ τους. Η διάμετρος d και το ύψος L του δοκιμίου μετριοούνται με ακρίβεια 0,1mm. Επίσης μετριέται και το βάρος του δοκιμίου για τον υπολογισμό της πυκνότητας. Οι συνθήκες υγρασίας του δοκιμίου πρέπει να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν περισσότερο τις συνθήκες

πραγματικής υγρασίας του πετρώματος. Είναι δυνατόν όμως και οι συνθήκες αυτές να διαφέρουν, ακόμη και αν τα δοκίμια είναι εντελώς ξερά.

6.2.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τα οποία κόπηκαν δευτερογενώς, αφού πρώτα είχαν χρησιμοποιηθεί στην δοκιμή για τη μελέτη της αποξεστικότητας Cerchar. Αφαιρέθηκε η υγρασία τοποθετώντας τα για 24 ώρες σε φούρνο θερμοκρασίας 105°C. Τα στοιχεία των δοκιμών σε ξηρή κατάσταση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Δοκίμιο	L1 (mm)	L2 (mm)	μ.τ. Μήκους (mm)	Βάρος (gr)
Ka_01 BTS 01	29,13	29,22	29,175	176,8
Ka_01 BTS 02	28,25	28,12	28,185	172,8
Ka_02 BTS 01	29,77	29,58	29,675	181,4
Ka_02 BTS 02	29,80	29,74	29,770	182,9
Ka_03 BTS 01	27,52	27,38	27,450	168,2
Ka_03 BTS 02	28,53	28,58	28,555	174,5

Πίνακας 6.4. Χαρακτηριστικά δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για BTS



Φωτογραφία 6.8, 6.9. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

Διαγράμματα

Μετά την εκτέλεση της δοκιμής και την επεξεργασία των στοιχείων που εξήχθησαν από την εργαστηριακή συσκευή σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα (βλ. Παράρτημα 4) στα οποία φαίνεται η συσχέτιση δύναμης-μετατόπισης μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου στο μέγιστο φορτίο(φορτίο θραύσης).

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμών καθώς και τα χαρακτηριστικά των δοκιμών είναι τα εξής:

Δοκίμιο	L1 (mm)	L2 (mm)	μ.τ. Μήκους (mm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης (kN)	Μετατόπιση (mm)	διάρκεια δοκιμής
Ka_01 BTS 01	29,13	29,22	29,175	176,8	21,203	2,173	5'00"
Ka_01 BTS 02	28,25	28,12	28,185	172,8	21,332	2,184	5'00"
Ka_02 BTS 01	29,77	29,58	29,675	181,4			
Ka_02 BTS 02	29,80	29,74	29,770	182,9	10,707	1,862	2'34"
Ka_03 BTS 02	27,52	27,38	27,450	168,2	24,086	2,063	5'24"
Ka_03 BTS 02	28,53	28,58	28,555	174,5			

Πίνακας 6.5. Αποτελέσματα δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης (BTS)

Σημείωση: Στα δοκίμια Ka_02 BTS01 και Ka_03 BTS 02 οι δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης ήταν αποτυχημένες καθώς τα δοκίμια αστόχησαν και η εργαστηριακή συσκευή συνέχισε τη δοκιμή αλλοιώνοντας τα αποτελέσματα.

Υπολογισμοί

Η εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \times D \times L} = 0,636P/DL$$

όπου:

P : το φορτίο σε N

D : διάμετρος σε mm

L : Ύψος σε mm

Ακολουθώντας εφαρμόζοντας τον παραπάνω τύπο, υπολογίστηκε η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Δοκίμιο	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)
Ka_01 BTS 01	7,28
Ka_01 BTS 02	7,08
Ka_02 BTS 02	3,75
Ka_03 BTS 01	7,79

Πίνακας 6.6. Αποτελέσματα προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής

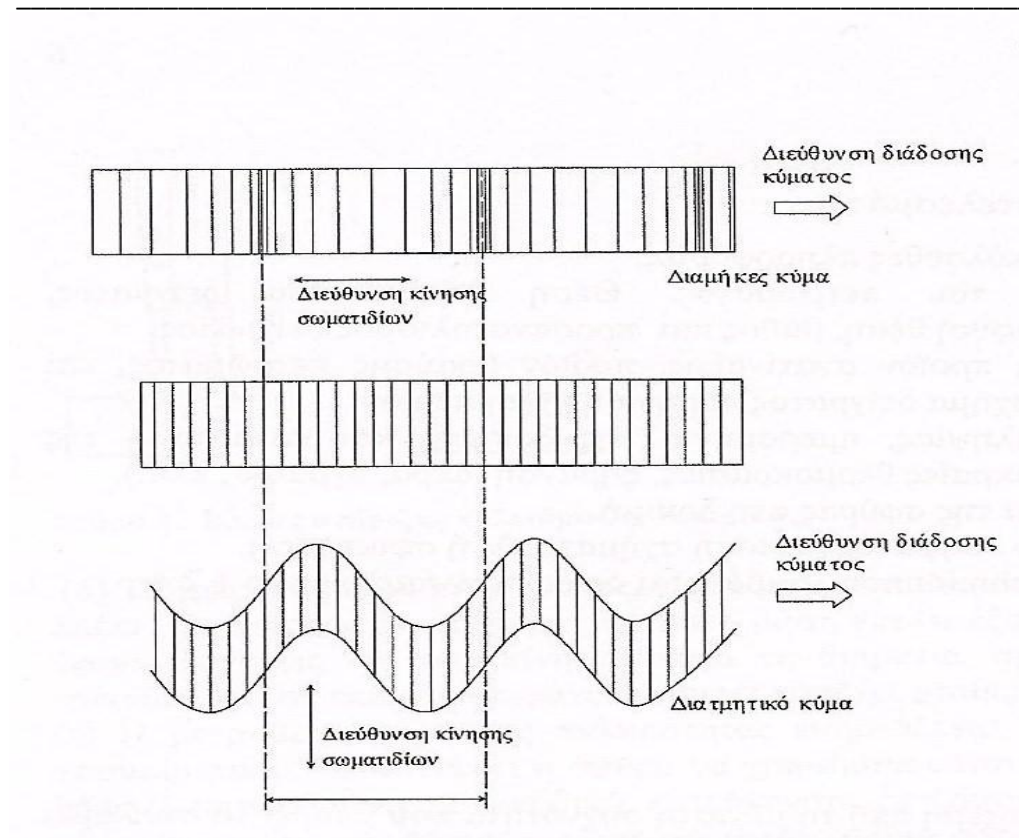
Σημείωση: Στο δοκίμιο Ka_02 BTS 02 παρατηρήθηκε ότι η εφελκυστική αντοχή που υπολογίστηκε διαφέρει αρκετά από τα υπόλοιπα δοκίμια. Αυτό συνέβη διότι στην συγκεκριμένη δοκιμή το πέτρωμα αστόχησε κατά το μήκος ασυνέχειας, ωστόσο ολοκληρώθηκε κανονικά η δοκιμή.

6.3 Δοκιμή ταχύτητας υπερήχων

6.3.1 Εισαγωγή

Ένας ήχος με συχνότητα μεγαλύτερη από τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να συλλάβει ο άνθρωπος (περίπου 20 kHz) καλείται υπέρηχος. Ο υπέρηχος διαδίδεται στο μέσο διάδοσης με τη μορφή ενός κύματος με μικρό μήκος. Τα χαρακτηριστικά αυτά τον καθιστούν χρήσιμο για το μη καταστροφικό έλεγχο των πετρωμάτων. Η ταχύτητα διάδοσης c του υπερηχητικού κύματος υπό σταθερή θερμοκρασία και πίεση είναι σταθερή και σχετίζεται με το μήκος κύματος, τη συχνότητα και την περίοδο.

Για τον έλεγχο των πετρωμάτων με υπέρηχους χρησιμοποιούνται δύο είδη κυμάτων: τα διαμήκη και τα διατμητικά (ή αλλιώς εγκάρσια). Στο σχήμα 6.3 δίνεται μία εικόνα της κίνησης των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος για τα δύο αυτά είδη κυμάτων.



Σχήμα 6.4. Κίνηση σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος σε εγκάρσια και διαμήκη κύματα

Αποτελεί μια μη καταστροφική δοκιμή για τον καθορισμό της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων σε εργαστηριακές δοκιμές μηχανικής πετρωμάτων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές παραλλαγές της μεθόδου. Η τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας, η τεχνική υπερηχητικών παλμών χαμηλής συχνότητας και η μέθοδος συντονισμού. Θεωρείται μία χρήσιμη και αξιόπιστη μέθοδος για τον υπολογισμό των ελαστικών ιδιοτήτων ενός πετρώματος.

6.3.2 Σκοπός της δοκιμής

Σκοπός της δοκιμής είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας του διαμήκου (P-wave) εντός των χρησιμοποιούμενων δοκιμίων του πετρώματος, και έπειτα ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_{dyn} .

Η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει ένας υπερηχητικός παλμός εντός ενός στερεού σώματος εξαρτάται από την πυκνότητα του, και τις ελαστικές του ιδιότητες. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εντός του πετρώματος

αποτελεί μια χαρακτηριστική ιδιότητα του πετρώματος καθώς και ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του υλικού. Οι ασυνέχειες του πετρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η διαφορά στην ταχύτητα, είναι μεγαλύτερη για τον ίδιο τύπο πετρώματος με διαφορετική πυκνότητα ασυνεχειών από ότι μεταξύ διαφορετικού τύπου πετρωμάτων.

6.3.3 Εργαστηριακή Συσκευή

Για την μέτρηση της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή PUNDIT (Portable Ultrasonic Non- Destructive Digital Indicating Tester) και ένα ζεύγος ακροδεκτών. Ο ένας πιεζοηλεκτρικός ακροδέκτης λειτουργεί ως πομπός του υπερηχητικού σήματος και ο άλλος ως δέκτης. Οι δύο αυτοί δέκτες προσαρμόζονται στις βάσεις των κυλινδρικών δοκιμών και κατόπιν διαρρέεται το σήμα. Η συγκεκριμένη συσκευή έχει την δυνατότητα σύνδεσης και με ηλεκτρονικό υπολογιστή γεγονός που βοήθησε στην καλύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

6.3.4 Δοκιμή - Πειραματικά αποτελέσματα

Για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή επαφή του πομπού και του δέκτη στις βάσεις των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν κυκλικοί δίσκοι μολύβδου συνολικού πάχους 3mm ανάμεσα στους ακροδέκτες και τα δοκίμια. Όμως για να αποφευχθούν αποκλίσεις από την πραγματική ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο πέτρωμα αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή ταχύτητας υπερήχων μόνο στους δίσκους μολύβδου που εφαρμόστηκαν στο δοκίμιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο χρόνος διάδοσης του κύματος είναι σχεδόν μηδενικός και κατά συνέπεια, οι δίσκοι δεν θα επηρέαζαν τη δοκιμή. Έπρεπε όμως, κατά την εισαγωγή των χαρακτηριστικών των δοκιμών στον υπολογιστή να αυξηθεί το μήκος κατά 3mm. Έπειτα εφαρμόστηκε βάρος 8929kg για ακόμα καλύτερη ακουστική σύζευξη, εισήχθη στον υπολογιστή το μήκος του εκάστοτε δοκιμίου και διοχετεύτηκε υπερηχητικό κύμα συχνότητας 54KHz.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι τα εξής:

Δοκίμιο	Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος (μs)
Ka_01	9068	16,1
Ka_02	9559	16,3
Ka_03	8523	17,6
Ka_04	10000	12,9
Ka_05	8523	17,6
Ka_06	10000	13,9
Ka_07	9157	16,6
Ka_08	8400	17,5

Πίνακας 6.7. Αποτελέσματα δοκιμών

Σημείωση: Για την βέλτιστη ακρίβεια στις μετρήσεις - καθώς δεν ήταν δυνατόν να εισαχθούν τα δεκαδικά ψηφία του μήκους των δοκιμίων - υπολογίστηκε εκ νέου η ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων, χρησιμοποιώντας τον χρόνο και το ακριβές μήκος των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον *Πίνακα 6.8*.

	ΜΕΤΡ. ΜΗΚΟΥΣ (mm)		Μ.Τ. Μήκους	Μήκος +3mm	Χρόνος Διαδ.	Ταχ. Διαδ. Υπερήχων
Δοκίμιο	1	2	mm		μs	m/s
Ka_01	143,930	143,380	143,655	146,655	16,1	9109,0
Ka_02	152,480	152,540	152,510	155,510	16,3	9540,5
Ka_03	146,630	146,580	146,605	149,605	17,6	8500,3
Ka_04	129,800	129,730	129,765	132,765	12,9	10291,8
Ka_05	146,260	146,220	146,240	149,240	17,6	8479,5
Ka_06	146,430	146,600	146,510	149,515	13,9	10756,5
Ka_07	149,340	149,400	149,370	152,370	16,6	9178,9
Ka_08	143,660	143,540	143,600	146,600	17,5	8377,1

Πίνακας 6.8. Αποτελέσματα υπολογισμού ταχύτητας υπερήχων με δεδομένο το ακριβές μήκος των δοκιμίων

6.3.5 Υπολογισμοί

Υπολογισμός δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Μετά από τον υπολογισμό της ταχύτητας διέλευσης των κυμάτων από τα δοκίμια θα υπολογίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_{dyn} που δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$E_{dyn} = \frac{V_p^2 \times \rho \times (1+\nu) \times (1-2\nu)}{(1-\nu)},$$

Όπου:

V_p , η ταχύτητα διέλευσης των υπερήχων από το δοκίμιο

ρ , η πυκνότητα

ν , ο λόγος του Poisson

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.9.

Δοκίμιο	ρ	Λογος Poisson	V_p	E_{dyn} (Gpa)
Κα_01	2,695	0,20	9109,00	201,25
Κα_03	2,700	0,22	8500,00	170,80

Πίνακας 6.9. Αποτελέσματα υπολογισμού δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

6.4 Σκληρομέτρηση Shore

6.4.1 Εισαγωγή

Η σκληρότητα των πετρωμάτων εξαρτάται από τον τύπο, την ορυκτολογική τους σύσταση, καθώς και από την αντοχή των κόκκων και των ορυκτών μεταξύ τους. Έχει αποδειχτεί ότι όσο πιο σκληρό είναι ένα πέτρωμα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση παρουσιάζει στην διείσδυση από εργαλεία κοπής. Για αυτό το λόγο ο εργαστηριακός υπολογισμός της σκληρότητας ενός πετρώματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της ταυτότητας του πετρώματος.

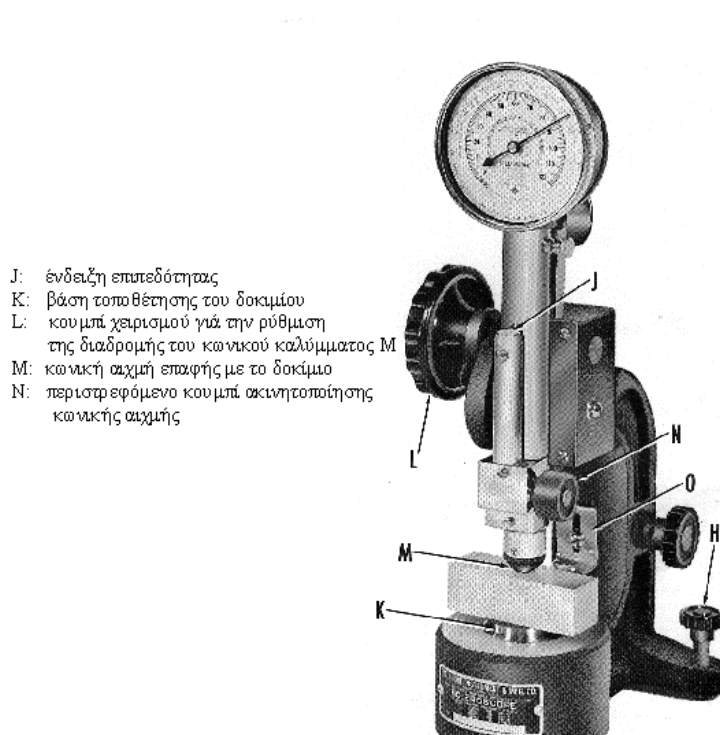
Η σκληρότητα του πετρώματος δεν αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα των εδαφικών υλικών άρα και των πετρωμάτων αλλά είναι περισσότερο μία ιδιότητα που ανήκει στις ιδιότητες που περιγράφουν εμπειρικά την συμπεριφορά των υλικών. Για αυτό τον λόγο η ποσοτική μέτρηση της σκληρότητας ενός υλικού εξαρτάται κάθε φορά από τον τύπο της εφαρμοζόμενης δοκιμής. Γενικά τρεις διαφορετικοί τύποι δοκιμών χρησιμοποιούνται προκειμένου να μετρηθεί η σκληρότητα των πετρωμάτων και των ορυκτών τους: (1) οι δοκιμές διείσδυσης στην επιφάνεια δοκιμής (indentation tests), (2) οι δυναμικές δοκιμές ή δοκιμές αναπήδησης (dynamic or rebound tests) και (3) οι δοκιμές χάραξης της επιφάνειας του δοκιμίου (scratch tests). Στην κατηγορία των δυναμικών δοκιμών ή δοκιμών αναπήδησης ανήκει η δοκιμή αναπήδησης με το σφυρί Schmidt καθώς και η δοκιμή σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore. Σαν δοκιμές Indentation είναι γνωστές οι δοκιμές σκληρομέτρησης κατά Brinell και Rockwell και ως scratch tests προκειμένου να προσδιοριστεί η σκληρότητα των ορυκτών συστατικών ενός πετρώματος είναι οι δοκιμές κατά Mohs.

6.4.2 Σκοπός της δοκιμής

Η δοκιμή σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore είναι μία εργαστηριακή δοκιμή που ενδείκνυται για τον προσδιορισμό της σκληρότητας του πετρώματος και των ορυκτών του καθώς και για 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 ανεμπόδιση θλίψη.

6.4.3 Η Εργαστηριακή Συσκευή

Η συσκευή Shore κατασκευάζεται σε δύο παραλλαγές: το μοντέλο C και το μοντέλο D το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4 και είναι το πιο κατάλληλο για την σκληρομέτρηση των πετρωμάτων.



Σχήμα 6.5. Σκληρόμετρο Shore

6.4.4 Χρησιμοποιούμενα δοκίμια

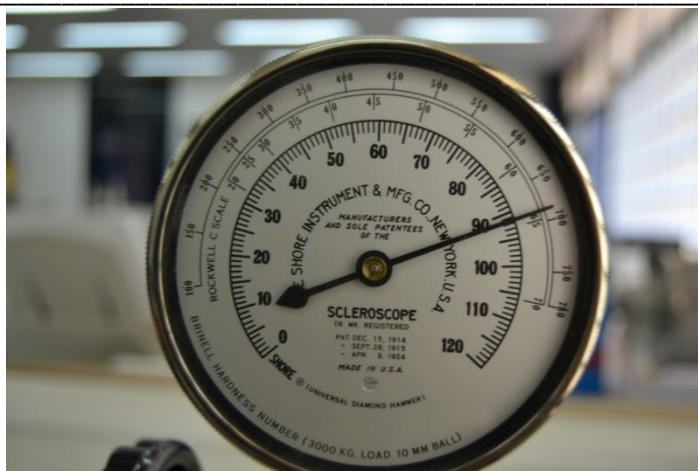
Οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται σε επίπεδες και καλά λειαθείσες εδαφικές επιφάνειες χρησιμοποιώντας κατάλληλη λειαντική πούδρα (No. 1800 grade aluminium oxide abrasive powder). Μία τραχεία εδαφική επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στις μετρήσεις κυρίως από την πλευρά της ανάγνωσης μειωμένων τιμών σκληρότητας του υλικού. Σε ότι αφορά τις διαστάσεις και την μορφή των δοκιμίων δεν υπάρχουν ιδιαίτεροι περιορισμοί αφού μπορεί να χρησιμοποιούνται και κυλινδρικά και κυβικά δοκίμια με κυμαινόμενο ύψος. Σε ότι αφορά τις διαστάσεις της επιφάνειας

δοκιμής απαιτείται ελάχιστο εμβαδό επιφάνειας 10 cm^2 και ελάχιστο πάχος 1 cm .

6.4.5 Η δοκιμή

Για την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων από την εργαστηριακή συσκευή Shore πρέπει να τηρούνται τα παρακάτω :

- Πριν την έναρξη των δοκιμών είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται 5 αναγνώσεις της σκληρότητας σε στάνταρντ δοκίμιο γνωστής σκληρότητας (παρεχόμενο από τον κατασκευαστή) και σε εύρος τιμών αντίστοιχο με αυτό της συσκευής. Εάν οι τιμές φθίνουν εντός του εύρους της σκληρότητας του δοκιμίου τότε η συσκευή λειτουργεί ικανοποιητικά.
- Δοκίμια μικρού μεγέθους πρέπει να συγκρατούνται με ασφάλεια στην επίπεδη επιφάνεια δοκιμής της συσκευής και να τοποθετούνται κάθετα στον άξονα του σκληροσκοπίου.
- Για την εκτέλεση μίας δοκιμής η συσκευή πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθετη θέση και να εφαρμόζει ακριβώς η άκρη του με την επιφάνεια του κυλινδρικού δοκιμίου που επίσης τοποθετείται σε κάθετη θέση. Στη συνέχεια ανεβαίνει το σφυρί με την βοήθεια των περιστρεφόμενων κουμπιών στην άνω θέση και το αφήνεται να πέσει και να χτυπήσει την επιφάνεια δοκιμής μετρώντας το ύψος αναπήδησης του σφυριού. Το ύψος στο οποίο το σφυρί αναπηδά δείχνει την σκληρότητα του υλικού.
- Προς αποφυγή σφαλμάτων που μπορεί να προέρχονται από κακή ευθυγράμμιση της συσκευής συνίσταται ο έλεγχος της καθετότητας.
- Γενικά πρέπει να αποφεύγονται δονήσεις στη συσκευή διότι εμποδίζουν την απρόσκοπτη πτώση του σφυριού και προκαλούν ανάγνωση χαμηλών τιμών σκληρότητας.
- Είναι απαραίτητο να διενεργούνται τουλάχιστον 20 δοκιμές για κάθε δοκίμιο σε θέσεις που απέχουν 5 mm μεταξύ τους και ποτέ να μην επαναλαμβάνεται μία δοκιμή στο ίχνος της προηγούμενης.



Φωτογραφία 6.10. Λεπτομέρεια μετρητικού οργάνου Σκληροσκοπίου Shore

6.4.6 Πειραματικά Αποτελέσματα

Οι γενικοί περιορισμοί στην χρήση του σκληροσκοπίου και στην ευρεία εφαρμογή του αναφέρονται σε σχέση με την κοκκομετρία του εξεταζόμενου πετρώματος και την ομογένειά του. Σε υλικά στρωσιγενή ή σε χονδρόκοκκα υλικά οι τιμές της σκληρότητας Shore παρουσιάζουν διακυμάνσεις και συνήθως εμφανίζονται μειωμένες.

Η σκληρότητα Shore ή εν συντομία SH συνδέεται από πολλούς ερευνητές με την αντοχή του πετρώματος σε ανεμπόδιστη θλίψη καθώς και με τα αποτελέσματα άλλων δοκιμών.

Γιά παράδειγμα αναφέρονται οι εμπειρικές σχέσεις του Wuerker ο οποίος εκτελώντας δοκιμές σε ομάδα 100 διαφορετικών πετρωμάτων κατέδειξε την σχέση μεταξύ SH και UCS σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

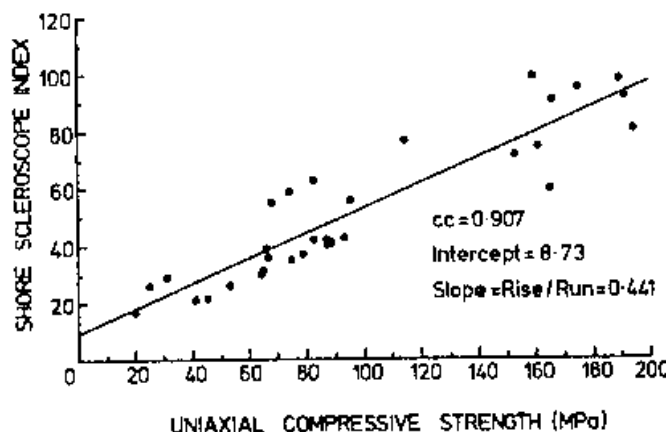
- (i) $CU = 2.8 SH$ (MPa) ως μέση τιμή
- (ii) $CU = 2.1 SH$ (MPa) ως κάτω όριο
- (iii) $CU = 3.4 SH$ (MPa) ως άνω όριο

Όπου CU είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ή Uniaxial Compressive Strength (UCS).

Μία άλλη σχέση του Atkinson είναι η γραμμικής μορφής εξίσωση:

$$CU = 3.54(SH - 12) \text{ (MPa)}$$

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.6 αποδεικνύεται ότι η συσκευή σκληρομέτρησης Shore μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες να αποτελέσει ένα αξιόπιστο εργαστηριακό εργαλείο για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των πετρωμάτων με μία καλή συσχέτιση με την αντοχή τους σε ανεμπόδιστη θλίψη.



Σχήμα 6.6. Συσχέτιση μεταξύ σκληρότητας Shore και UCS (Γ. Παναγιώτου 2002)

Σημείωση: Εκτελέστηκε δοκιμή σε πέντε δοκίμια. Στο κάθε δοκίμιο ορίστηκαν τέσσερις άξονες στους οποίους πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές σε σημεία που είχαν οριστεί και σε ένα τυχαίο σημείο είκοσι συνεχόμενες δοκιμές για να προσδιοριστεί ο δείκτης πλαστικότητας του δοκίμιου. Αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών στα δοκίμια Κα_01, Κα_02, Κα_03, Κα_04, Κα_05 φαίνονται στους πίνακες στο **Παράρτημα 3**.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.10 φαίνεται ο χαρακτηρισμός των πετρωμάτων ανάλογα με τη σκληρότητα τους.

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

Πίνακας 6.10. Χαρακτηρισμός πετρωμάτων με βάση τη σκληρότητα

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα της δοκιμής μέτρησης σκληρότητας Shore φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.11.

Δοκίμιο	Μ.Τ Σκληρότητας Shore	Μ.Τ. Πλαστικότητας
Κα_01	41,00	0,171
Κα_02	45,05	0,181
Κα_03	43,1	0,034
Κα_04	40,00	0,130
Κα_05	42,00	0,130

Πίνακας 6.11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής Shore

Με βάση τη μέση τιμή της σκληρότητας Shore η οποία υπολογίστηκε 42,1 το πέτρωμα χαρακτηρίζεται μέτριας σκληρότητας.

6.5 Δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar

6.5.1 Εισαγωγή

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 για πετρώματα, έχει επικρατήσει ως μέθοδος η αποτίμησης της αποξεστικής ικανότητας των πετρωμάτων στην εξόρυξη τους με μηχανικά μέσα.

6.5.2 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 φορτίου 70N. Κατά την επιβολή του φορτίου 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 χαλύβδινο κώνο ο οποίος παραμορφώνεται αποκτώντας επίπεδη επιφάνεια. Η μονάδα της αποξεστικότητας πετρώματος είναι η CAI (CERCHAR Abrasiveness Index).

6.5.3 Πειραματική συσκευή

Το κυλινδρικό δοκίμιο του πετρώματος συγκρατείται με τη βοήθεια μίας μέγγενης, η οποία μπορεί να μετακινείται εγκάρσια προς την βάση της συσκευής μέσω χειροτροχού, προσαρμοσμένου σε κοχλία με σπείρωμα βήματος 1mm/rev όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 6.11.



Φωτογραφία 6.11. Εργαστηριακή συσκευή Cerchar

6.5.4 Η δοκιμή

Επιλογή – προετοιμασία δοκιμών και κοπτικών ακμών

Τα δοκίμια επιλέγονται κατάλληλα έτσι ώστε να προσαρμόζονται στις σιαγώνες της μέγγενης. Η άνω πλευρά του δοκιμίου πρέπει να είναι επίπεδη. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της δοκιμής CERCHAR οι δοκιμές πρέπει να εκτελούνται σε ομαλές, φυσικά σπασμένες επιφάνειες.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι σε πολλά ανομοιογενή πετρώματα (όπως τα κροκαλοπαγή, χονδροκοκκώδης γρανίτης, σχιστολιθικά πετρώματα) δεν μπορεί να ληφθεί κατάλληλη ομαλή επιφάνεια πετρώματος με το σπάσιμο του πετρώματος με σφυρί ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή θραύσεως. Μετά από έρευνα βρέθηκε ότι ο δείκτης CERCCHAR επηρεάζεται από τους παρακάτω τρόπους με τους οποίους προετοιμάζεται η επιφάνεια των δειγμάτων:

(α) δείγματα με “τραχείες” επιφάνειες οι οποίες δημιουργήθηκαν φυσικά από θραύση με σφυρί

(β) δείγματα με “ομαλές” επιφάνειες, που δημιουργήθηκαν από κοπή με αδαμαντοπρίονο.

Έτσι οι τιμές CAI στα δοκίμια με “τραχείες” επιφάνειες αποδείχθηκε ότι παρουσιάζονται περίπου 0.5 μεγαλύτερες απ’ ότι στα δοκίμια με “ομαλές” επιφάνειες. Επομένως για τα ανομοιογενή και ανισότροπα πετρώματα που έχουν φυσικά θραυσμένες επιφάνειες ακατάλληλες για δοκιμή, προτείνεται η χρήση αδαμαντοπρίονου για την προετοιμασία τους και η μετέπειτα διόρθωση του δείκτη με την παρακάτω σχέση:

$$CAI = 0.99 \cdot CAI_S + 0.48$$

Όπου :

CAI: σε τραχεία επιφάνεια

CAI_S: σε ομαλή επιφάνεια

Καταλληλότητα πετρωμάτων

Κατά τη διάρκεια μίας δοκιμής ο χαλύβδινος κώνος χαράζει αύλακες στην επιφάνεια του πετρώματος όπως φαίνεται στην φωτογραφία 6.12 και το πέτρωμα προκαλεί φθορά στο κωνικό άκρο. Γενικά τα περισσότερα πετρώματα έχουν αποδειχθεί κατάλληλα για την δοκιμή CERCCHAR, πρέπει να αναφερθεί όμως ότι αυτή δεν ενδείκνυται για πολύ μαλακά πετρώματα ή για πάρα πολύ σκληρά. Στα μαλακά πετρώματα το κωνικό άκρο τείνει να διεισδύσει στα πετρώματα. Η διείσδυση διευκολύνεται τόσο περισσότερο όσο

μαλακότερο είναι το πέτρωμα. Κατά συνέπεια σε μαλακά πετρώματα το κωνικό άκρο βυθίζεται υπερβολικά στο πέτρωμα ανακατανέμοντας το αξονικό φορτίο επάνω στις πλευρές του κώνου και όχι στην κωνική αιχμή, με αποτέλεσμα ο υπολογιζόμενος δείκτης αποξεστικότητας του πετρώματος να είναι μικρότερος του αναμενόμενου. Αντίστοιχα εάν το πέτρωμα είναι πολύ σκληρό δεν μπορεί να χαραχθεί και να προσδιορισθεί κατάλληλα ο δείκτης αποξεστικότητας του. Επίσης εάν το πέτρωμα παρουσιάζει ανισοτροπία πρέπει να προσδιοριστεί ο δείκτης CAI για διάφορες διευθύνσεις.



Φωτογραφία 6.12. Δοκίμιο μετά από 5 δοκιμές

Μήκος χάραξης των δοκιμών

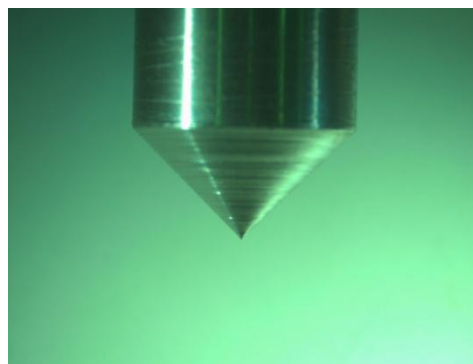
Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της δοκιμής CERCHAR το μήκος χάραξης πρέπει να είναι 10mm. Το 70% της απόξεσης της κοπτικής ακμής συμβαίνει στο πρώτο χιλιοστό της χάραξης ενώ το 85% του δείκτη παρατηρείται μετά από 2mm και μόνο 15% του δείκτη επιτυγχάνεται στα τελευταία 8mm. Επίσης για περαιτέρω αύξηση της τιμής του δείκτη κατά 20% απαιτείται μήκος χάραξης τουλάχιστον 50mm. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική γιατί δείχνει ότι η διακύμανση του δείκτη CAI που οφείλεται στη μεταβλητότητα του μήκους χάραξης είναι αμελητέα όταν το μήκος χάραξης είναι 9.5 έως 10.5mm (10 ± 0.6 mm).

Κατασκευή και επεξεργασία κοπτικών ακμών

Οι κοπτικές ακμές κατασκευάζονται υπό γωνία 90° όπως φαίνεται στην φωτογραφία 6.14. Η διαμόρφωση τους γίνεται με τη βοήθεια μηχανήματος (τόρνος). Είναι βολικό να κατασκευαστεί μια σειρά από τουλάχιστον 100 κοπτικά εργαλεία ώστε να υπάρχει απόθεμα για την εκτέλεση σειράς δοκιμών. Τα εργαλεία μπορούν, φυσικά να επανοξυνθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Κάθε εργαλείο θα πρέπει να αριθμείται για λόγους προσδιορισμού. Μετά από κάθε όξυνση, τα εργαλεία πρέπει να ελεγχθούν για να βεβαιωθεί εάν η ακμή είναι ικανοποιητικά αιχμηρή (ένας μεγεθυντικός φακός $\times 10$ είναι κατάλληλος για αυτή την εργασία).



Φωτογραφία 6.13. Τα δοκίμια Kb_01, Kb_02 με τις ακίδες που χρησιμοποιήθηκαν



Φωτογραφία 6.14. Κοπτική ακίδα πριν χρησιμοποιηθεί

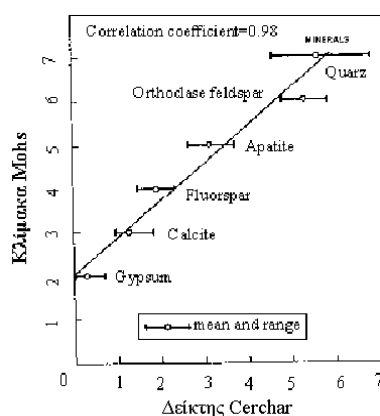
Για τη δοκιμή αποξεστικής ικανότητας χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκίμια στα οποία έγιναν δύο δοκιμές χρησιμοποιώντας δυο διαφορετικούς τύπους ακίδων. Η πρώτη δοκιμή έγινε με ακίδες χάλυβα σκληρότητας 40 κατά Rockwell, και η δεύτερη με χάλυβα σκληρότητας 55 κατά Rockwell. Τόσο στην πρώτη, όσο και στην δεύτερη περίπτωση, εφαρμόστηκε βάρος 7kg στην ακίδα και στη συνέχεια δημιουργήθηκαν πέντε αύλακες μήκους 10mm σε κάθε δοκιμή. Μετά τις δοκιμές, και αφού καθαρίστηκε την κοπτική ακμή της ακίδας, για την μέτρηση της φθοράς χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο που φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία 6.15.



Φωτογραφία 6.15. Το μικροσκόπιο

6.5.5 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της δοκιμής Cerchar έχουν συγκριθεί με την κλίμακα σκληρότητας κατά Mohs η οποία αναφέρεται στην ικανότητα ενός σκληρότερου ορυκτού να χαράσσει ένα μαλακότερο ορυκτό. Έτσι δοκιμές Cerchar έχουν πραγματοποιηθεί σε ορυκτά γνωστής σκληρότητας κατά Mohs προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία της μεθόδου από τους κατασκευαστές, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται συγκριτικά στο παρακάτω Διάγραμμα του σχήματος 6.7 με συντελεστή συσχέτισης $r = 0.98$.



Σχήμα 6.7. Συσχέτιση τιμών μεταξύ κλίμακας Mohs και Δοκιμών Cerchar για διάφορα ορυκτά

Γενικά η αποξεστική ικανότητα του πετρώματος δεν είναι αναγκαστικά ή ίδια με την αποξεστική ικανότητα των ορυκτών του διότι παράγοντες όπως υλικά συνένωσης, το μέγεθος και η μορφή του κόκκου παίζουν ένα σημαντικό

ρόλο και διαφοροποιούν την παραπάνω ικανότητα του πετρώματος. Έτσι το πλεονέκτημα της δοκιμής Cerchar έναντι της κλίμακας Mohs είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί και στα ορυκτά αλλά και στα πετρώματα σε αντίθεση με την κλίμακα Mohs που έχει εφαρμογή αποκλειστικά και μόνο στα ορυκτά.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 6.12. Πρόκειται για την μέση τιμή του δείκτη Cerchar καθώς και η τυπική απόκλιση των 5 δοκιμών και με τους δύο τύπους ακίδων.

Σημείωση: Αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών βρίσκονται στο **Παράρτημα 1.**

Σκληρότητα ακίδας	HRC 40		HRC 55	
Δοκίμια	Μ.Τ. δείκτη Cerchar	Τυπική απόκλιση	Μ.Τ. δείκτη Cerchar	Τυπική απόκλιση
Kb_01	2,08	0,30	1,15	0,25
Kb_02	2,14	0,22	0,94	0,22
Kb_03	2,01	0,27	1,03	0,31
Kb_04	2,18	0,36	0,65	0,25
Kb_05	2,10	0,24	0,47	0,13

Πίνακας 6.12. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών

Στον παρακάτω πίνακα 6.13 φαίνεται η συγκεντρωτική κατάταξη των πετρωμάτων από πολύ λίγο αποξεστικά ως εξαιρετικά αποξεστικά, τόσο ανάλογα με τον δείκτη CAI όσο και με την σκληρότητα της ακίδας.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

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

Πίνακας 6.13. Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον δείκτη αποξεστικότητας.

(Θ. Μιχαλακόπουλος *et al*, 2005)

Με βάση τον παραπάνω πίνακα και τα αποτελέσματα της δοκιμής CERCHAR έγινε ο χαρακτηρισμός της φθοροποιοιότητας που φαίνεται στους παρακάτω πίνακες 6.14, 6.15.

Δοκίμια	MT δείκτη CERCHAR	Χαρακτηρισμός
Kb_01	2,08	Μετρίως φθοροποιοί
Kb_02	2,14	Μετρίως φθοροποιοί
Kb_03	2,01	Μετρίως φθοροποιοί
Kb_04	2,18	Μετρίως φθοροποιοί
Kb_05	2,10	Μετρίως φθοροποιοί

Πίνακας 6.14. Χαρακτηρισμός δοκιμών βάσει της μ.τ. του δείκτη CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 40

Δοκίμια	MT δείκτη CERCHAR	Χαρακτηρισμός
Kb_01	1,15	Μετρίως φθοροποιοί
Kb_02	0,94	Λίγο φθοροποιοί
Kb_03	1,03	Μετρίως φθοροποιοί
Kb_04	0,65	Λίγο φθοροποιοί
Kb_05	0,47	Λίγο φθοροποιοί

Πίνακας 6.15. Χαρακτηρισμός δοκιμών βάσει της μ.τ. του δείκτη CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

7.1. Εισαγωγή

Η ενέργεια που απαιτείται για να επιτευχθεί η θραύση μιας μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος 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 $\frac{J}{m^3}$.

Από τον ορισμό γίνεται κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική ενέργεια εκσκαφής ενός πετρώματος τόσο περισσότερη ενέργεια πρέπει να καταναλωθεί για την όρυξη μονάδας όγκου του και συνεπώς είναι δυσκολότερη και πιο δαπανηρή 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’ ότι απαιτούνται, σε τριβή μεταξύ του κοπτικού άκρου και του πετρώματος ή σε μηχανικές απώλειες εκτός συστήματος πετρώματος – κοπτικού.

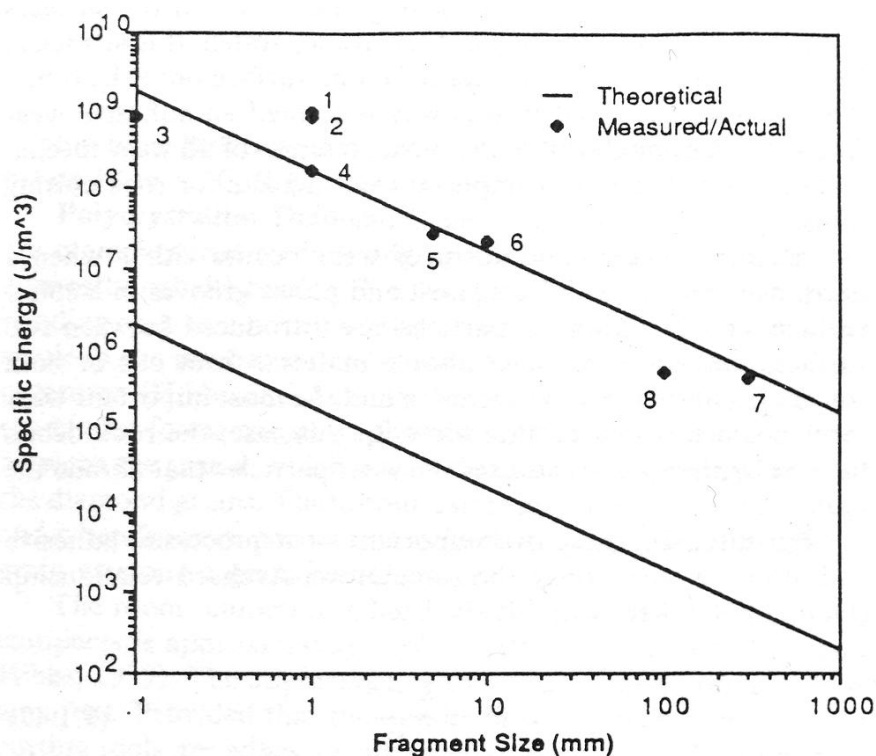
Η κατάτμηση των θραυσμάτων του πετρώματος σε κλάσματα μικρότερα απ’ ότι χρειάζεται, ενδέχεται να έχει δυσανάλογο αντίκτυπο στην ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή δεδομένου όγκου πετρώματος. Δεν είναι μόνο ότι περισσότερα κομμάτια θραύονται χωρίς λόγο, αλλά και η ειδική

ενέργεια αυξάνει αξιοσημείωτα με τη μείωση του μεγέθους των εν λόγω τεμαχιδίων.

7.2. Πεδίο εφαρμογής των μεθόδων κοπής πετρωμάτων

Η ειδική ενέργεια εκσκαφής εξαρτάται τόσο από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη θραύση του πετρώματος όσο και από τον τύπο του πετρώματος. Η παράμετρος αυτή λοιπόν είναι το πιο χρήσιμο μέτρο για να προβλεφτεί η 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 παραχθέντων 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 αδαμαντοτοκορώνα, (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/m^2) 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 διεισδυτικά 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.

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

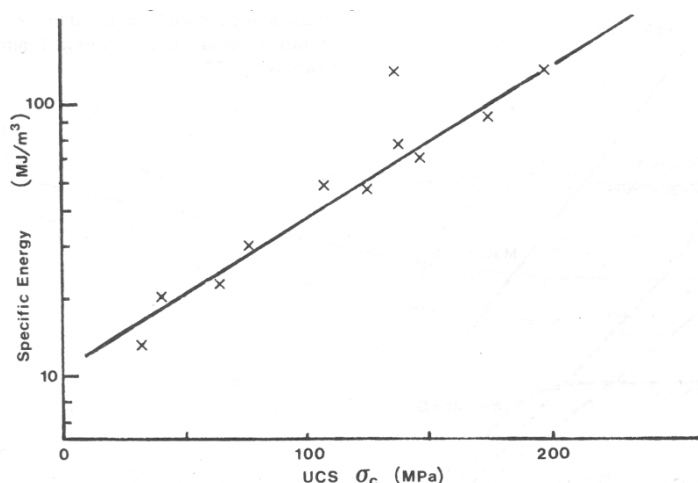
στο πέτρωμα γεγονός το οποίο με τη σειρά του περιορίζει το ρυθμό εκσκαφής του πετρώματος. Αυτός ο περιορισμός στο ρυθμό μεταφοράς ενέργειας, προκύπτει λόγω του ότι ο ρυθμός φθοράς ή και αστοχίας των υλικών των κοπτικών άκρων αυξάνει όσο αυξάνει και η μεταφερόμενη μέσω αυτών ενέργεια στο πέτρωμα. Σε χαμηλής 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 απαράδεκτα μικρή διάρκεια ζωής των κοπτικών άκρων.

7.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την ειδική ενέργεια εκσκαφής

7.3.1 Ιδιότητες του πετρώματος

α) αντοχή σε φόρτιση (θλίψη-εφελκυσμός)

Όπως προβλέπεται και από τις θεωρίες κοπής, αύξηση της αντοχής των πετρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των δυνάμεων κοπής. Υψηλές δυνάμεις κοπής παράγουν μεγάλες τιμές έργου δηλαδή προϋποθέτουν μεγάλες τιμές ενέργειας για την όρυξη μονάδας όγκου ή αλλιώς υψηλές τιμές της ειδικής ενέργειας εκσκαφής, (σχήμα 7.2).

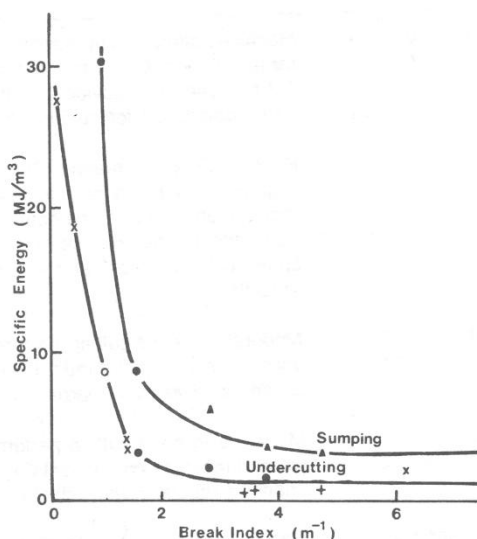


Σχήμα 7.2. Επίδραση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στην ειδική ενέργεια εκσκαφής (Αναγνώστου 2006)

β) ασυνέχειες πετρώματος

1) απόσταση ασυνεχειών

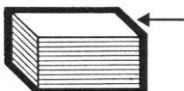
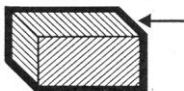
Κατά την όρυξη πετρώματος που διατέμνεται από συστήματα ασυνεχειών η μέση δύναμη κοπής μειώνεται εκθετικά με την μείωση της απόστασης των ασυνεχειών. Επίσης η ύπαρξη ασυνεχειών απόστασης μικρότερης των 300mm καθιστά τις δυνάμεις κοπής ανεξάρτητες των ιδιοτήτων του συμπαγούς πετρώματος. Από τις παραπάνω διαπιστώσεις είναι φανερό πως η ύπαρξη ασυνεχειών μειώνει τις τιμές της ειδικής ενέργειας εκσκαφής, (Σχήμα 7.3).



Σχήμα 7.3. Επίδραση της απόστασης των ασυνεχειών ιλυολιθικών πετρωμάτων στην ειδική ενέργεια εκσκαφή(Αναγνώστου 2006)

2) διεύθυνση ασυνεχειών

Η διεύθυνση των ασυνεχειών του πετρώματος ως προς την διεύθυνση της κοπής παίζει καθοριστικό ρόλο στην τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής, (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, (Αναγνώστου 2006)

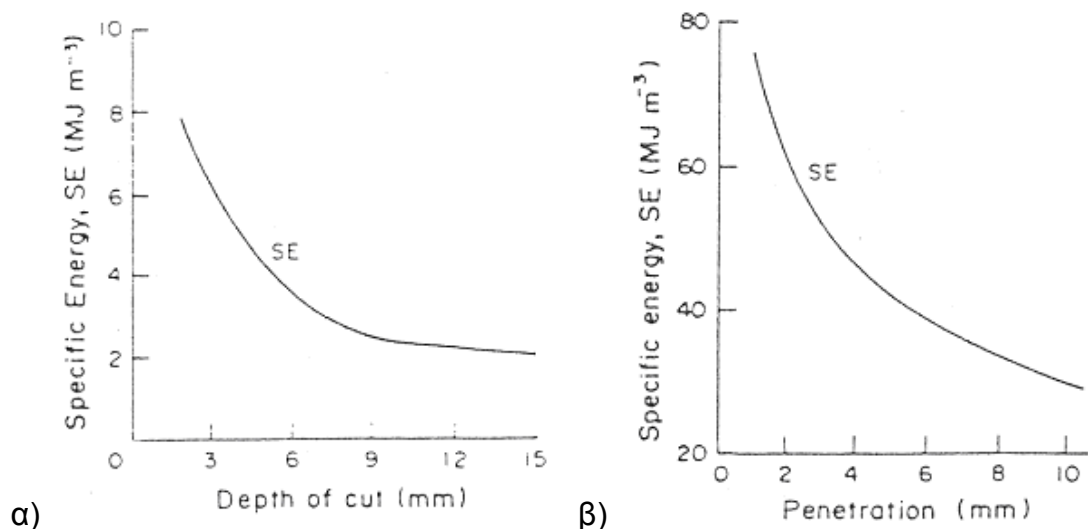
7.3.2 Παράμετροι εκσκαφής

α) τύπος κοπτικού εργαλείου

Ο τύπος του κοπτικού εργαλείου όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καθορίζει το μηχανισμό της κοπής. Έτσι για διαφορετικά κοπτικά εργαλεία για το ίδιο βάθος κοπής αναπτύσσονται διαφορετικές δυνάμεις με διαφορετική ποσότητα εξορυγμένου υλικού, δηλ. διαφορετικές τιμές ειδική ενέργειας εκσκαφής.

β) βάθος κοπής

Για το ίδιο κοπτικό εργαλείο η ειδική ενέργεια εκσκαφής, όπως προβλέπεται από τις θεωρίες κοπής και αποδεικνύεται πειραματικά, μειώνεται όσο αυξάνει το βάθος κοπής, (σχήμα 7.5).

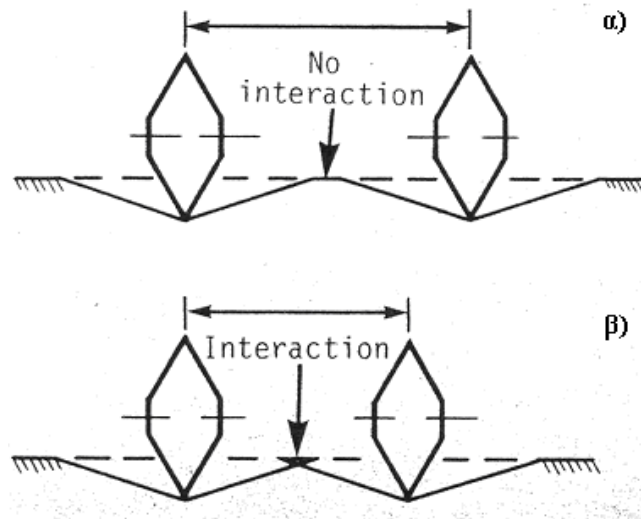


Σχήμα 7.5. Ειδική ενέργεια εκσκαφής συναρτήσει του βάθους κοπής για α) κοπτικό συρόμενου τύπου, β) κοπτικό τύπου δίσκου (Αναγνώστου 2006)

γ) διάταξη κοπτικών εργαλείων

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.

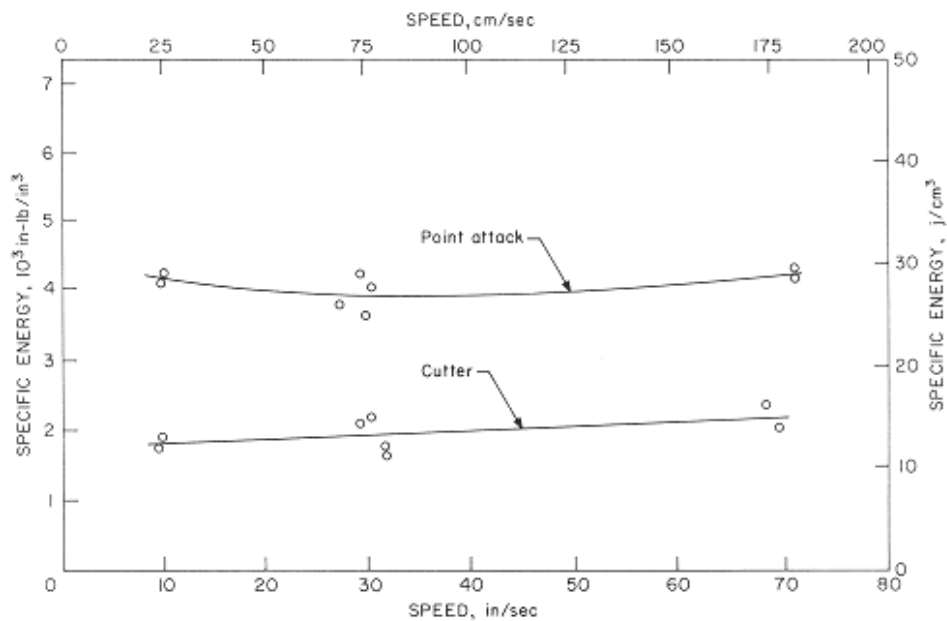
Για δεδομένο κοπτικό εργαλείο και βάθος κοπής αναλόγως του βαθμού αλληλεπίδρασης των κοπτικών εργαλείων υπάρχουν δύο ενδεχόμενα που δύναται να προκύψουν λόγω της απόστασης διαδοχικών κοπτικών: α) μη αλληλεπίδραση, β) αλληλεπίδραση (σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6. Αλληλεπίδραση διαδοχικών κοπτικών (Αναγνώστου 2006)

δ) ταχύτητα κοπής

Η ταχύτητα κοπής έχει βρεθεί πειραματικά ότι δεν έχει επίδραση στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή, (σχήμα 7.7). Αυτό οφείλεται στο ότι οι ταχύτητες θραύσεως των πετρωμάτων (π.χ. γρανίτης 1875 m/sec) είναι μεγαλύτερες από τις συνήθειες ταχύτητες κοπής.



Σχήμα 7.7. Επίδραση της ταχύτητας κοπής στην ειδική ενέργεια εκσκαφής, (Αναγνώστου 2006)

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*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

8.1 Εισαγωγή

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 3-3.5μm και 9-10% περιεκτικότητα σε κοβάλτιο

Πλάτος αιχμής (W): 12.7 mm

Γωνία εμπρόσθιας ελευθερίας (α): 5°

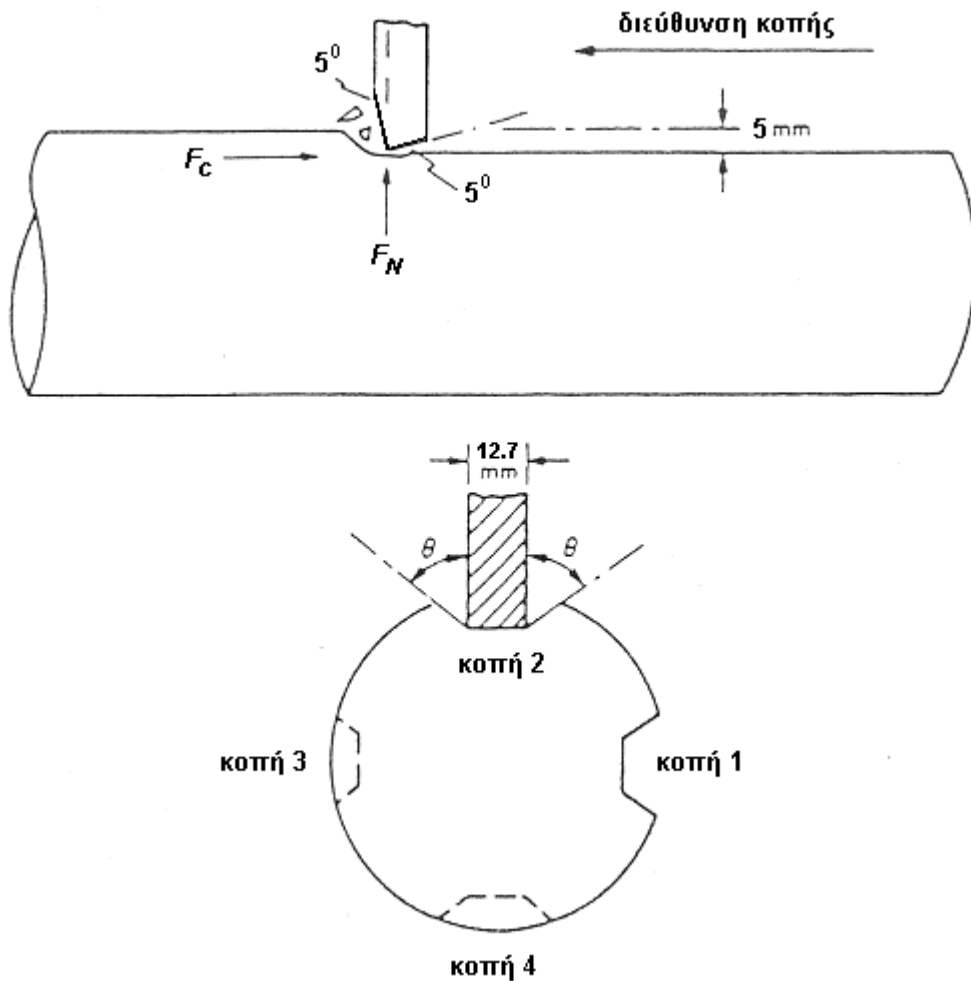
Γωνία οπίσθιας ελευθερίας (β): -5°

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. (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

Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη

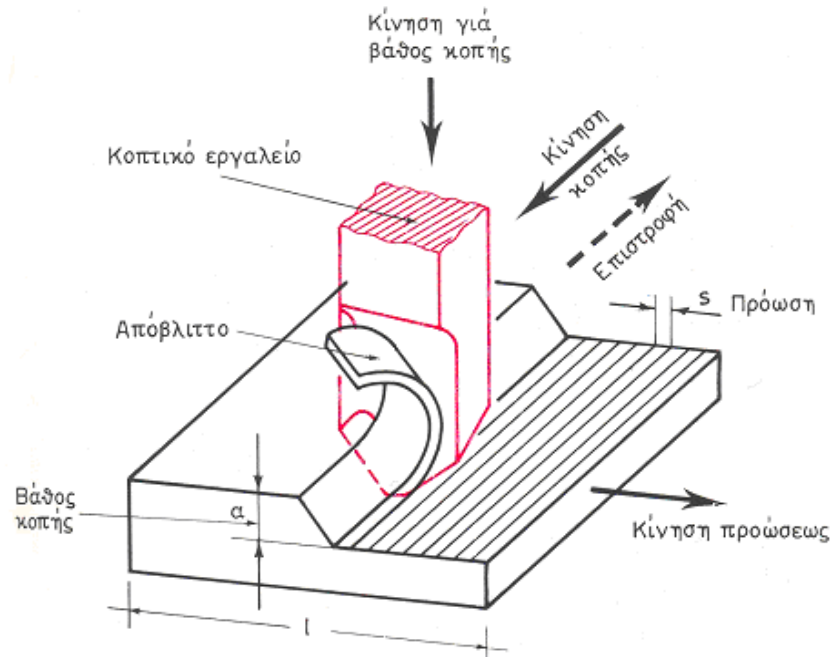
Γενικά

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:

- 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.

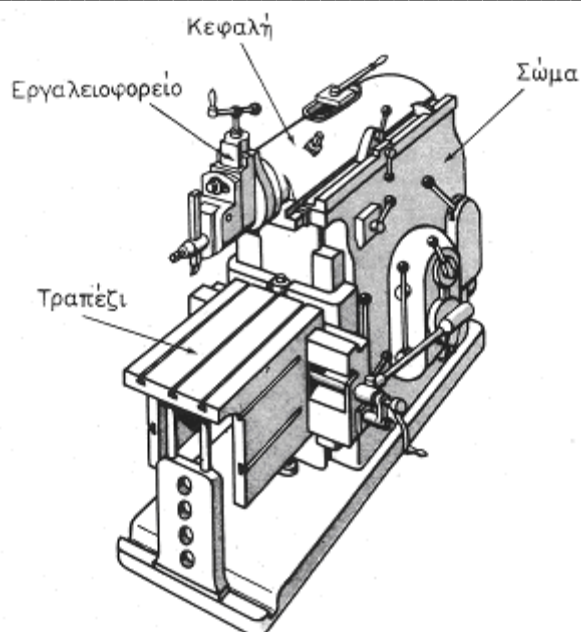


Σχήμα 8.2. Κινήσεις κοπτικού και επιφάνειας κατεργασίας σε ένα πλήρη κύκλο εργασίας πλανίσματος

Περιγραφή και λειτουργία ταχυπλάνης

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

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 τραπέζιού της πλάνης έτσι ώστε το κοπτικό να προσβάλλει συμμετρικά τη γενέτειρα. Ρυθμίζεται το βάθος κοπής στα 5 mm με το χειρομοχλό του εργαλειοφορείου 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 λογισμικού

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 ρυθμίζεται 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

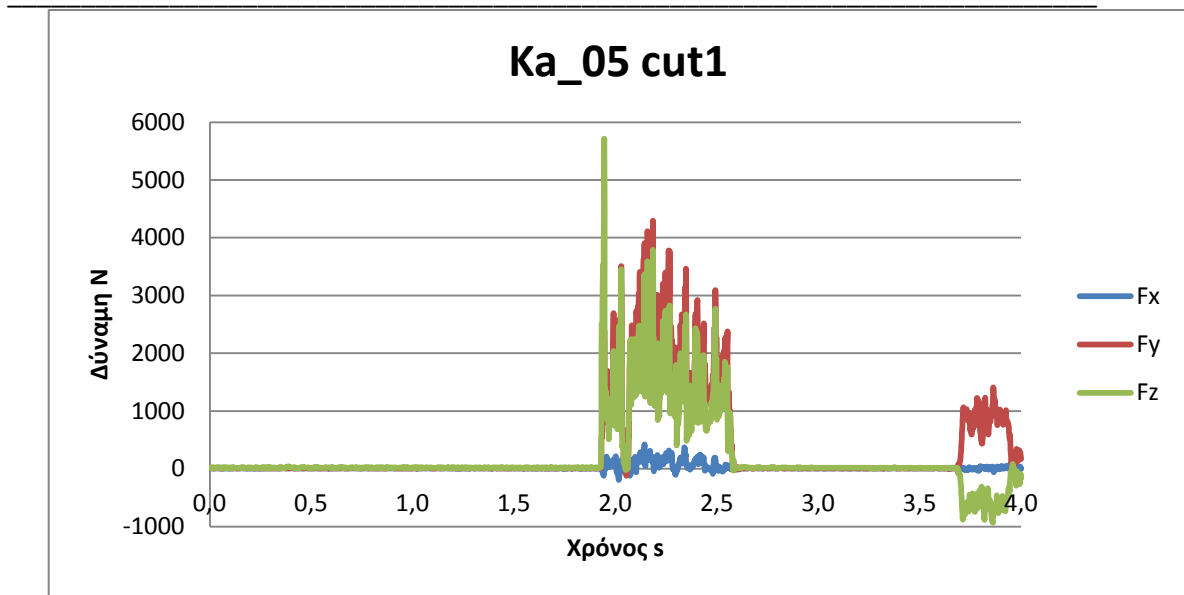
Όταν το κοπτικό φθάσει στο πέρας της διαδρομής της κεφαλής τοποθετείται ο συμπλέκτης σε θέση αποσύμπλεξης και τερματίζεται από το πρόγραμμα η καταγραφή του σήματος. Τερματίζεται η λειτουργία της πλάνης και μετράται η διαφορά μάζας του δοκιμίου.

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.

8.3 Πειραματικά αποτελέσματα- Υπολογισμοί

Μετά από κάθε δοκιμή κοπής τα δεδομένα (δυνάμεις , χρόνος) εισάγονται στον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με την εργαστηριακή συσκευή. Αυτά τα δεδομένα υπέστησαν επεξεργασία για να υπολογιστεί η πραγματική δύναμη κοπής, ο συντελεστή κοπής και η ειδική ενέργεια εκσκαφής. Παρακάτω φαίνεται το αρχικό διάγραμμα δυνάμεων – χρόνου για το δοκίμιο Κα_05 (Σχήμα 8.4).

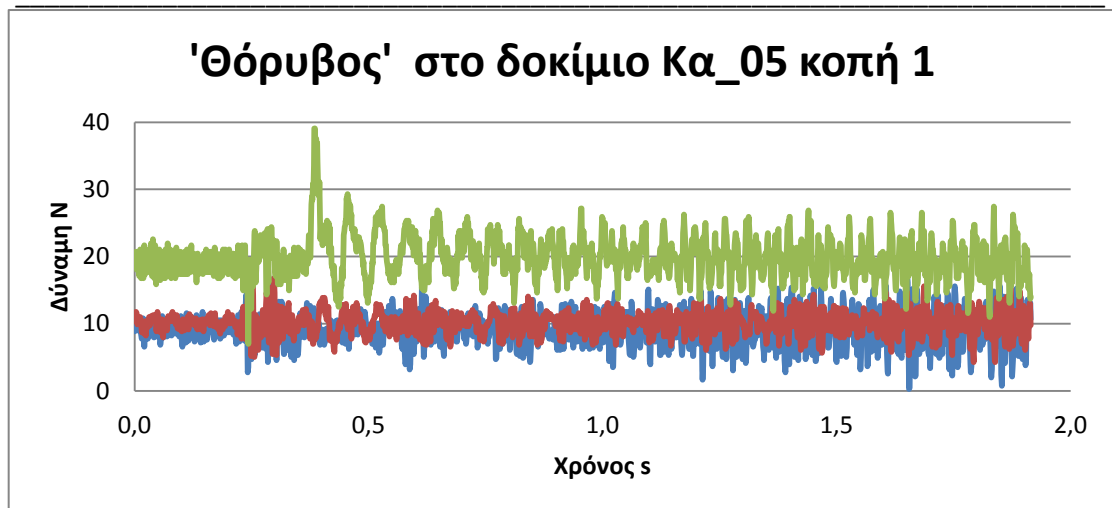


Σχήμα 8.4. Το αρχικό διάγραμμα δύναμης – χρόνου στο δοκίμιο Ka_05 στην 1^η κοπή

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η περιοχή ενδιαφέροντος είναι περίπου από 1,9 ως 2,6 s. Αρχικά το κοπτικό κάνει τη διαδρομή προς το δοκίμιο χωρίς να έρχεται σε επαφή με αυτό (0 ως περίπου 1,9s) και μετά την κοπή του δοκιμίου έχουμε την επιστροφή του κοπτικού στην αρχική του θέση καθώς η κίνησή του είναι παλινδρομική(περίπου από 2,6 ως 4 s στο διάγραμμα).

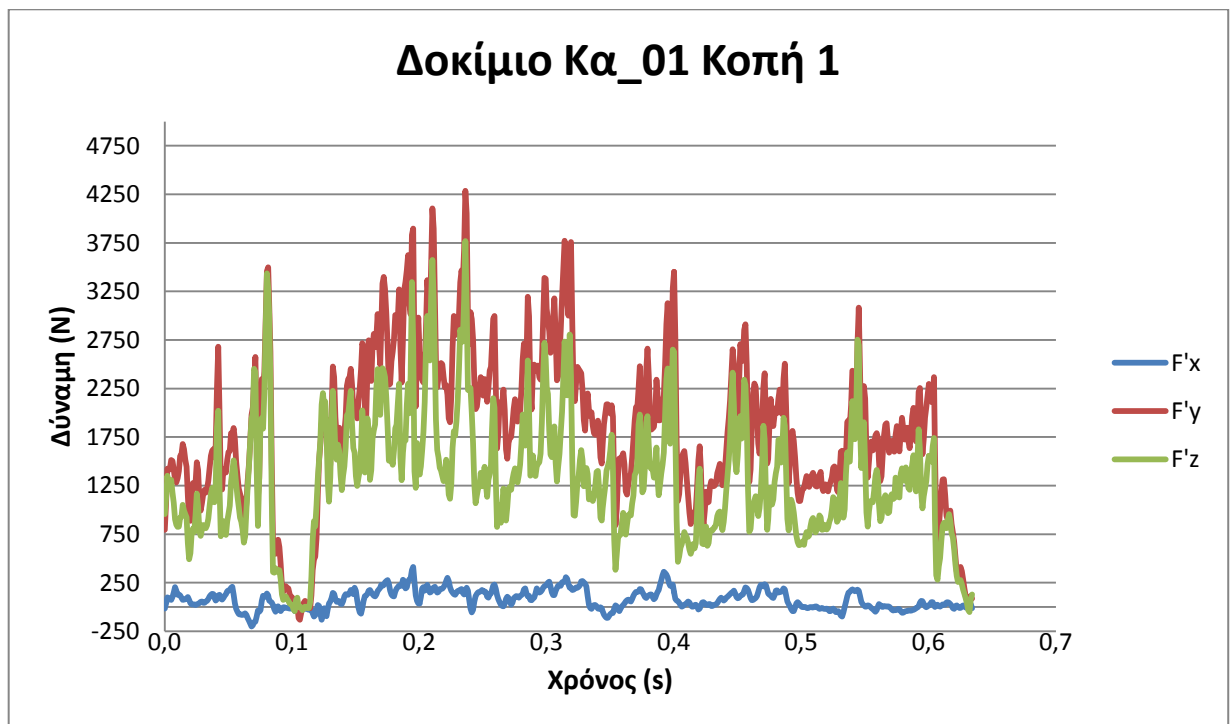
Επεξεργασία μετρήσεων

Για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων αφού απομονώθηκε η περιοχή που ενδιαφέροντος αφαιρέθηκαν από τις δυνάμεις Fx, Fy, Fz οι ενδείξεις του υπολογιστή στις περιοχές που δεν υπάρχει επαφή του κοπτικού με το δοκίμιο (θόρυβος). Αυτές οι ενδείξεις φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 8.5.



Σχήμα 8.5. Ο θόρυβος στο δοκίμιο Κα_05 κοπή 1^η

Το διάγραμμα των δυνάμεων της κοπής του Κα_01 μετά την διόρθωση των δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6. Διάγραμμα δύναμης-χρόνου μετά την διόρθωση των δεδομένων

Σημείωση: Τα υπόλοιπα διαγράμματα βρίσκονται στο **Παράρτημα 2**.

Μετά την κατασκευή των διαγραμμάτων υπολογίστηκαν η μέση δύναμη κοπής και ο συντελεστής κοπής των δοκιμίων. Ως συντελεστής κοπής ορίζεται ο λόγος της δύναμης κοπής προς την κάθετη δύναμη και δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Συντελεστής Κοπής} = F_z / F_y$$

Δοκίμιο	Μέση δύναμη κοπής (N)	Συντελεστής Κοπής
Κα_05 κοπή 1	1325,9	0,780
Κα_05 κοπή 2	1881,9	0,635
Κα_05 Κοπή 3	1342,1	0,703
Κα_05 Κοπή 4	1822,5	0,649
Μέση τιμή	1593,1	0,691
Δοκίμιο		
Κα_09 κοπή 1	1461,7	0,518
Κα_09 κοπή 2	3691,0	1,055
Μέση τιμή	2576,3	0,786
Δοκίμιο		
Κα_10 κοπή 1	1903,8	0,818
Κα_10 κοπή 2	1677,7	0,551
Κα_10 Κοπή 3	1633,4	0,487
Κα_10 Κοπή 4	1184,2	0,601
Μέση τιμή	1599,7	0,614
Δοκίμιο		
Κα_11 κοπή 1	1227,8	0,613
Κα_11 κοπή 2	1695,3	0,487
Κα_11 Κοπή 3	1453,6	0,520
Κα_11 Κοπή 4	1181,1	0,610
Μέση τιμή	1389,4	0,557

Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα από τη δοκιμή κοπής

8.4 Υπολογισμός ειδικής ενέργειας εκσκαφής

Για τον υπολογισμό του *δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής* απαιτείται το έργο των δυνάμεων κατά την κοπή. Οι δυνάμεις F_x και F_y δεν παράγουν έργο γιατί μετατοπίζουν το σημείο εφαρμογής τους κάθετα προς τη διεύθυνση τους. Έτσι η συνολική ενέργεια που δαπανάται κατά την κοπή ισούται με το έργο της δύναμης κοπής F_z η οποία μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής της κατά τη διεύθυνση της και είναι: $W = \int F_z \cdot dl$ με F_z δύναμη κοπής και dl στοιχειώδους μετακίνηση του κοπτικού.

Το δυναμόμετρο της διάταξης είναι ψηφιακό και είναι ρυθμισμένο να καταγράφει τιμές δυνάμεων (F_i) κάθε 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου. Στην πεπερασμένη αυτή μεταβολή του χρόνου ($\delta t = 1 \text{ msec}$) αντιστοιχεί μετατόπιση του κοπτικού κατά δl . Αν υποτεθεί ότι η ταχύτητα του κοπτικού είναι σταθερή κατά την κοπή τότε γνωρίζοντας τον συνολικό χρόνο κοπής από το διάγραμμα δυνάμεων-χρόνου και του μήκους του δοκιμίου υπολογίζεται η ταχύτητα κοπής:

$$v_{\text{κοπή}} = \frac{\text{μήκος δοκιμίου}}{\text{χρόνος κοπής}}. \text{ Έτσι γνωρίζοντας την ταχύτητα υπολογίζεται}$$

και η μετατόπιση δl που αντιστοιχεί σε χρόνο δt : $\delta l = v_{\text{κοπή}} \cdot \delta t$

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 8.2) φαίνονται οι μεταβολές βάρους των δοκιμίων μετά από κάθε δοκιμή κοπής, Από αυτά τα δεδομένα υπολογίστηκε ο όγκος του εξορυγμένου υλικού (πίνακας 8.3).

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**

Δοκίμια	Αρχικό Βάρος (gr)	1η Κοπή (gr)	2η Κοπή (gr)	3η Κοπή (gr)	4η Κοπή (gr)
Κα_05	902,0	886,2	868,6	852,0	831,9(θραύση)
Κα_06	905,3	889,2	874,2	859,0	843,7
Κα_07	924,4	909,5	894,8	878,2	865,7(θραύση)
Κα_08	882,6	856,1	832,1	813,2(θραύση)	-
Κα_09	936,0	927,8*	855,8* (θραύση)	-	-
Κα_10	806,0	765,9**	739,7	706,4	688,5
Κα_11	938,0	928,1	916,5	913,6	907

* βάθος κοπής <5mm περίπου 4mm

**βάθος κοπής >5mm περίπου 6,5mm

Πίνακας 8.2. Μεταβολή βάρους δοκιμών μετά από κάθε κοπή

Τέλος, διαιρώντας την τιμή του έργου της δύναμης κοπής με τον όγκο εξορυγμένου πετρώματος από την κοπή (διαφορά μάζας πριν και μετά την κοπή δια της πυκνότητας) υπολογίζεται η **ειδική ενέργεια εκσκαφής (βλ. πίνακα 8.4).**

Βάρος του όγκου που εξορύχτηκε (gr)				
Δοκίμια	1η δοκιμή	2η δοκιμή	3η δοκιμή	4η δοκιμή
Κα_05	5,86	6,53	6,16	7,46
Κα_09	3,03	26,6		
Κα_10	14,85	9,70	12,33	6,63
Κα_11	3,66	4,29	1,07	2,44

Πίνακας 8.3. Ο εξορυγμένος όγκος μετά από κάθε κοπή

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ**

	Ειδική Ενέργεια Εκσκαφής (MJ/m ³)				M.T
Ka_05	33,08	42,15	31,87	35,74	35,71
Ka_09	73,07	21,01			47,04
Ka_10	16,75	22,59	17,30	23,34	19,99
Ka_11	50,91	59,99	205,74	73,45	97,52

Πίνακας 8.4. Η Ειδική ενέργειας εκσκαφής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΕΞΟΡΥΞΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ SURFACE MINER

9.1 Γενικά

Η συνεχής βελτίωση των γνώσεων των ανθρώπων και η μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση τους σε ότι αφορά το περιβάλλον 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 αυτοκινούμενο μηχάνημα συνεχούς μηχανικής εξόρυξης που χρησιμοποιείται σε υπαίθρια ορυχεία, λατομεία και σε χωματουργικά έργα αλλά και σε εξορύξεις σε υπόγεια μέτωπα.

Χαρακτηρίζεται ως σύνθετο γιατί εκτελεί συγχρόνως τις τρεις βασικές φάσεις της εξόρυξης, δηλαδή την εξόρυξη, την φόρτωση και την απόθεση του υλικού όταν αυτό απαιτείται.

Το Surface Miner είναι ένα μηχάνημα το οποίο χρησιμοποιείται στην μεταλλευτική για εξόρυξη πετρωμάτων μέτριας έως υψηλής σχετικά 'σκληρότητας'.

9.2. Συγκρότηση του Surface Miner

Το Surface Miner αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. Υποδομή
2. Ανωδομή
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 811HP. Η ισχύς μεταβιβάζεται δια μέσου ενός ιμάντα που οδηγεί στο κοπτικό τύμπανο εξασφαλίζοντας έτσι την αποτελεσματική μεταφορά ισχύος. Επιπλέον τα υπόλοιπα μέρη κινούνται με υδραυλικό σύστημα.

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.



Φωτογραφία 9.1. Το μηχάνημα Surface miner

9.2.2. Ανωδομή

Στην ανωδομή 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 ανωδομής του μηχανήματος υπάρχει ένας κινητήρας 811HP. Το μηχάνημα αυτό έχει χωρητικότητα πετρελαίου 1500 l και κατανάλωση περίπου 80 l/h.



Φωτογραφία 9.2. Το μηχάνημα 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 1140 mm και είναι κατασκευασμένο από σκληρό μέταλλο (Brinell hardness HB 400).

Επί της κυλινδρικής επιφάνειας του τυμπάνου ευρίσκονται κοπτικά τοποθετημένα ελικοειδώς, τα οποία κόβουν το πέτρωμα και το οδηγούν στο κέντρο του μηχανήματος. Το κοπτικό τύμπανο και τα ανταλλάξιμα κοπτικά εργαλεία του μηχανήματος επιλέγονται 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 τύμπανου 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 εφαρμοσμένα σε μια

βάση σε καθορισμένη θέση. Τα φθαρμένα κοπτικά μπορούν να απομακρύνονται με απλή χαλάρωση του δακτυλιδιού.



Φωτογραφία 9.3. Το κοπτικό τύμπανο του Surface miner

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 ανωδομής. Το μήκος του βραχίονα είναι σταθερό.

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.

9.3. Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Το Surface Miner αρχικά είχε σχεδιαστεί για κοπή μαλακών έως ημίσκληρων πετρωμάτων με αντοχή σε θλίψη μέχρι 70 MPa. Σήμερα έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει σε πετρώματα με αντοχή σε θλίψη μεταξύ 10 - 120 MPa.

Το βάρος του και η ισχύς που διαθέτει μετατρέπεται σε δυνάμεις κοπής (ορθή δύναμη και κοπτική). 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 κεκλιμένου στρώματος.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι εργασίας για την εξόρυξη κεκλιμένου στρώματος εξαρτώμενες πάντα από την κλίση του. Έχει επίσης τη δυνατότητα να διαμορφώνει δικές του ράμπες με κλίση 10 - 15% περίπου. Οι ράμπες αυτές μπορούν να κόβονται με κατεύθυνση προς τα πάνω ή προς τα κάτω.

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

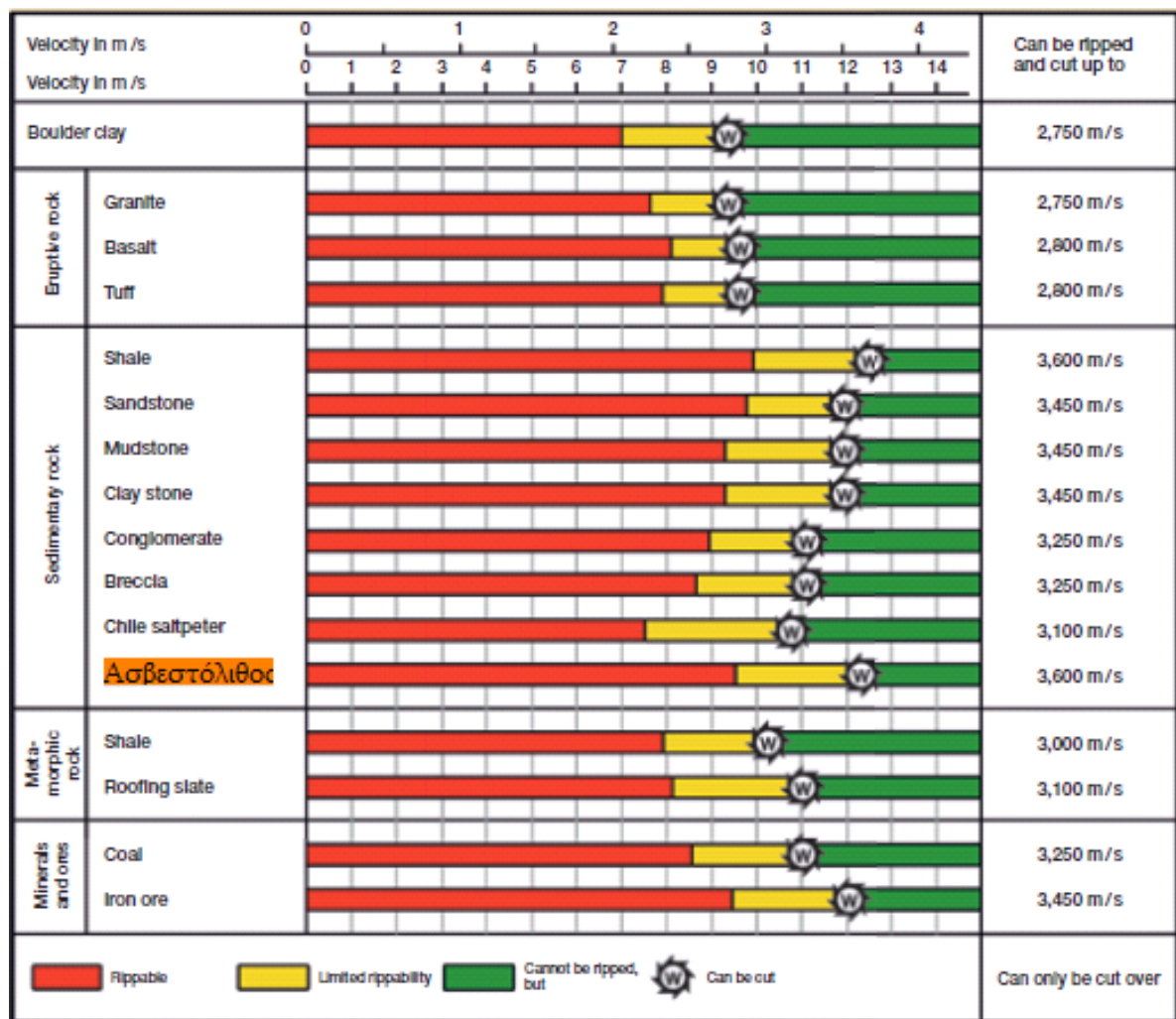
- Τον τύπο κοπτικού εργαλείου
- Την γωνία των εργαλείων κοπής
- Τη ταχύτητα του κοπτικού τυμπάνου
- Το βάθος κοπής
- Την ταχύτητα προχώρησης μηχανήματος

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 3000 – 4800 mm.

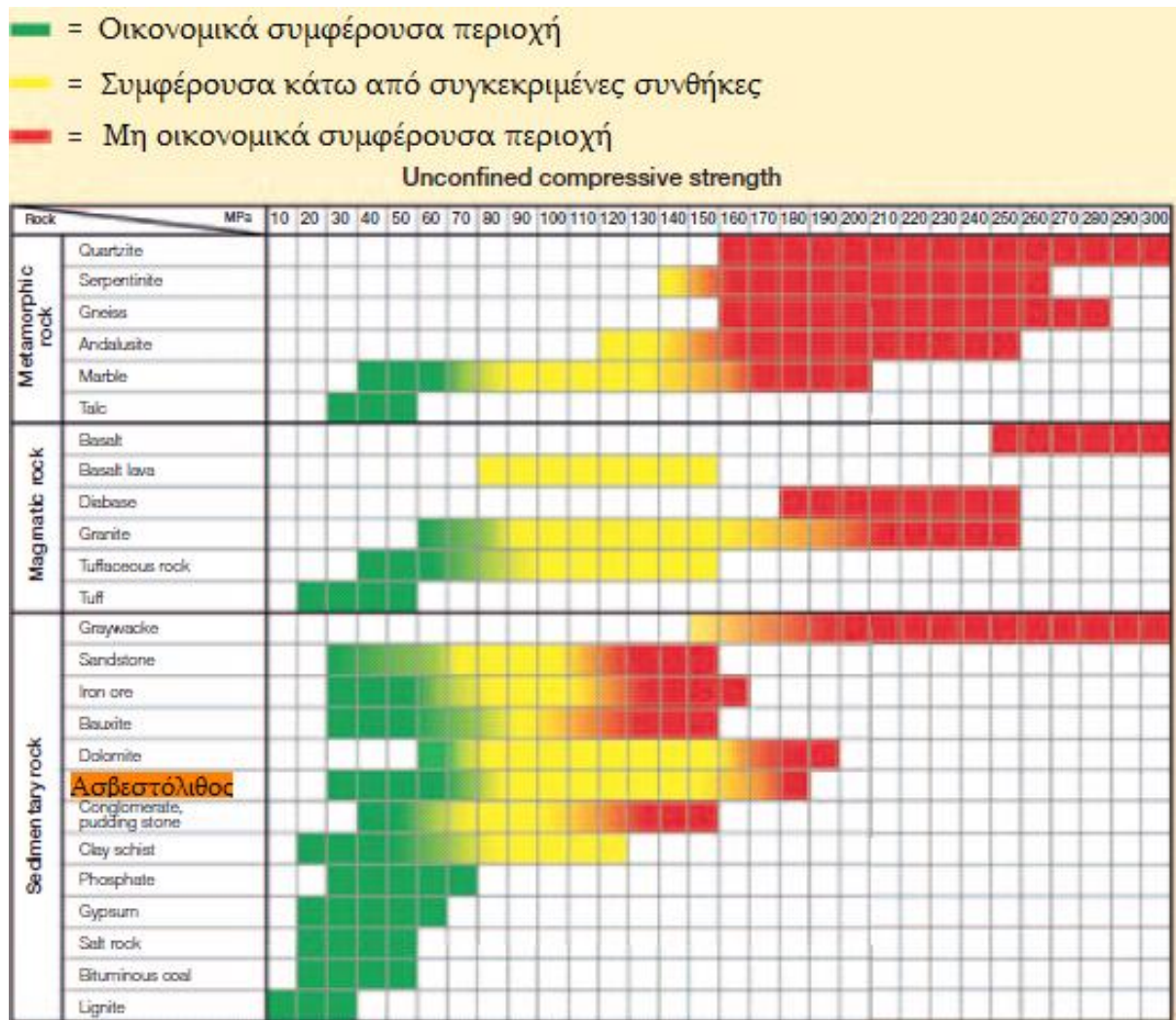
Το μηχάνημα αυτό έχει την ικανότητα και την ευελιξία να μπορεί να φορτώνει τα χωματουργικά οχήματα είτε από το πίσω μέρος είτε από τα πλάγια.

9.4. Διαγράμματα λειτουργίας του Surface Miner

Στην αριστερή μεριά του σχήματος 9.1 φαίνονται τα πετρώματα που συναντώνται συνήθως στη φύση. Ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων κρίνεται αν ένα πέτρωμα μπορεί να εξορυχτεί. Αντίστοιχα, στο σχήμα 9.2 κρίνεται αν είναι οικονομικά συμφέρουσα η εξόρυξη του, ανάλογα με την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη.



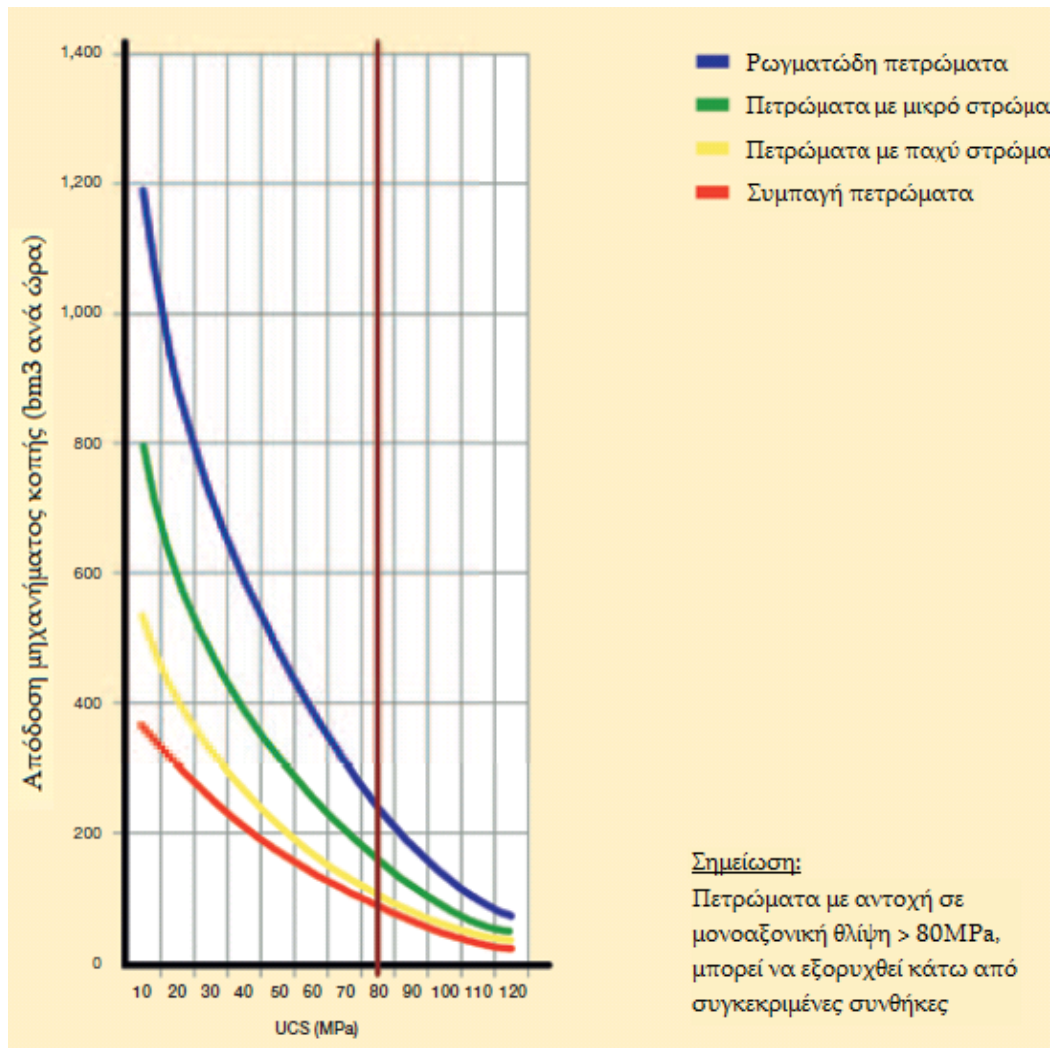
Σχήμα 9.1. Δυνατότητα εξόρυξης πετρωμάτων ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης κυμάτων



Σχήμα 9.2. Σχέση οικονομικότητας και αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

9.5. Παραγωγική ικανότητα της μεθόδου

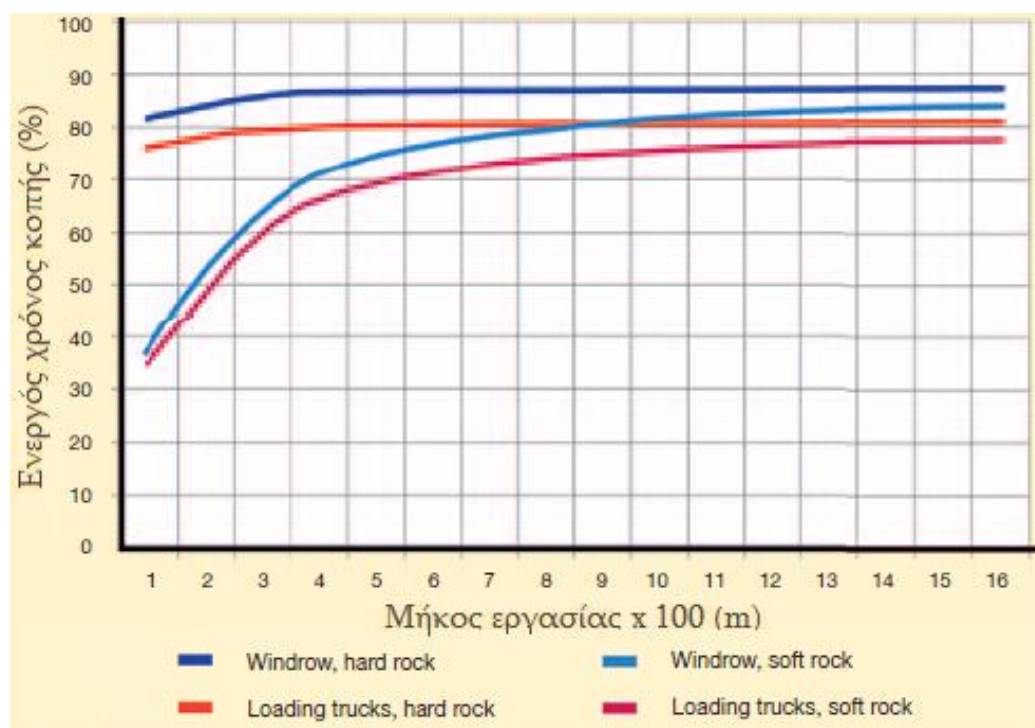
Η μέθοδος εξόρυξης του ασβεστόλιθου με το Surface Miner έχει αποδειχτεί αρκετά αποτελεσματική όσον αφορά την επίδοση του, όταν βέβαια επικρατούν οι απαιτούμενες συνθήκες εργασίας. Στο σχήμα 9.3 δίνεται η απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος.



Σχήμα 9.3. Απόδοση του Surface Miner 2500 SM ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πετρώματος

Με την βοήθεια του σχήματος 9.3 που αναφέρεται σε Surface Miner τύπου 2500 SM μπορούμε να δώσουμε μια τάξη μεγέθους της απόδοσης του για σκληρά πετρώματα. Αυτή είναι από 50 – 100 bm^3 ανά ώρα.

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



Σχήμα 9.4. 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 η κοκκομετρία του εξορυγμένου υλικού ενδέχεται να είναι η βέλτιστη αποκλείοντας δευτερογενή θραύση.

9.6. Διαδικασία εξόρυξης ασβεστόλιθου

Η εξόρυξη του ασβεστόλιθου από το Surface Miner γίνεται συνήθως σε μια επίπεδη επιφάνεια μεγάλης έκτασης σχήματος έλλειψης.

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 που κυμαίνεται από 16 – 25mm. Η περιστροφή του κοπτικού κυμαίνεται 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:

- Κερματισμός υλικού. 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 και ο χρόνος φόρτωσης των χωματουργικών αυτοκινήτων.

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



Φωτογραφία 9.4. Το μηχάνημα Surface miner σε λειτουργία

Αφού το μηχάνημα τελειώσει από ένα σημείο τότε το κοπτικό τύμπανο σηκώνεται και το μηχάνημα οδηγείται σε νέα θέση. 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 των κοπτικών στον ασβεστόλιθο και την κλίση του τυμπάνου κοπής, 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.

9.7. Τεχνικά προβλήματα από την χρήση του Surface Miner

Κάθε μέθοδος που χρησιμοποιείται στην μεταλλευτική έχει τα πλεονεκτήματα της αλλά και τα μειονεκτήματα 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 εξορύσσει σε τέτοιες περιπτώσεις.

9.8. Περιβαλλοντικά προβλήματα

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την χρήση Surface Miner είναι πολύ λίγα και ελάσσονος σημασίας.

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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

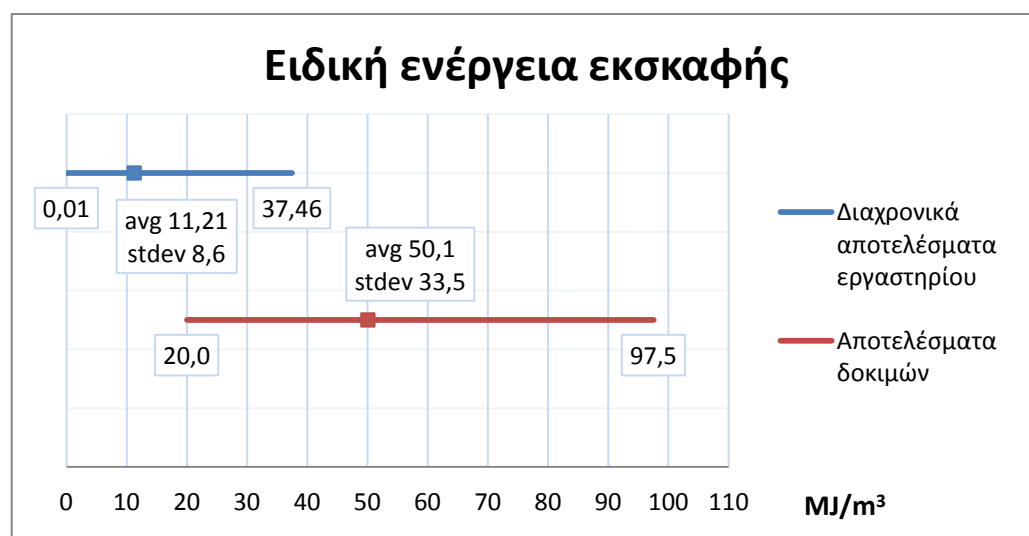
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν μετά το πέρας των δοκιμών. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου συγκρίνονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις δοκιμές με τα διαχρονικά αποτελέσματα δοκιμών στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων ΕΜΠ. Στη συνέχεια, με τη χρήση των διαγραμμάτων λειτουργίας του μηχανήματος Surface Miner 2500 SM, ελέγχεται η δυνατότητα εξόρυξης του ασβεστόλιθου περιοχής Τρικάλων με το συγκεκριμένο μηχάνημα.

10.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα διαχρονικά αποτελέσματα του εργαστηρίου

Δοκιμή κοπής

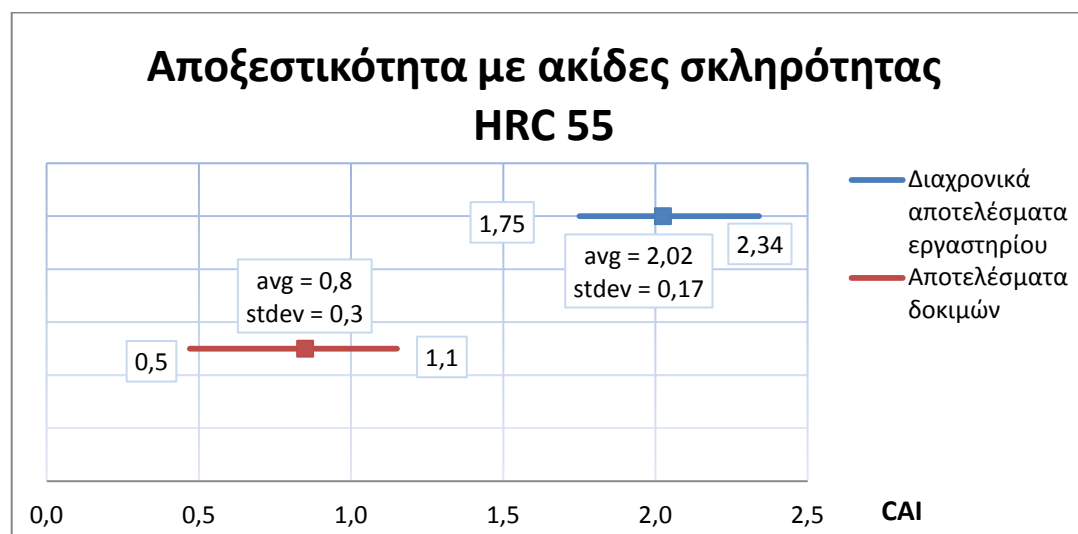
Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 10.1 η μέση τιμή της ειδικής ενέργειας εκσκαφής είναι 50,1 MJ/m³. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη από την μέση τιμή των διαχρονικών αποτελεσμάτων του εργαστηρίου. Επίσης παρατηρήθηκαν πολύ υψηλές τιμές της δύναμης κοπής και αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις που καταδεικνύουν την ψαθυρή θραύση που επήλθε στο δοκίμιο.



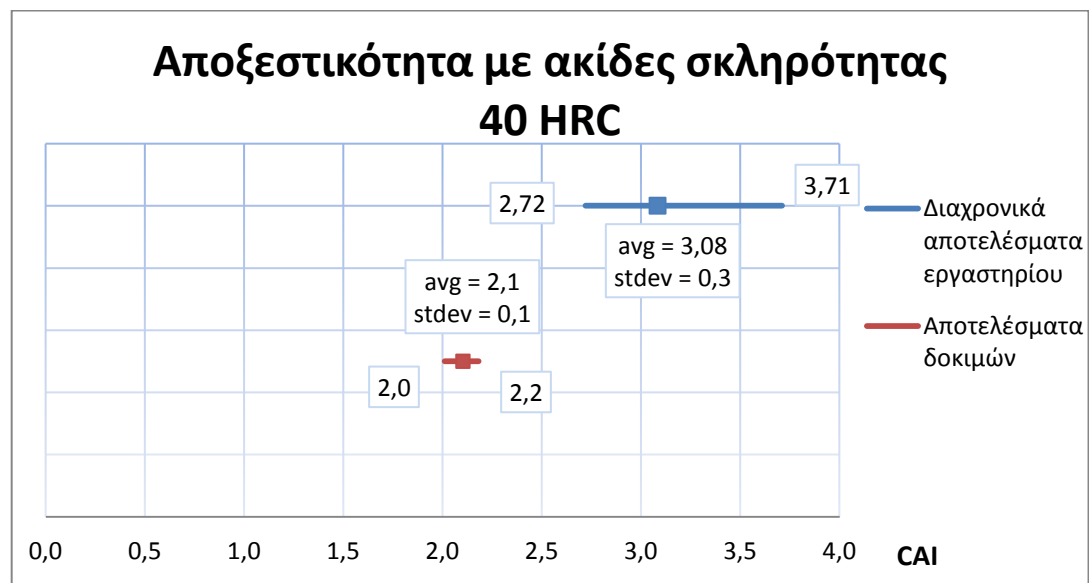
Σχήμα 10.1. Συγκριτικό διάγραμμα ειδικής ενέργειας εκσκαφής (MJ/m³)

Δοκιμή αποξεστικότητας CERCHAR

Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής και τους πίνακες κατάταξης ανάλογα με το δείκτη αποξεστικότητας CERCHAR, το πέτρωμα χαρακτηρίζεται μετρίως αποξεστικό στην δοκιμή με ακίδες σκληρότητας HRC 40 και λίγο έως μετρίως αποξεστικό στις δοκιμές με ακίδες σκληρότητας HRC 55. Στα Σχήματα 10.1, 10.2 παρατηρείται επίσης πως το σύνολο των αποτελεσμάτων καθώς και η μέση τιμή της αποξεστικότητας βρίσκονται σε περιοχή χαμηλότερων τιμών από τα διαχρονικά αποτελέσματα του εργαστηρίου.



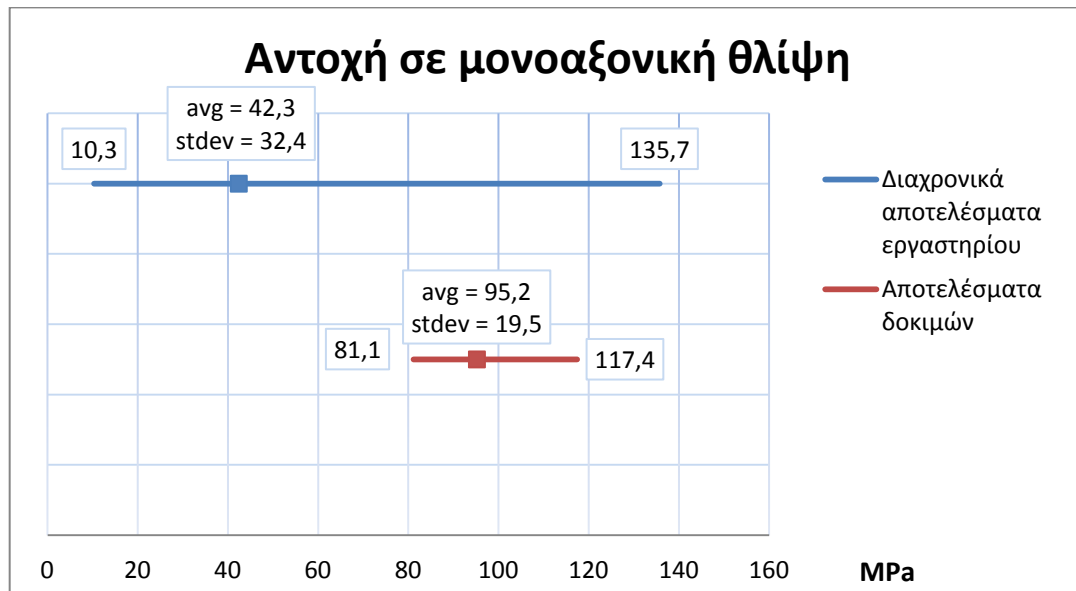
Σχήμα 10.2. Αποτελέσματα CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 55 (CAI)



Σχήμα 10.3. Αποτελέσματα CERCHAR με ακίδα σκληρότητας HRC 40 (CAI)

Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

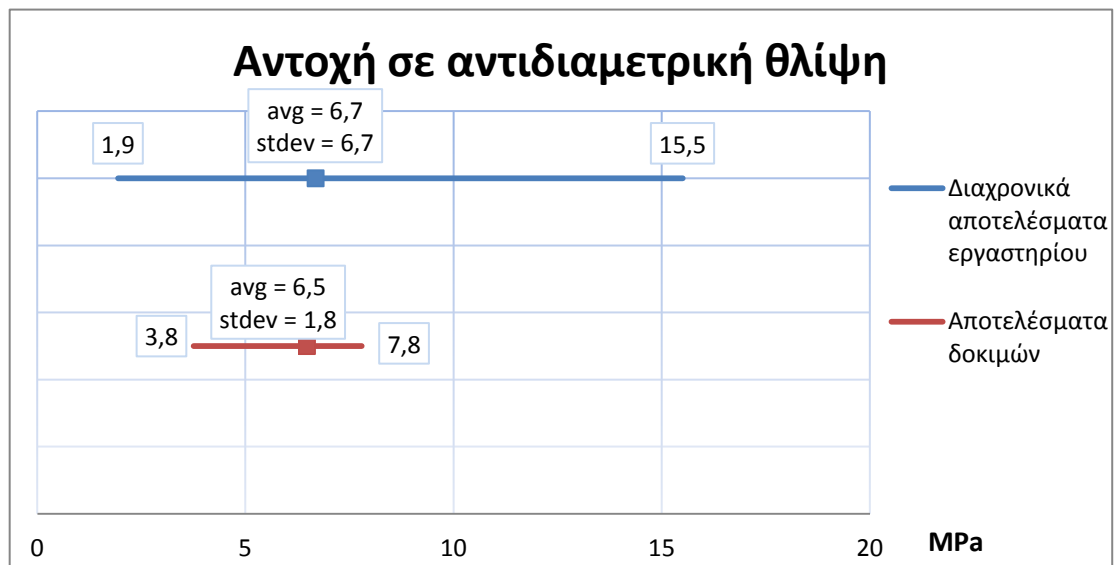
Οι τιμές που εξήχθησαν από την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης είναι υψηλές σε σχέση με τις διαχρονικά αποτελέσματα του εργαστηρίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.4. Η μέση τιμή είναι στα 95,2 MPa.



Σχήμα 10.4 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)

Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

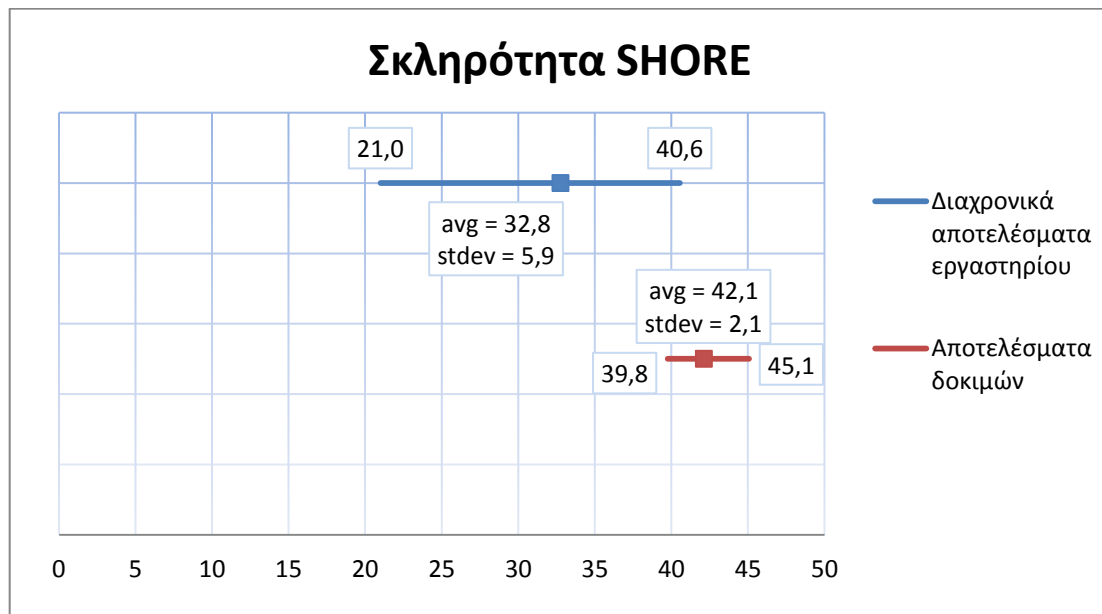
Όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 10.5 η μέση τιμή της αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη ακολουθεί τα διαχρονικά αποτελέσματα του εργαστηρίου.



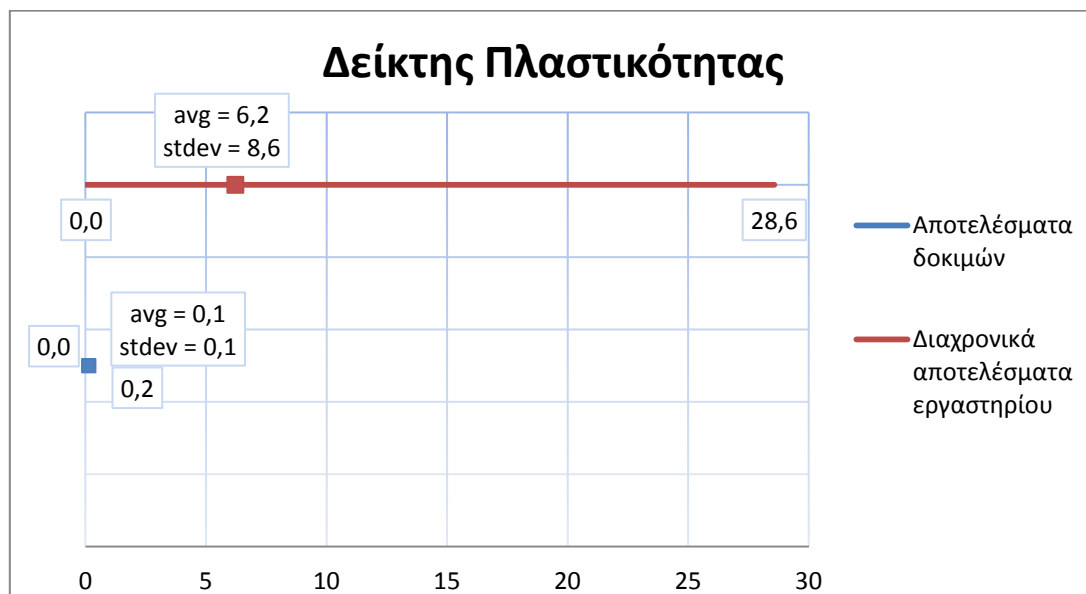
Σχήμα 10.5. Αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη (MPa)

Δοκιμή σκληρότητας SHORE

Με βάση την μέση τιμή της σκληρότητας το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως μέτριας σκληρότητας. Οι τιμές που παρατηρούνται είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις διαχρονικά αποτελέσματα του εργαστηρίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.6. Ο δείκτης πλαστικότητας κυμαίνεται από 0% ως 2% και το πέτρωμα ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται ψαθυρό.



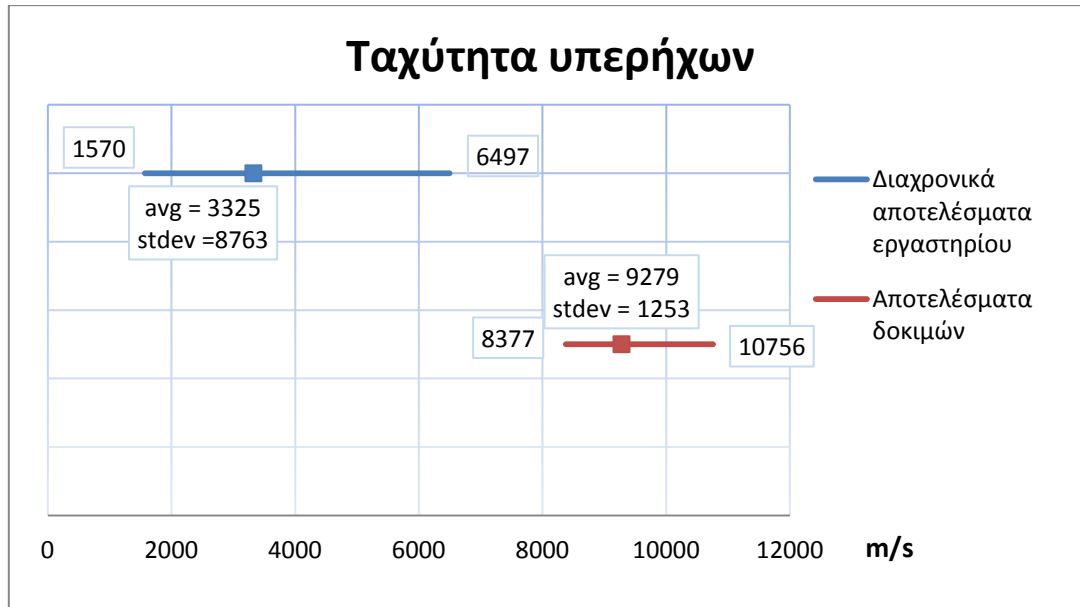
Σχήμα 10.6. Σκληρότητα SHORE



Σχήμα 10.7. Δείκτης πλαστικότητας

Δοκιμή ταχύτητας υπερήχων

Από το Σχήμα 10.8 φαίνεται πως μέση τιμή της ταχύτητας υπερήχων μετρήθηκε στα 9279m/s η οποία είναι αρκετά υψηλότερη από την μέση τιμή των αποτελεσμάτων του εργαστηρίου.

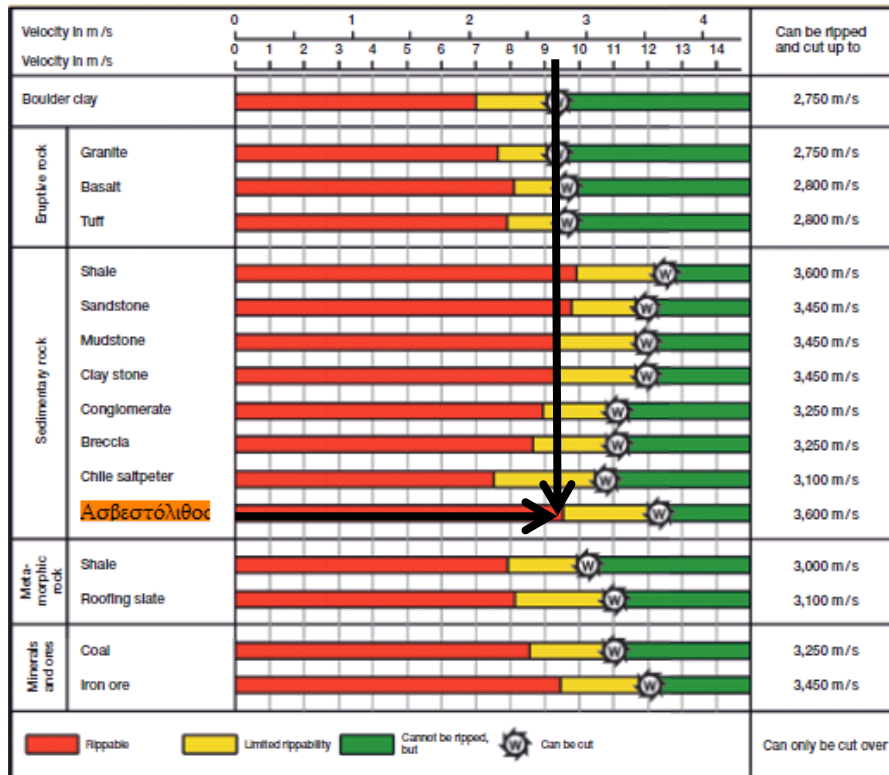


Σχήμα 10.8. Ταχύτητα υπερήχων (m/s)

10.2 Διαγράμματα λειτουργίας SURFACE MINER

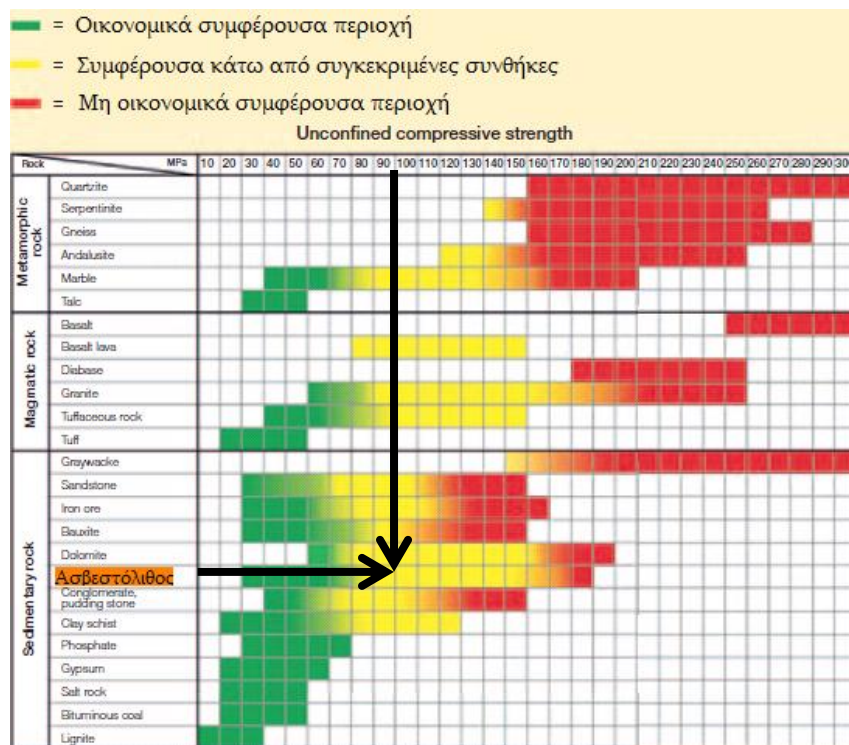
Σε αυτή την παράγραφο, με βάση τα διαγράμματα λειτουργίας του Surface Miner και τα αποτελέσματα των δοκιμών διερευνάται η δυνατότητα εξόρυξης με το συγκεκριμένο μηχάνημα, η οικονομία της εξόρυξης και η απόδοση του μηχανήματος.

Όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 10.9 η δυνατότητα εξόρυξης σχετίζεται με την ταχύτητα υπερήχων στο πέτρωμα. Παρατηρείται πως βάση των αποτελεσμάτων της δοκιμής ταχύτητας υπερήχων η εξόρυξη με το συγκεκριμένο μηχάνημα είναι δυνατή.



Σχήμα 10.9. Ικανότητα εξόρυξης βασικών πετρωμάτων με βάση την ταχύτητα υπερήχων

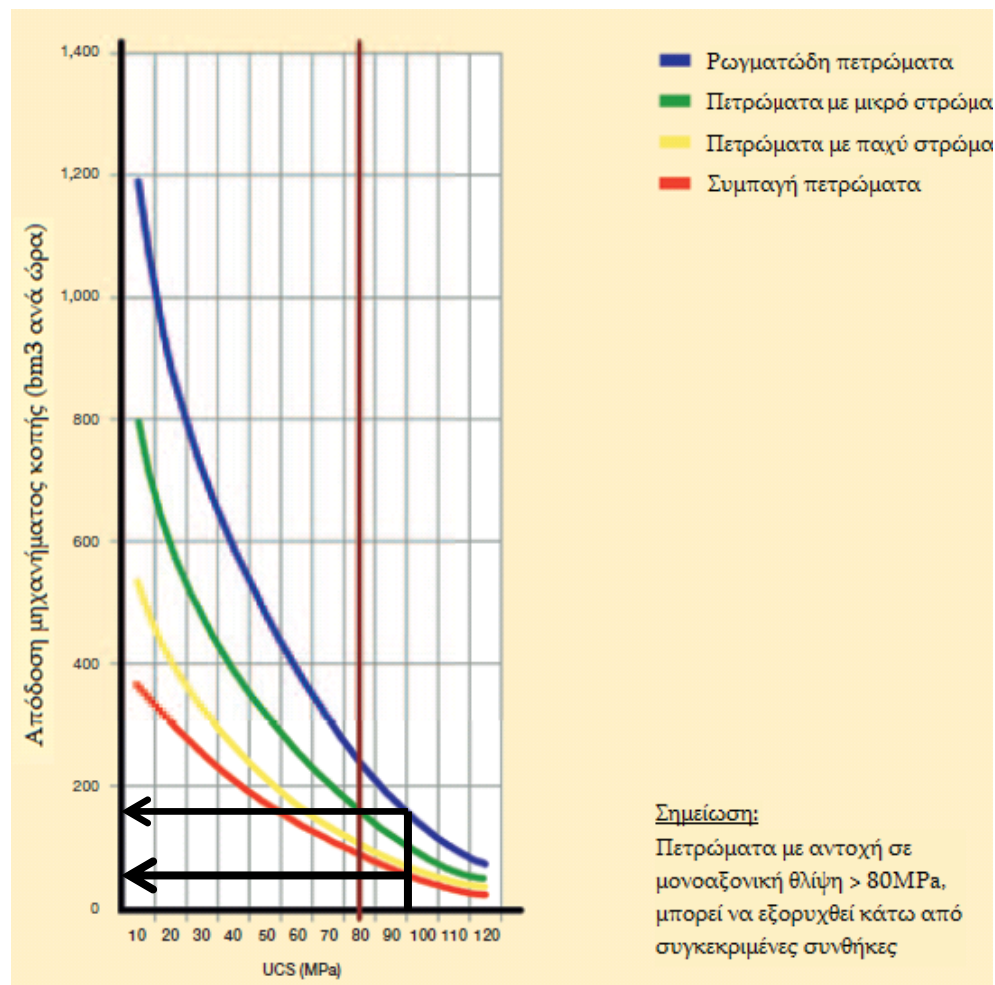
Στο Σχήμα 10.10 παρατηρείται πως με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη η οικονομικότητα της εξόρυξης ορίζεται ως συμφέρουσα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.



Σχήμα 10.10. Συσχέτιση οικονομικότητας εξόρυξης και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 10.11), βάσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, αποτιμάται η απόδοση του μηχανήματος Surface Miner. Παρατηρείται πως ορίζεται όριο στα 80MPa πάνω από το οποίο για να πραγματοποιηθεί η εξόρυξη χρειάζεται να υπάρξουν ορισμένες συνθήκες. Σε αυτή την περιοχή βρίσκεται ο ασβεστόλιθος περιοχής Τρικάλων αφού η μέση τιμή της αντοχής σε UCS μετρήθηκε στα 95,2 MPa.

Παρατηρείται επίσης, πως η απόδοση του συγκεκριμένου μηχανήματος για την εξόρυξη του ασβεστόλιθου περιοχής των Τρικάλων κυμαίνεται από 60 ως 170 bm^3/h σε συνάρτηση με τον κερματισμό του πετρώματος.



Σχήμα 10.11. Η απόδοση του μηχανήματος με βάση την αντοχή σε UCS (MPa)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ηλεκτρονική διεύθυνση www.wirtgen.com
2. Ηλεκτρονική διεύθυνση www.latomet.gr
3. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1979), Vol.16, No.2, pp.137-140
4. Engineering Geology (1970), Vol.4, No.3, pp.177-285
5. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1978), Vol.15, No.3, pp.99-103
6. Rock Mechanics and Rock Engineering, (1990), Vol.15, No.3, pp.99-103
7. R. Altintag, A. Guney (2005), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.42, No.1, pp.153-160
8. R. Altintag (2002), Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.35, No.2, pp.109-113
9. G. West (1989), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Vol.26, No.2, pp.151-160
10. R. Plinninger, H. Kassing, K. Thuro, G. Spaun (2003), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.40, No.2, pp.259-263
11. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1978), Vol.15, No.2, pp.53-58
12. H. Gercek (2007), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Vol.44, No.1, pp.1-13
13. F. Roxborough ISRM (1974), «Experimental Studies on the Excavation of Rock Using Picks»
14. Wirtgen Surface Mining Manual (2010), Applications and Planning Guide
15. Χ. Τσουτρέλης (Αθήνα 1985), «Στοιχεία μηχανικής πετρωμάτων», Μέρος Ι, Βασικά θεωρητικά στοιχεία και πειραματικοί μέθοδοι

16. Χ. Τσουτρέλης, Ν. Γκίκας και Π. Νομικός (Αθήνα 2000), «Εργαστηριακές ασκήσεις Μηχανικής Πετρωμάτων»
17. Γ. Κούκης, και Ν. Σαμπατάκης (Αθήνα 2002), «Τεχνική Γεωλογία»
18. Γ. Κούκης και Ν. Σαμπατάκης (Αθήνα 2007), «Γεωλογία Τεχνικών Έργων»
19. Α. Σοφιανός (Αθήνα 2005), «Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων», Σημειώσεις Πανεπιστημιακών Παραδόσεων ΕΜΠ
20. Γ. Παναγιώτου (Αθήνα 2003), «Μηχανική Εξόρυξη των Πετρωμάτων» Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος εξόρυξη πετρωμάτων ΙΙ.
21. Γ. Παναγιώτου και Θ. Μιχαλακόπουλος (Αθήνα 2007), «Συστήματα Φόρτωσης – Μεταφοράς και Μηχανικός Εξοπλισμός Μεταλλείων»
22. Β. Αναγνώστου (Αθήνα 2006), «Προσδιορισμός του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής ιζηματογενών πετρωμάτων», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία
23. Σημειώσεις του μαθήματος Εξόρυξης Ι (Εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες), 7^ο εξάμηνο
24. Σημειώσεις του μαθήματος Εξόρυξης ΙΙ (Εξόρυξη με μηχανικά μέσα), 8^ο εξάμηνο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ CERCHAR

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_01					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	55	0,113	0,106	0,109	1,09
2	55	0,095	0,090	0,093	0,93
3	55	0,165	0,133	0,149	1,49
4	55	0,133	0,133	0,133	1,33
5	55	0,090	0,095	0,093	0,93
			Μέση τιμή:		1,15
			Τυπική Απόκλιση:		0,25

Πίνακας Π1.1 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_02					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	55	0,117	0,080	0,098	0,98
2	55	0,101	0,096	0,098	0,98
3	55	0,154	0,090	0,122	1,22
4	55	0,064	0,058	0,061	0,61
5	55	0,080	0,106	0,093	0,93
			Μέση τιμή:		0,94
			Τυπική Απόκλιση:		0,22

Πίνακας Π1.2 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_03					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	55	0,138	0,138	0,138	1,38
2	55	0,053	0,080	0,066	0,66
3	55	0,090	0,080	0,085	0,85
4	55	0,101	0,085	0,093	0,93
5	55	0,143	0,122	0,133	1,33
			Μέση τιμή:		1,03
			Τυπική Απόκλιση:		0,31

Πίνακας Π1.3 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_04					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	55	0,094	0,094	0,094	0,94
2	55	0,081	0,098	0,090	0,90
3	55	0,029	0,043	0,036	0,36
4	55	0,060	0,051	0,056	0,56
5	55	0,047	0,056	0,051	0,51
			Μέση τιμή:		0,65
			Τυπική Απόκλιση:		0,25

Πίνακας Π1.4 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_05					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	55	0,035	0,038	0,037	0,37
2	55	0,029	0,043	0,036	0,36
3	55	0,073	0,060	0,066	0,66
4	55	0,064	0,043	0,053	0,53
5	55	0,043	0,047	0,045	0,45
			Μέση τιμή:		0,47
			Τυπική Απόκλιση:		0,13

Πίνακας Π1.5 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 55

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_01					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	40	0,218	0,244	0,231	2,31
2	40	0,214	0,150	0,182	1,82
3	40	0,231	0,265	0,248	2,48
4	40	0,171	0,227	0,199	1,99
5	40	0,188	0,171	0,180	1,80
			Μέση τιμή:		2,08
			Τυπική Απόκλιση:		0,30

Πίνακας Π1.6 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_01 με ακίδα 40

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_02					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	40	0,2095	0,184	0,197	1,97
2	40	0,205	0,197	0,201	2,01
3	40	0,214	0,248	0,231	2,31
4	40	0,252	0,235	0,244	2,44
5	40	0,188	0,205	0,197	1,97
			Μέση τιμή:		2,14
			Τυπική Απόκλιση:		0,22

Πίνακας Π1.7 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_02 με ακίδα 40

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_03					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	40	0,231	0,227	0,229	2,29
2	40	0,175	0,244	0,210	2,10
3	40	0,210	0,180	0,195	1,95
4	40	0,145	0,171	0,158	1,58
5	40	0,239	0,188	0,214	2,14
			Μέση τιμή:		2,01
			Τυπική Απόκλιση:		0,27

Πίνακας Π1.8 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_03 με ακίδα 40

Κωδικός Δοκιμίου: Kb_04					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	40	0,184	0,205	0,195	1,95
2	40	0,252	0,248	0,250	2,50
3	40	0,184	0,163	0,173	1,73
4	40	0,227	0,287	0,257	2,57
5	40	0,227	0,205	0,216	2,16
			Μέση τιμή:		2,18
			Τυπική Απόκλιση:		0,36

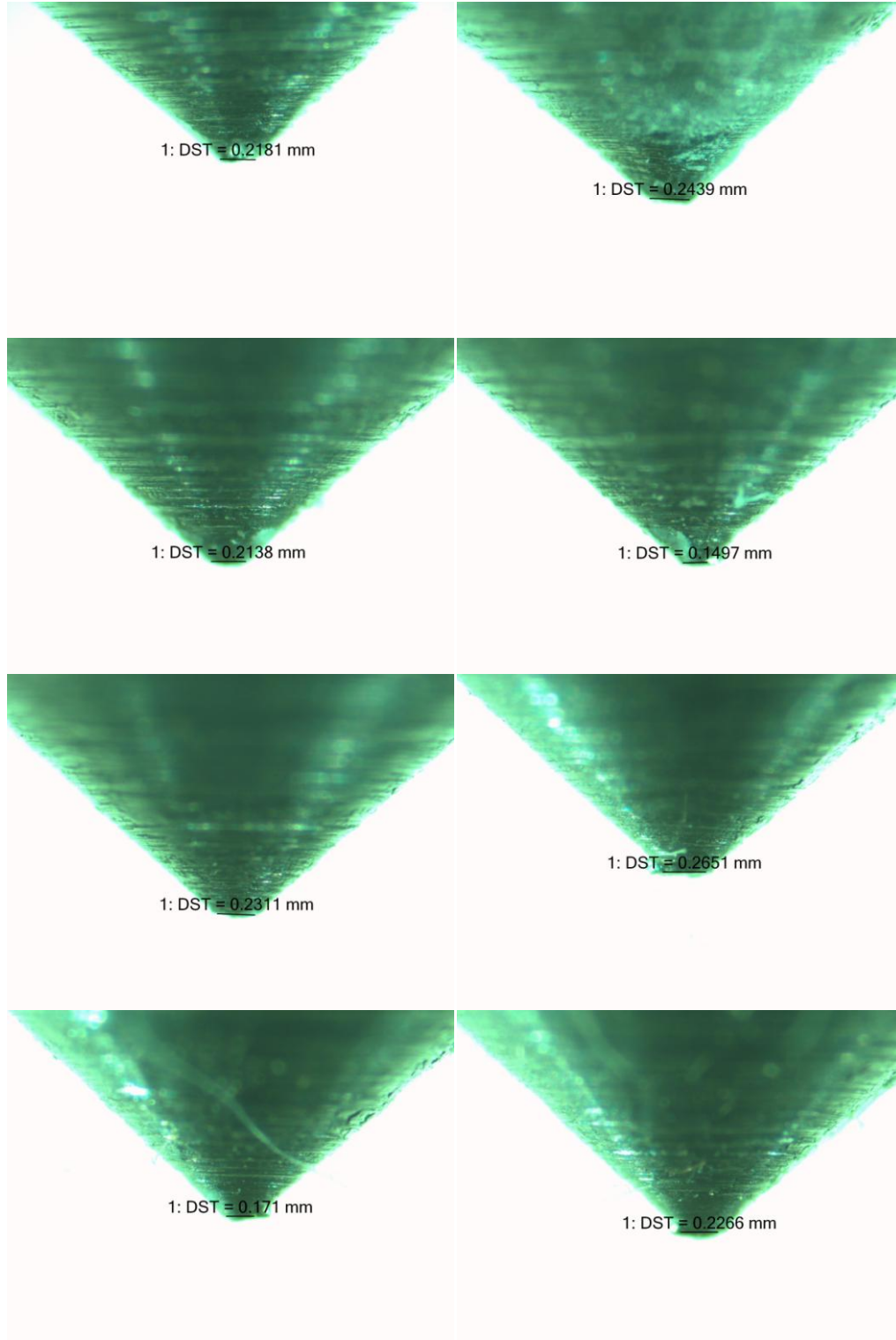
Πίνακας Π1.9 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_04 με ακίδα 40

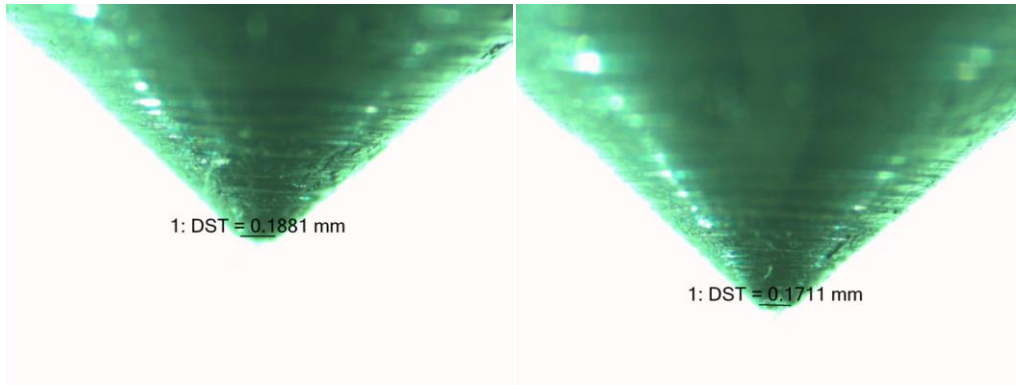
Κωδικός Δοκιμίου: Kb_05					
		Φθορά ακίδας			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας HRC	Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	Δείκτης CERCHAR (CAI)
1	40	0,222	0,231	0,227	2,27
2	40	0,201	0,171	0,186	1,86
3	40	0,201	0,197	0,199	1,99
4	40	0,231	0,257	0,244	2,44
5	40	0,244	0,150	0,197	1,97
			Μέση τιμή:		2,10
			Τυπική Απόκλιση:		0,24

Πίνακας Π1.10 Αποτελέσματα δοκιμής της αποξεστικής ικανότητας στο δοκίμιο Kb_05 με ακίδα 40

Φωτογραφίες ακίδων

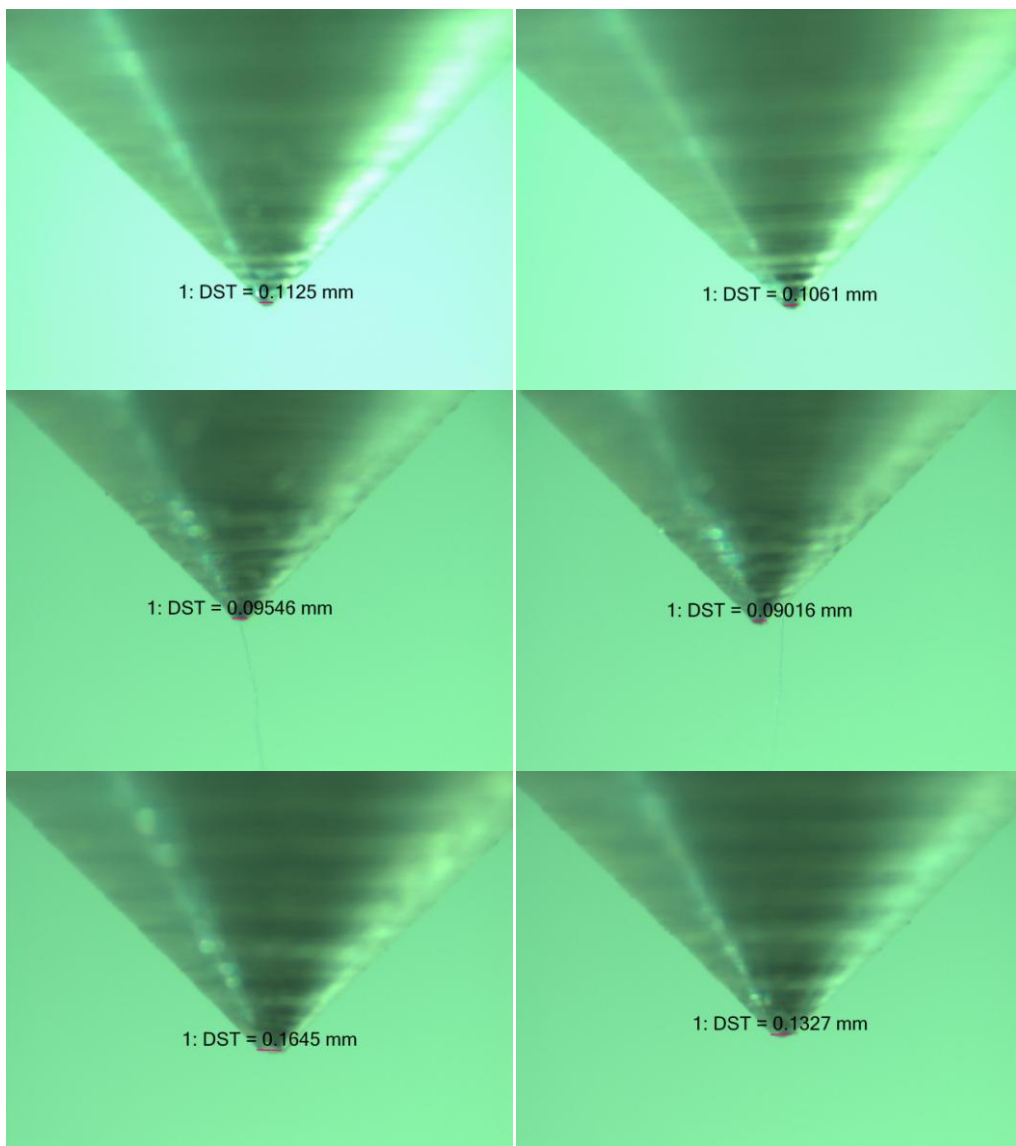
Δοκίμιο: Kb_01 Σκληρότητα ακίδας HRC : 40

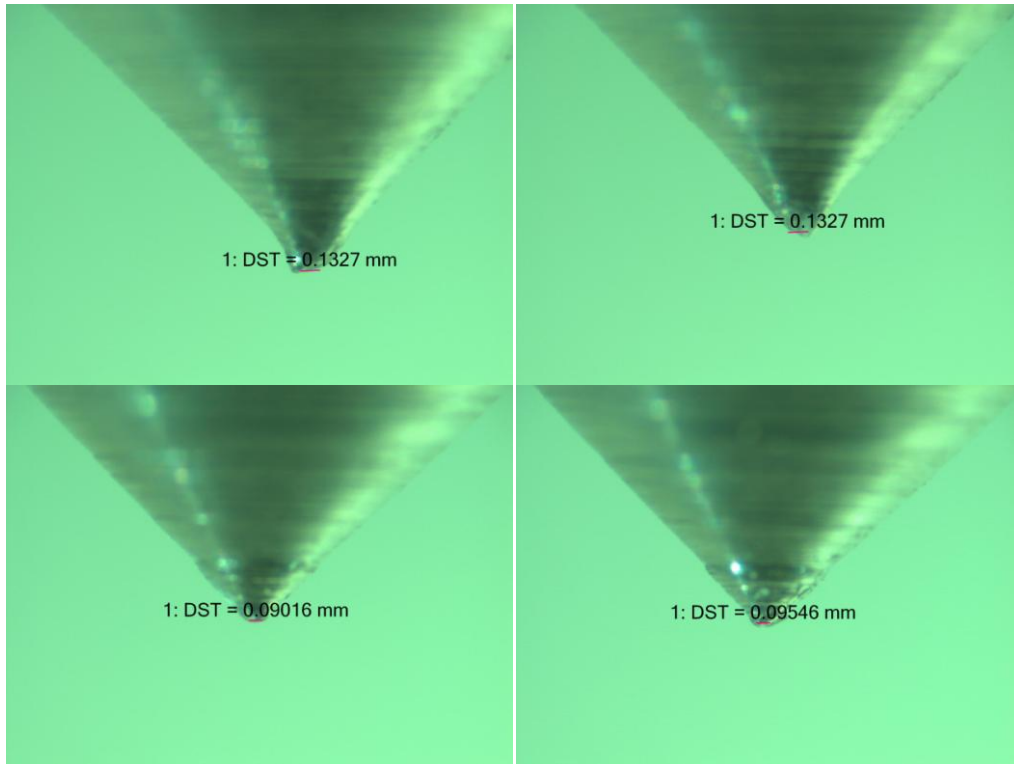




Φωτογραφίες Π.1.1- Π1.10 Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_01

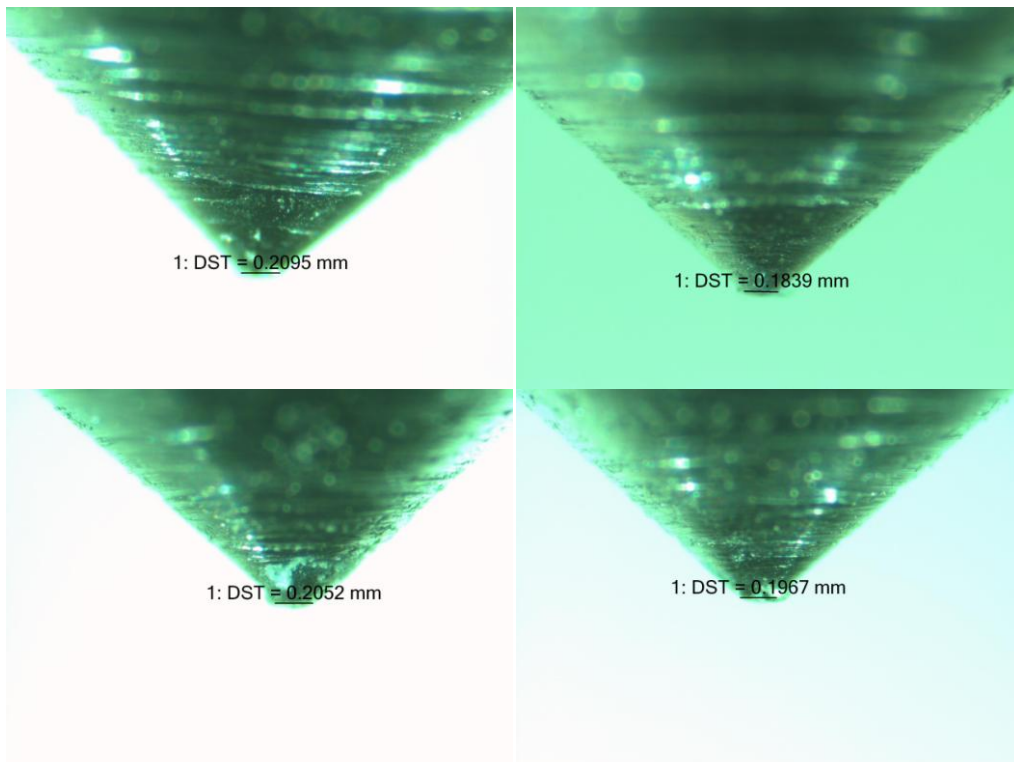
Δοκίμιο: Kb_01 Σκληρότητα ακίδας HRC : 55

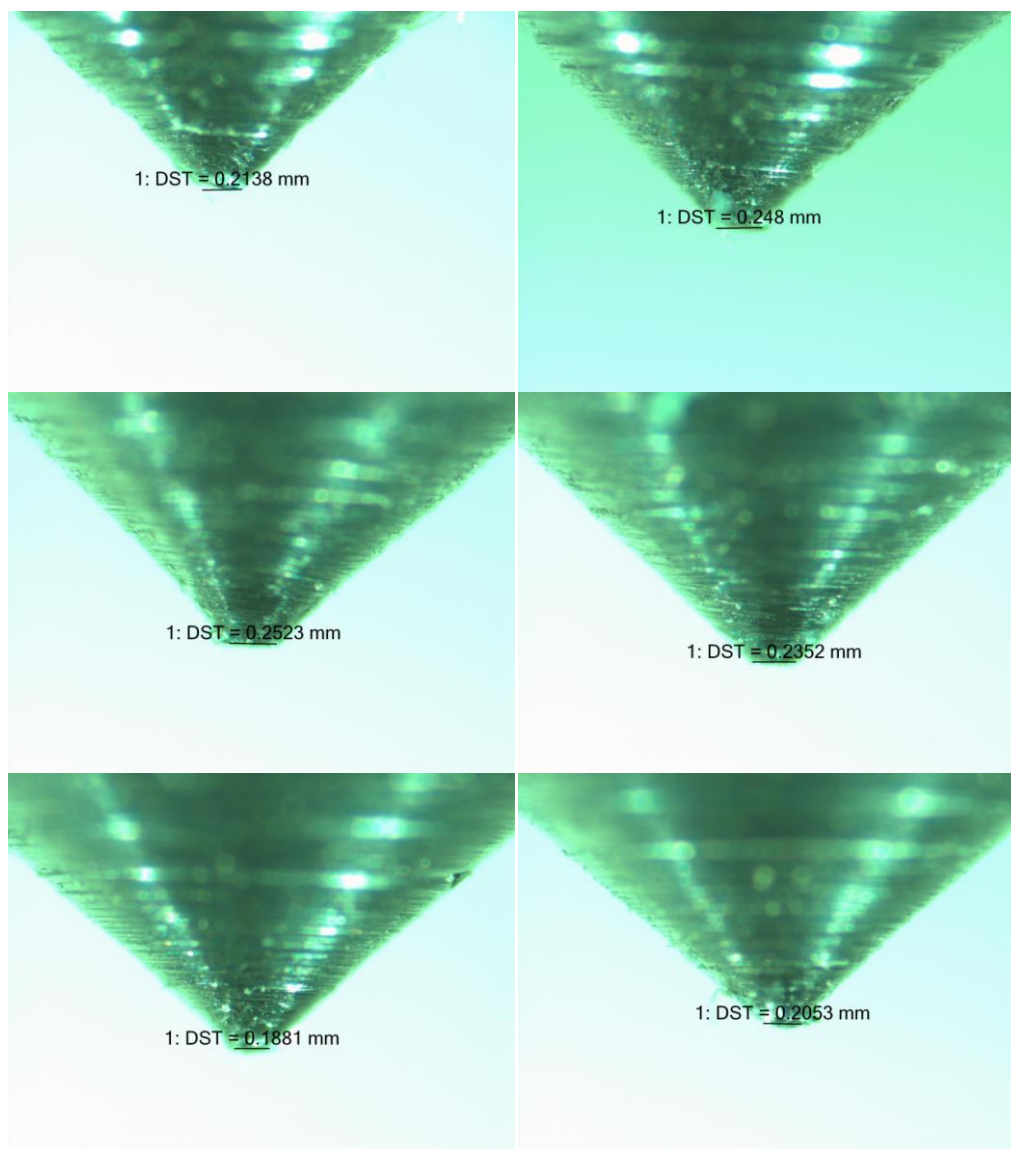




Φωτογραφίες Π.1.11- Π1.20 Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_01

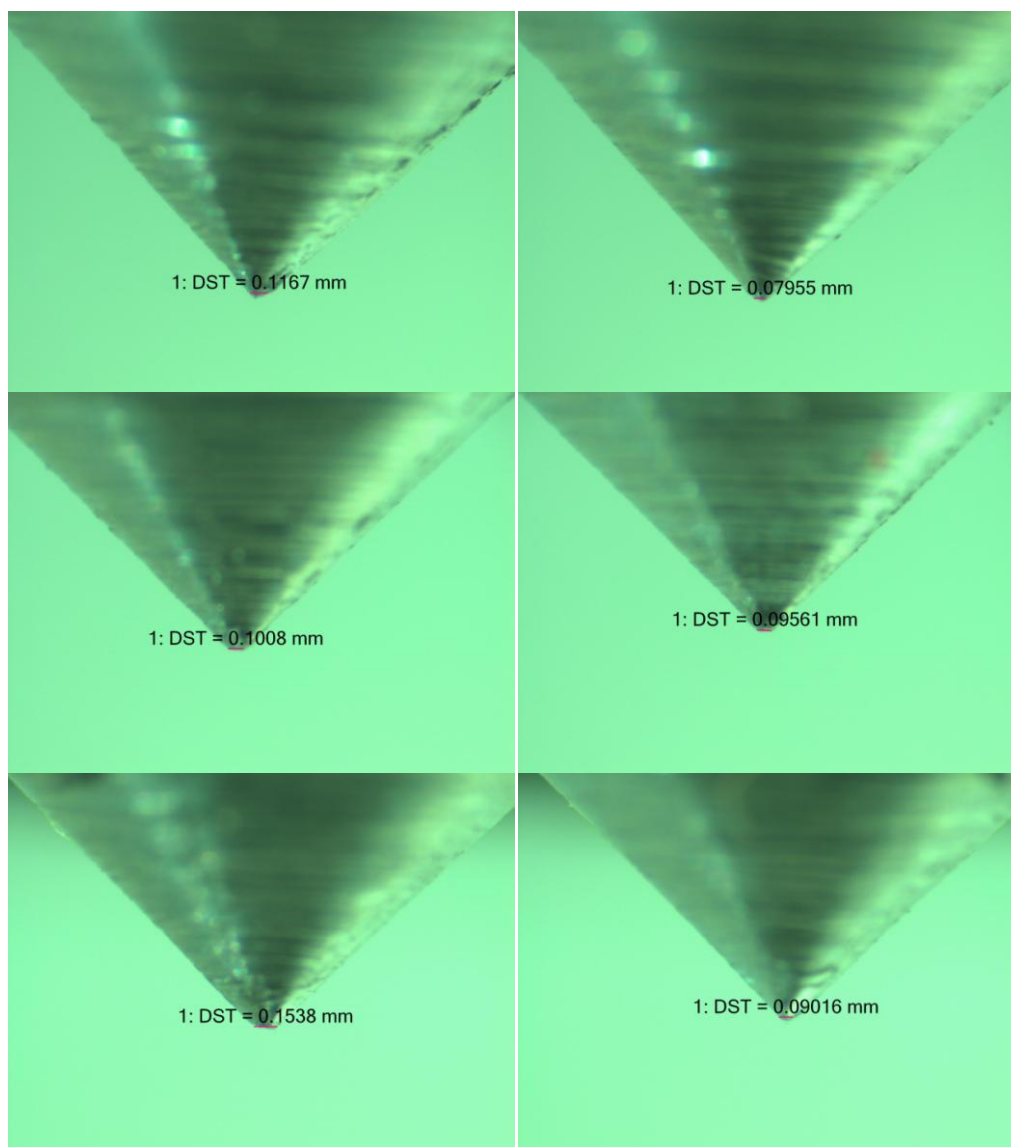
Δοκίμιο: Kb_02 Σκληρότητα ακίδας HRC : 40

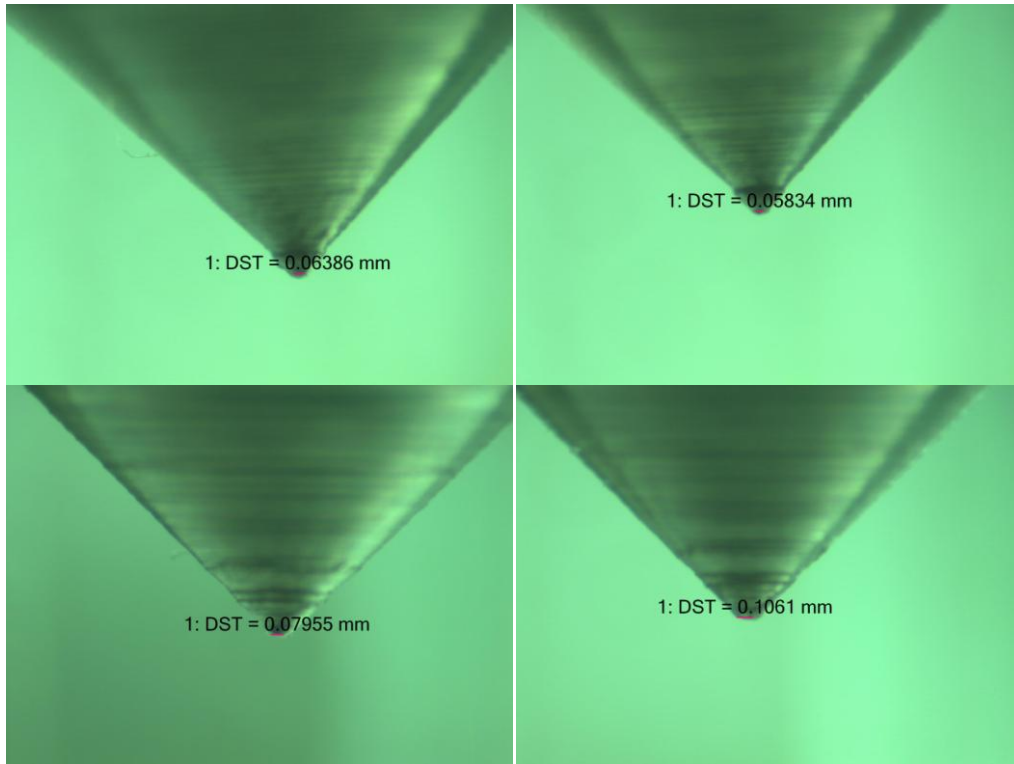




Φωτογραφίες Π.1.21- Π1.30 Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_02

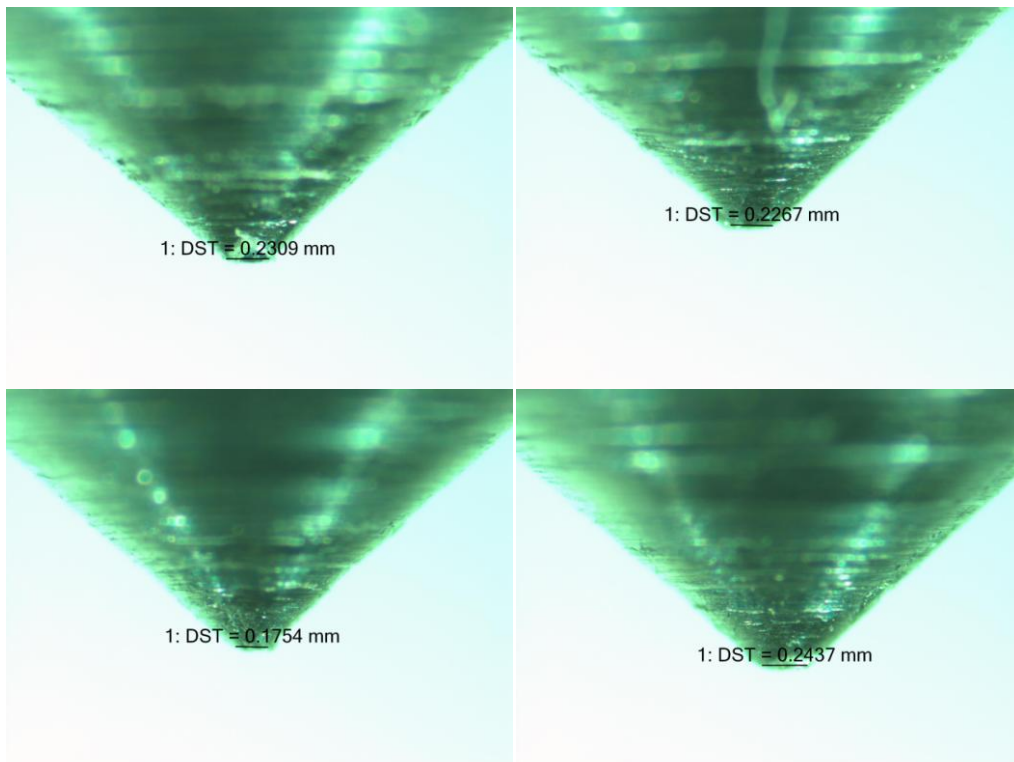
Δοκίμιο: Kb_02 Σκληρότητα ακίδας HRC :55

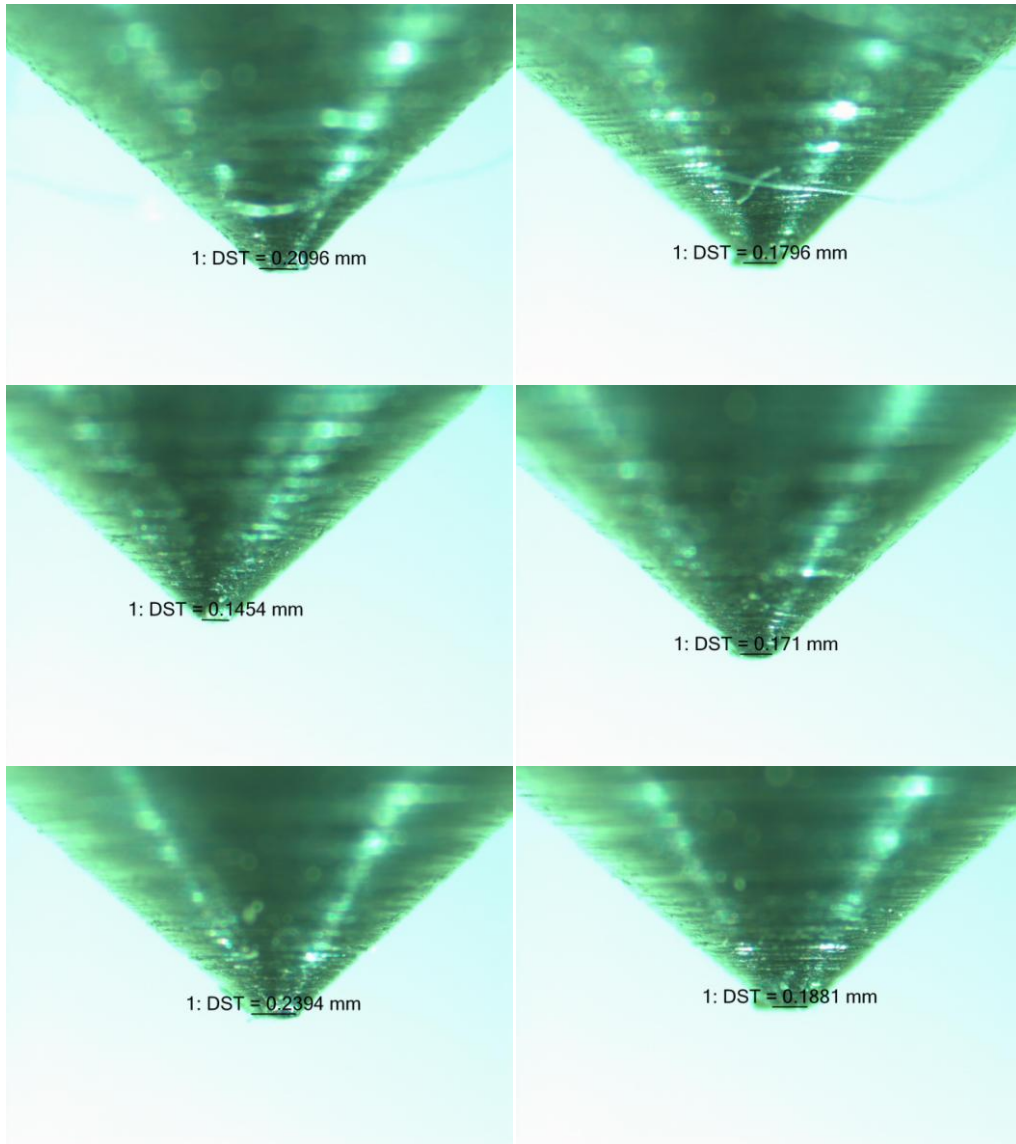




Φωτογραφίες Π.1.31- Π1.40 Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_02

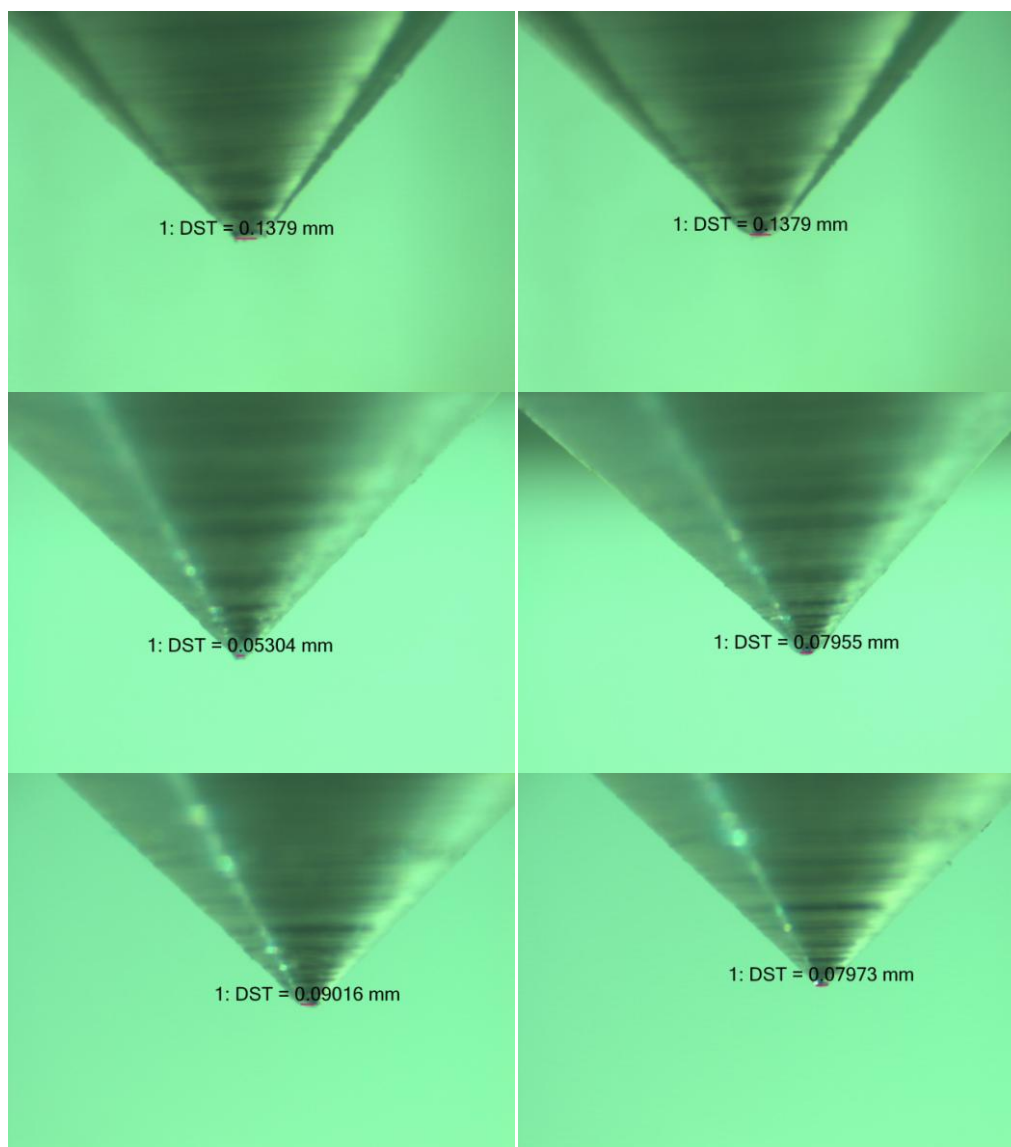
Δοκίμιο: Kb_03 Σκληρότητα ακίδας HRC : 40

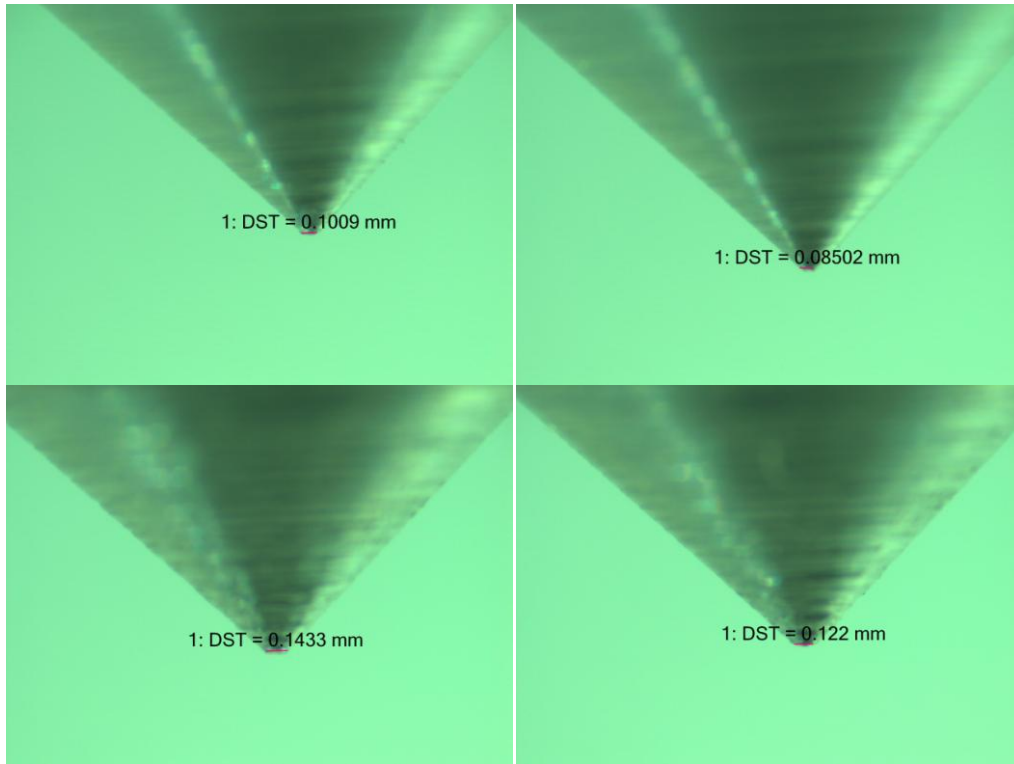




Φωτογραφίες Π.1.41- Π1.50 Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_03

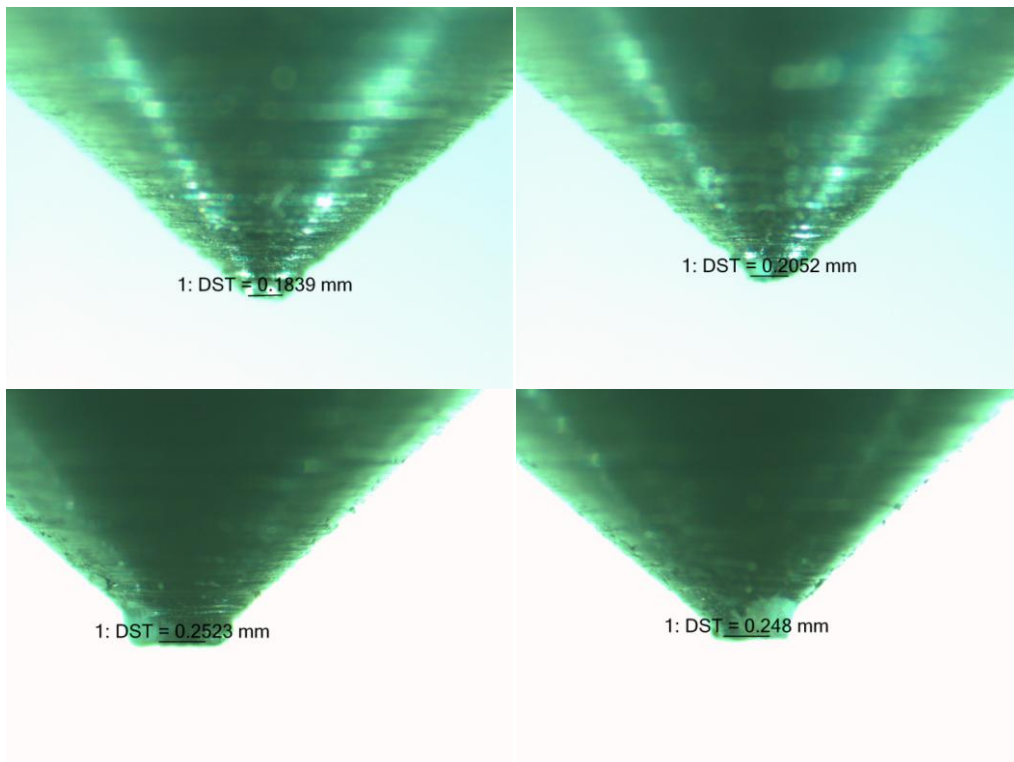
Δοκίμιο: Kb_03 Σκληρότητα ακίδας HRC : 55

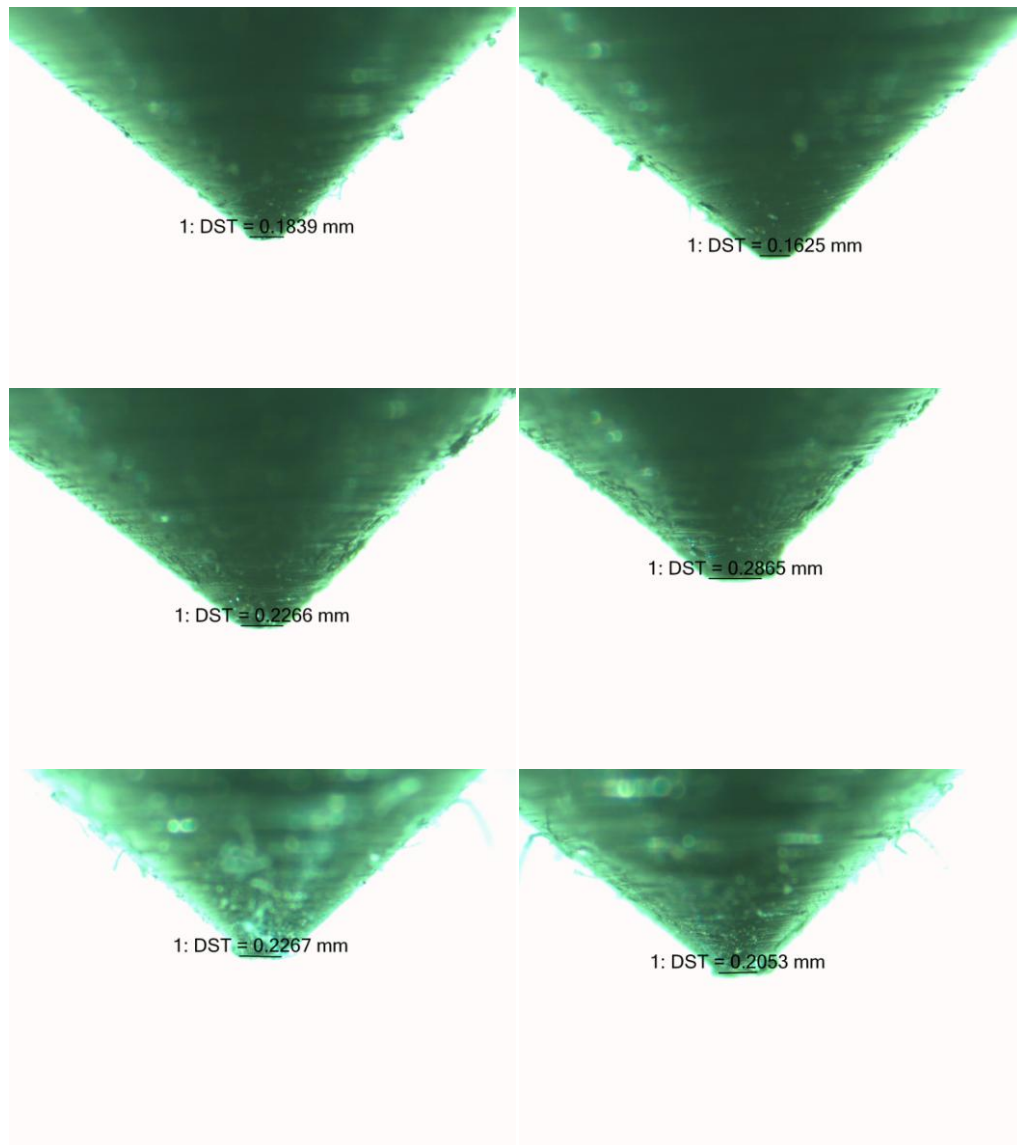




Φωτογραφίες Π.1.51- Π1.60 Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_03

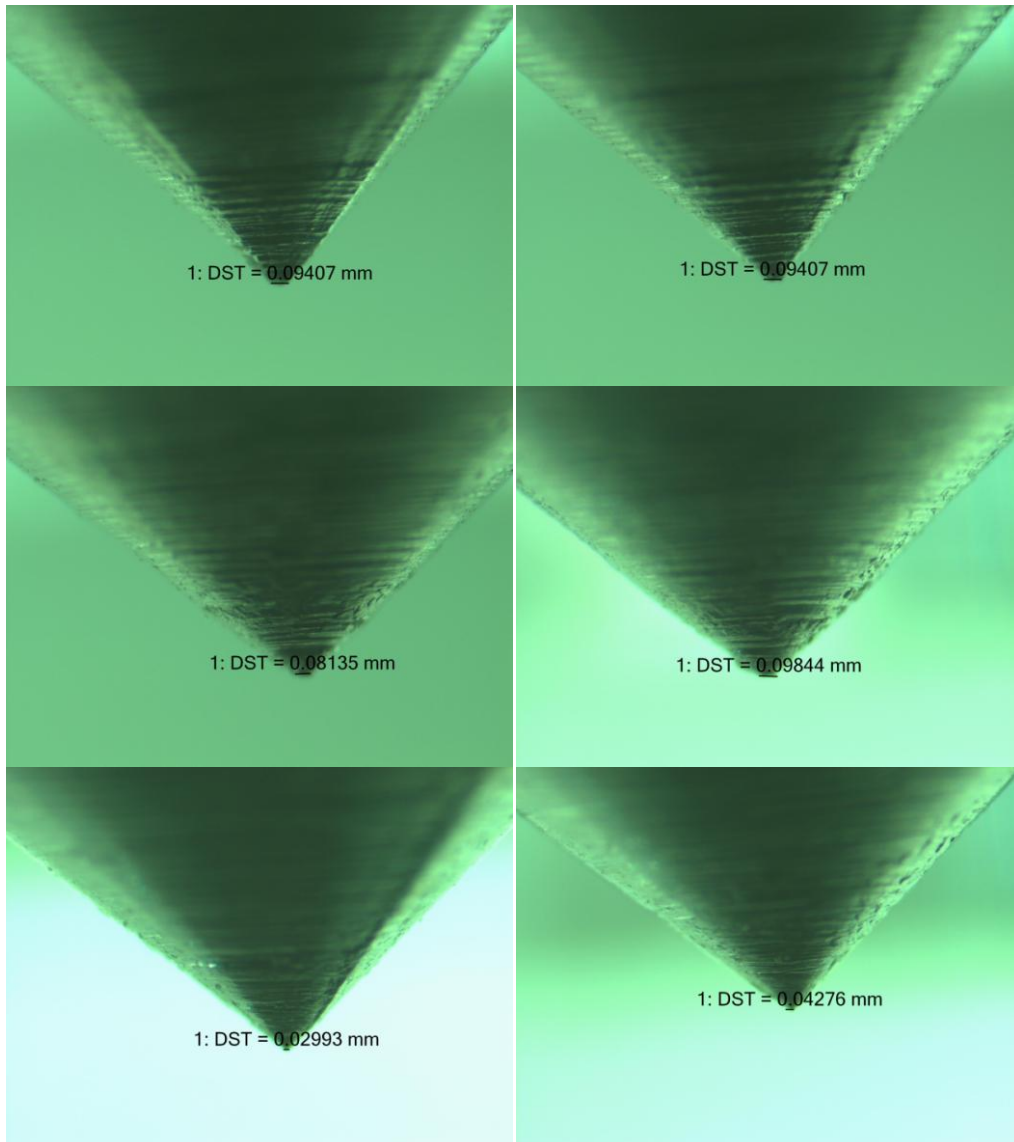
Δοκίμιο: Kb_04 Σκληρότητα ακίδας HRC : 40

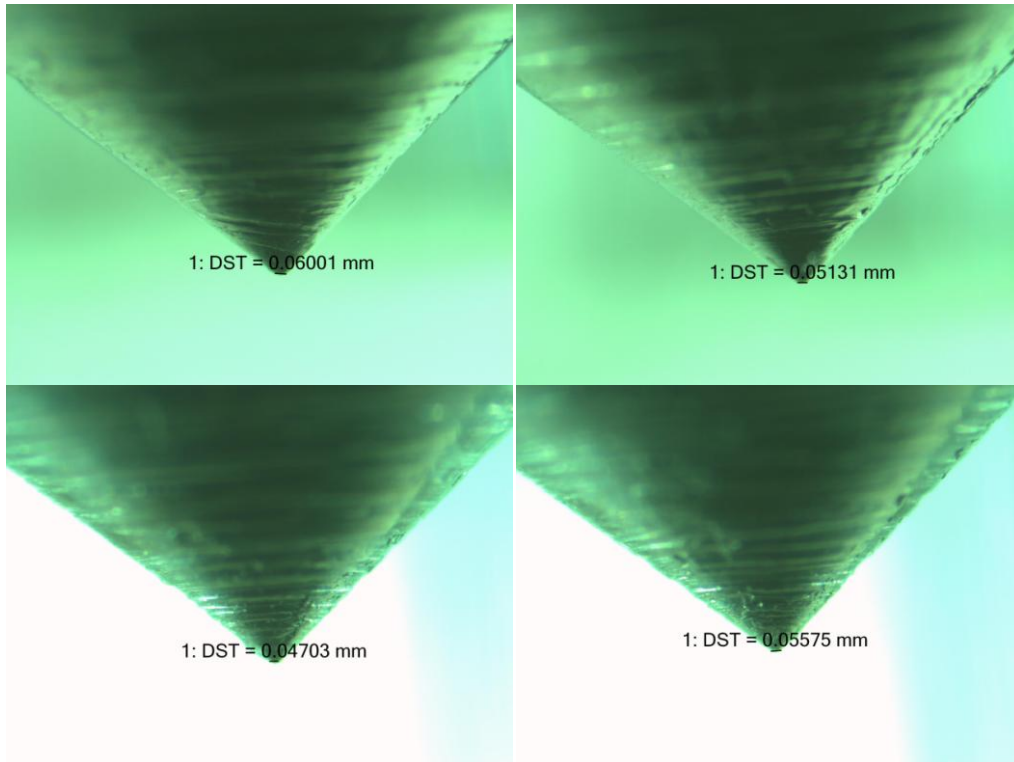




Φωτογραφίες Π.1.61- Π1.70 Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_04

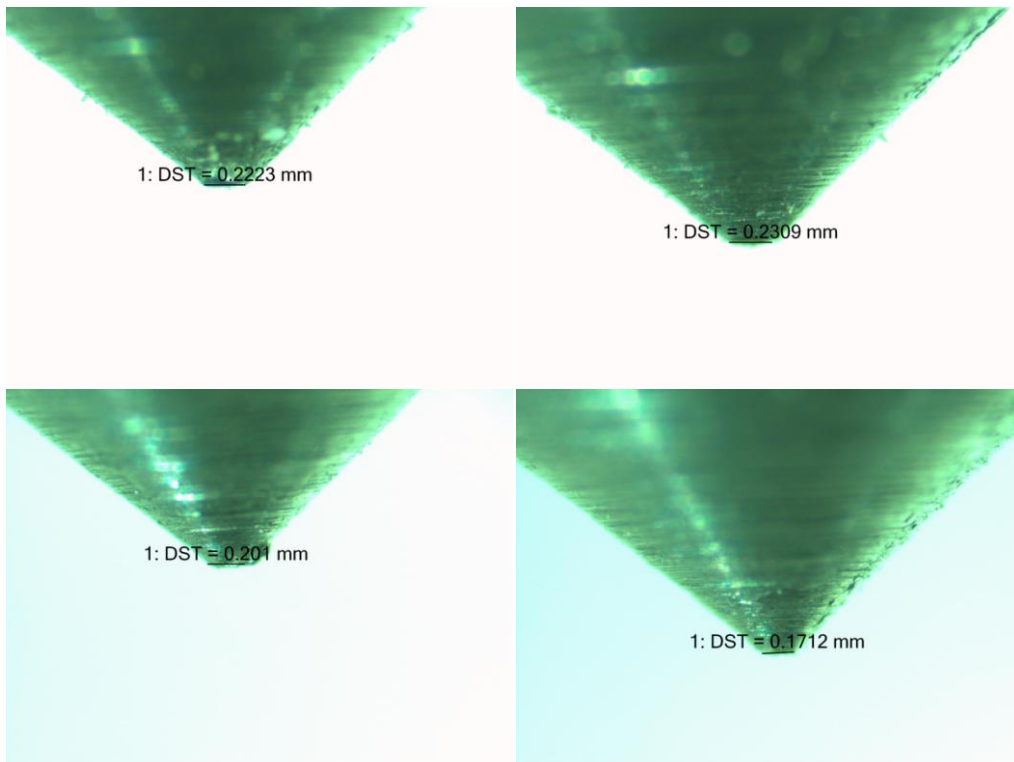
Δοκίμιο: Kb_04 Σκληρότητα ακίδας HRC : 55

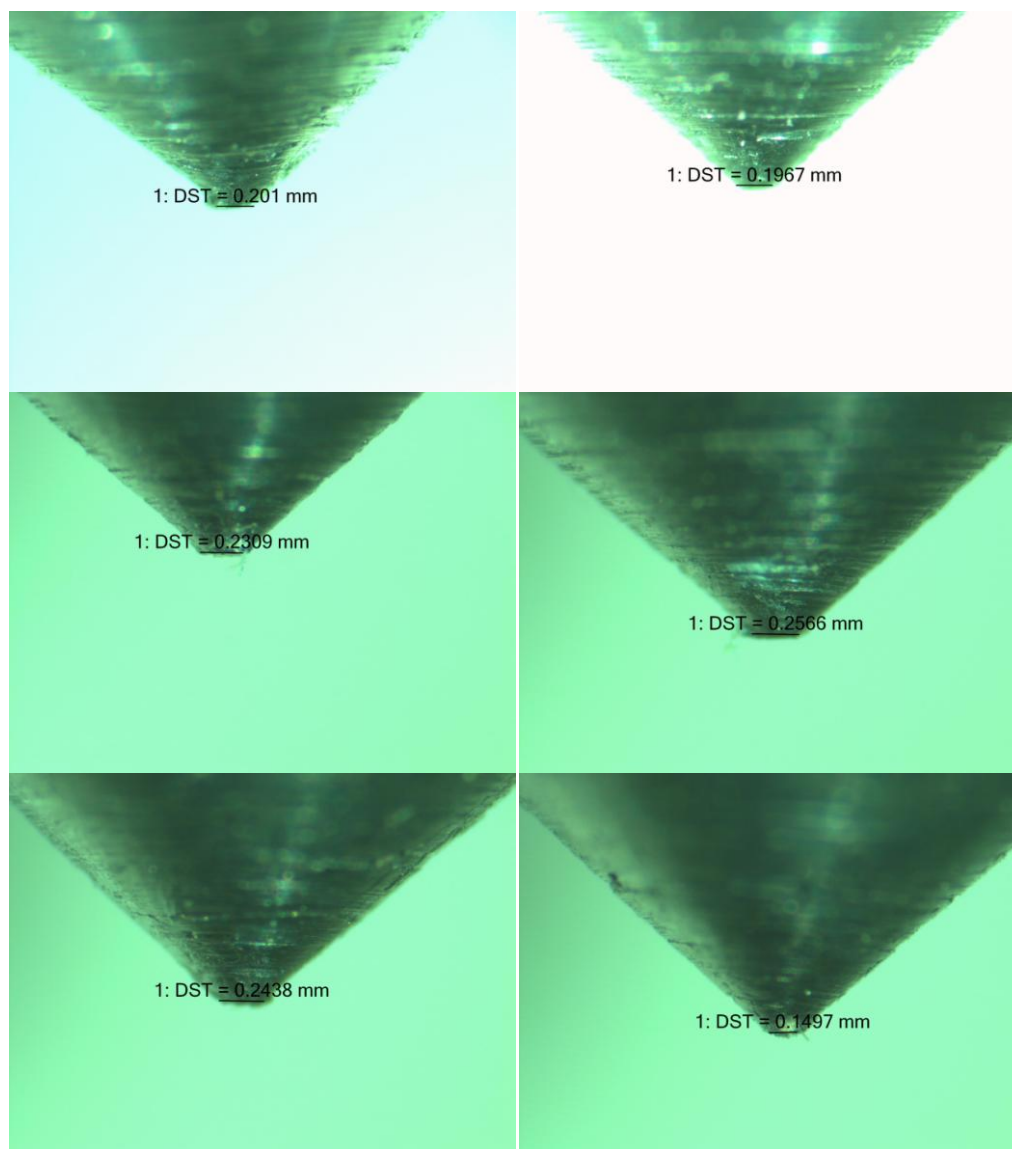




Φωτογραφίες Π.1.71- Π1.80 Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_04

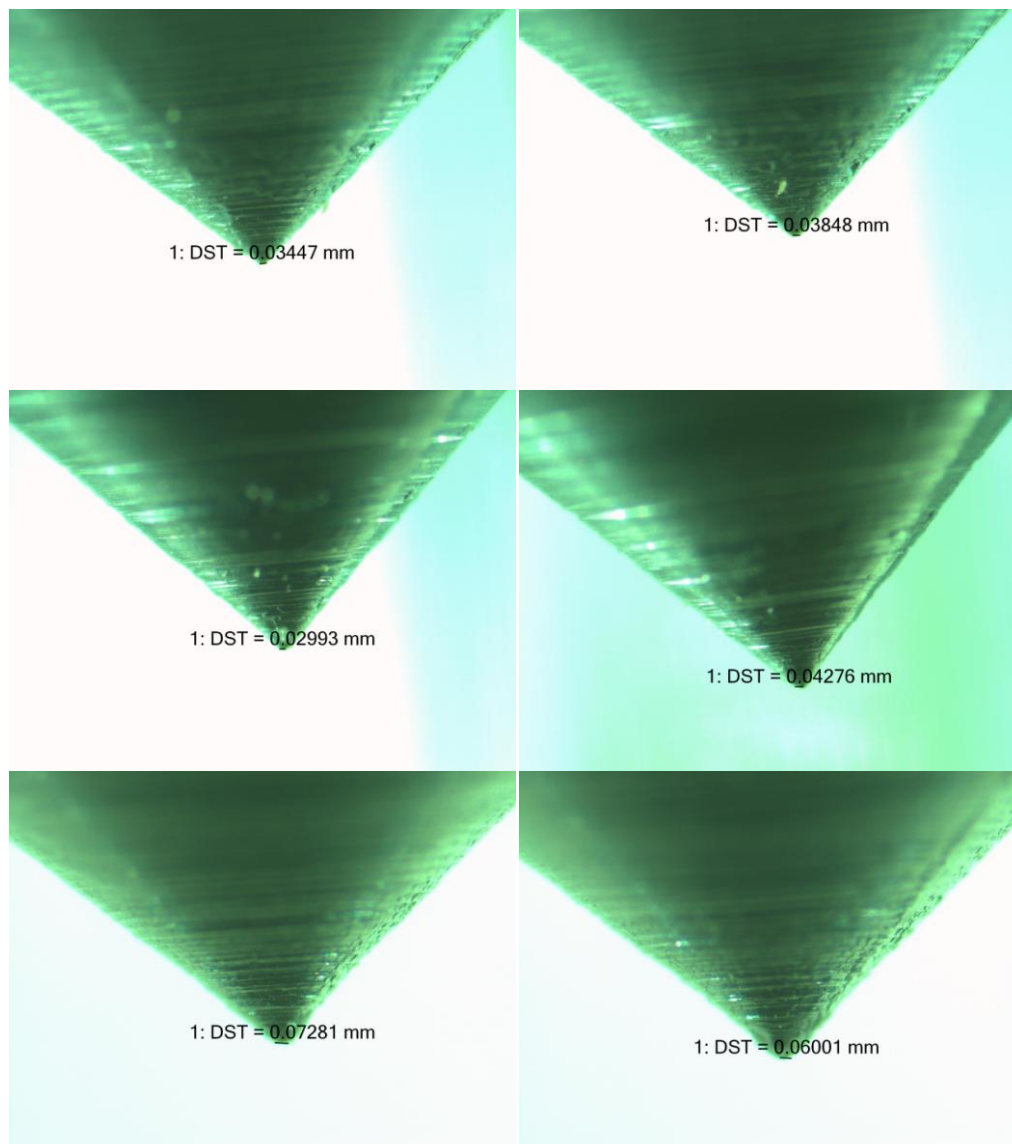
Δοκίμιο: Kb_05 Σκληρότητα ακίδας HRC : 40

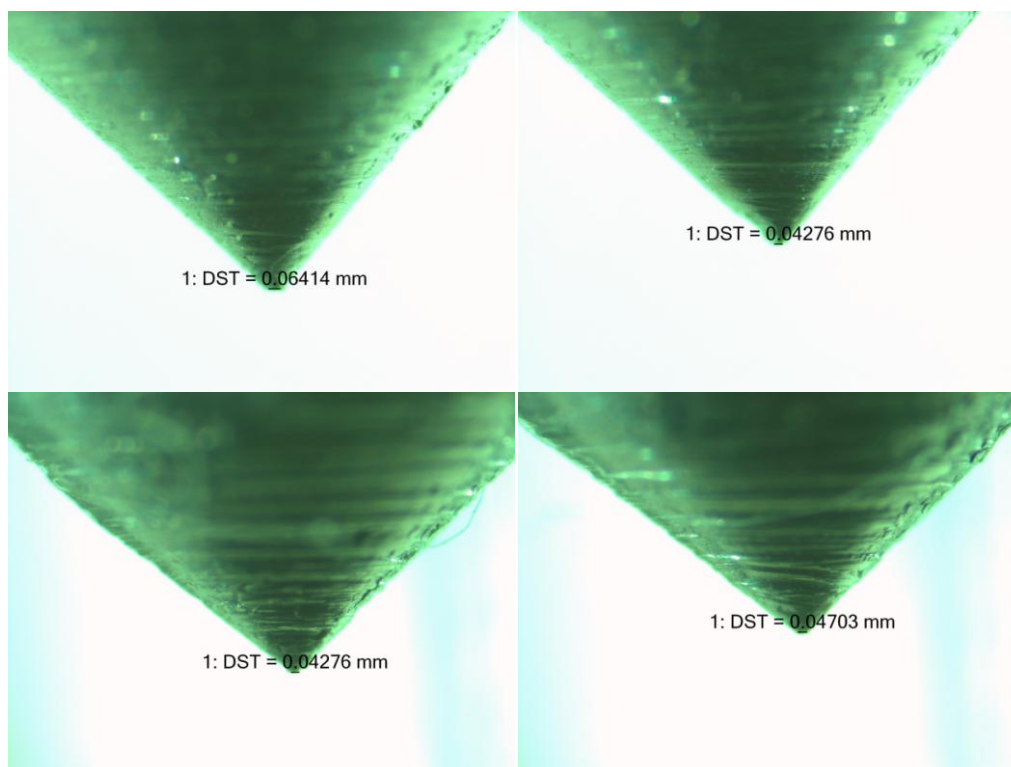




Φωτογραφίες Π.1.81- Π1.90 Ακίδες HRC 40 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_05

Δοκίμιο: Kb_05 Σκληρότητα ακίδας HRC : 55





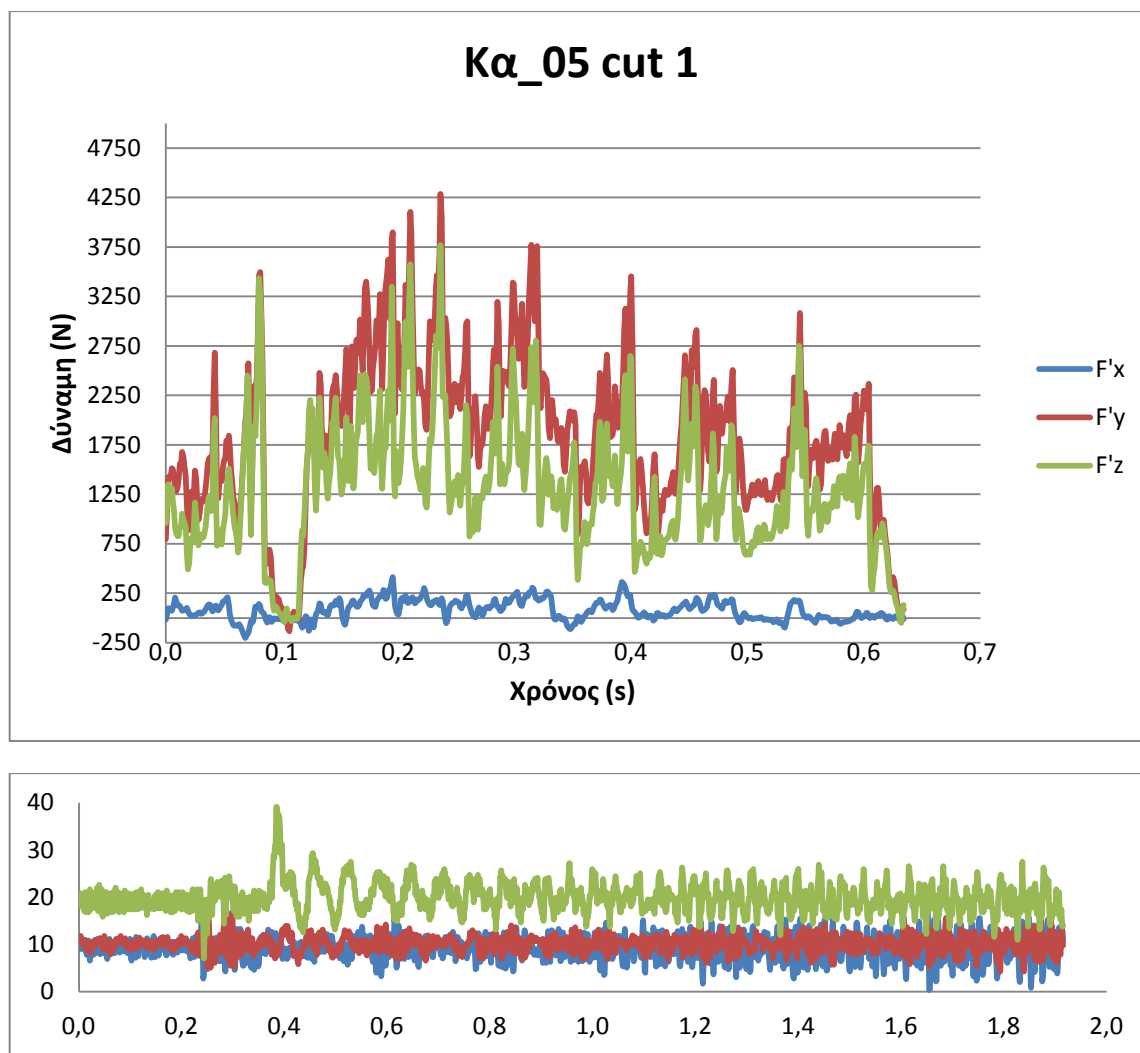
Φωτογραφίες Π.1.91- Π1.100 Ακίδες HRC 55 μετά τη διενέργεια δοκιμών στο Kb_05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

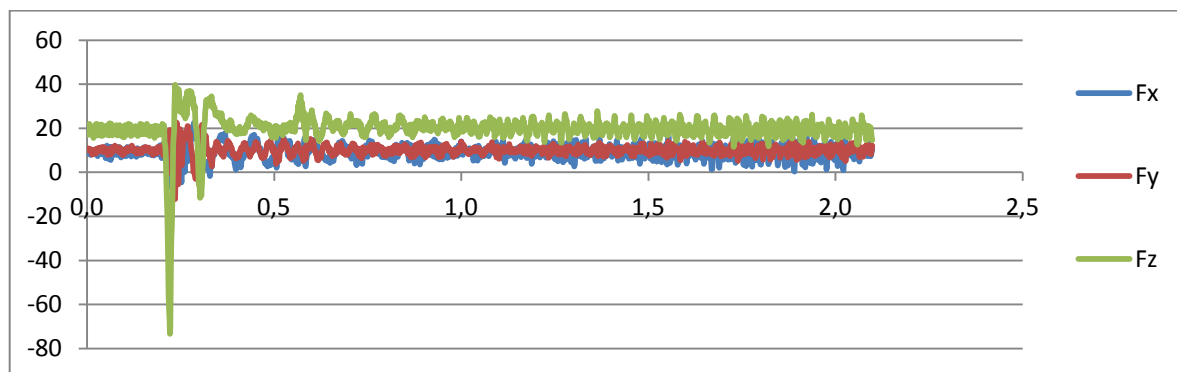
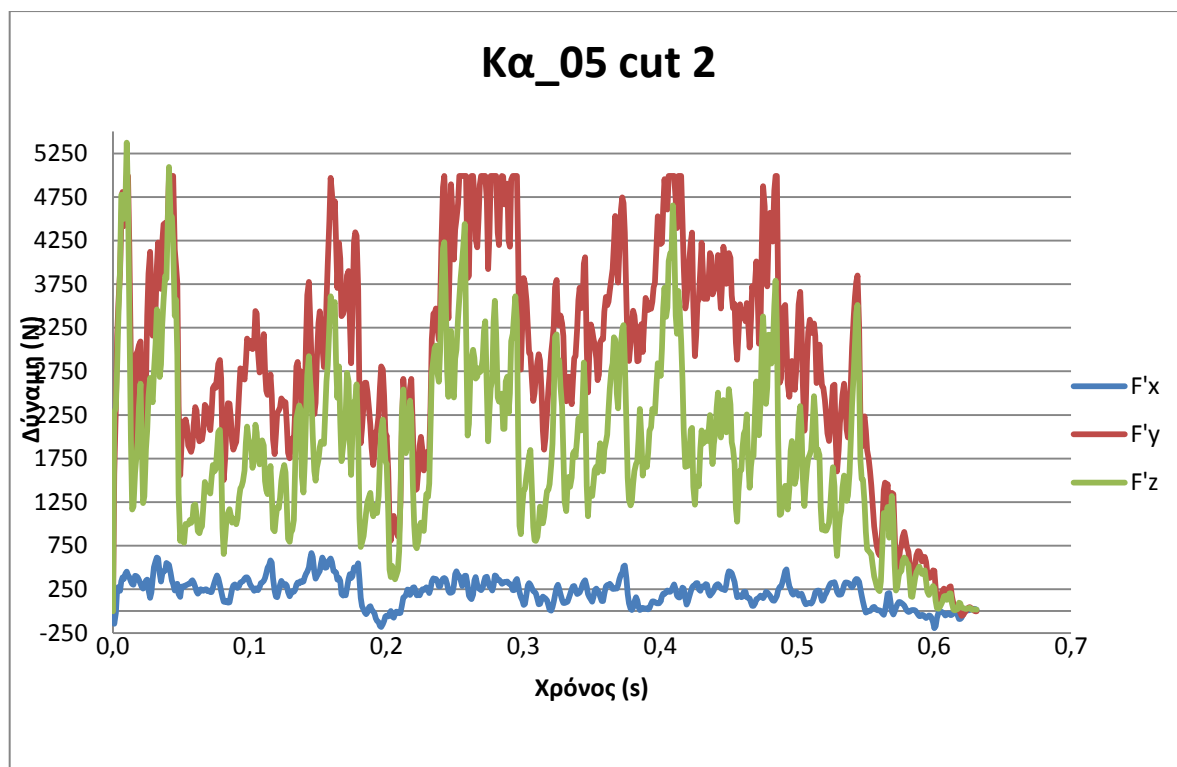
ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται οι φωτογραφίες των δοκιμών και τα Σχήματα των δυνάμεων της εργαστηριακής δοκιμής της κοπής.

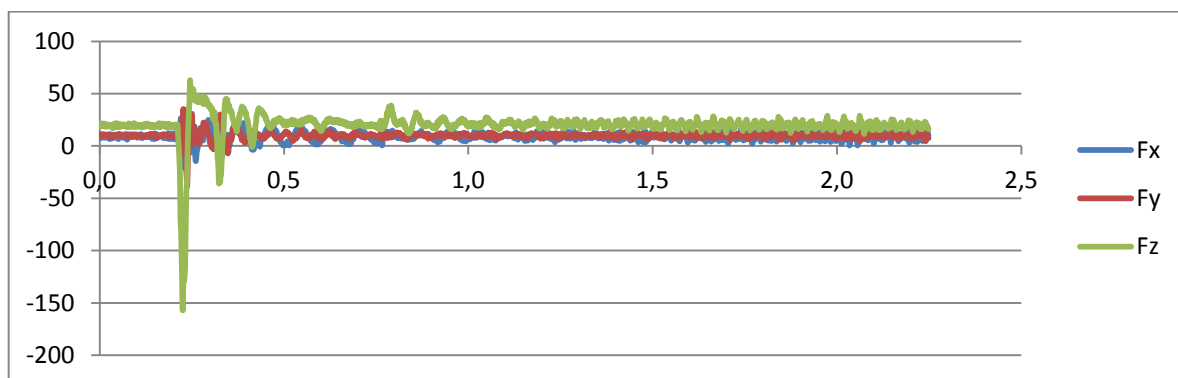
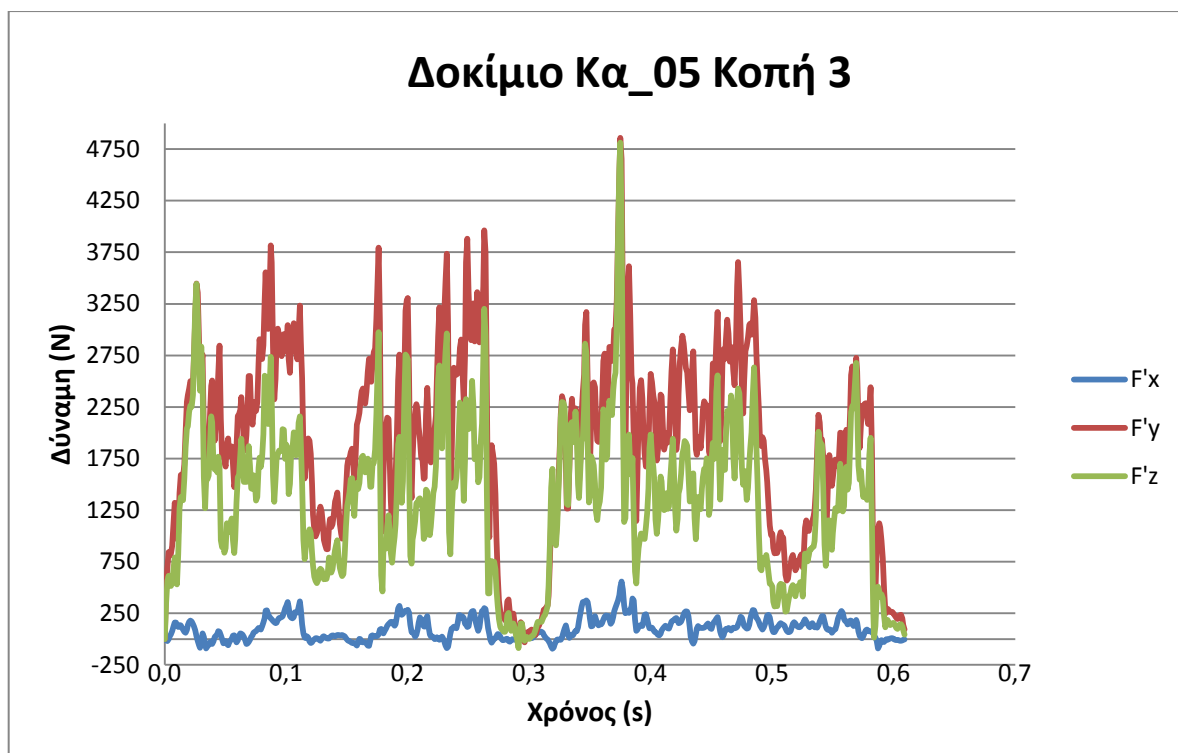
Σημείωση: Οι φωτογραφίες του δοκιμίου είναι προσανατολισμένες ώστε να αντιστοιχούν στο αντίστοιχο διάγραμμα κοπής (κοπή από αριστερά προς τα δεξιά).



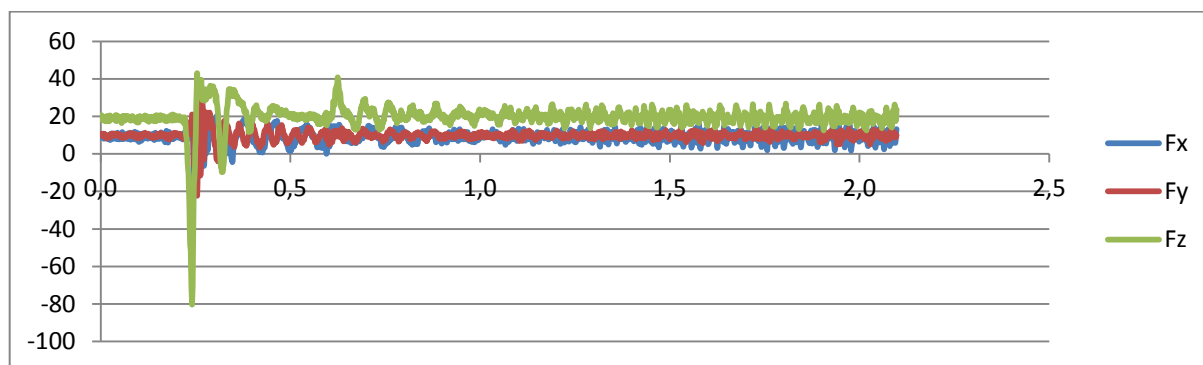
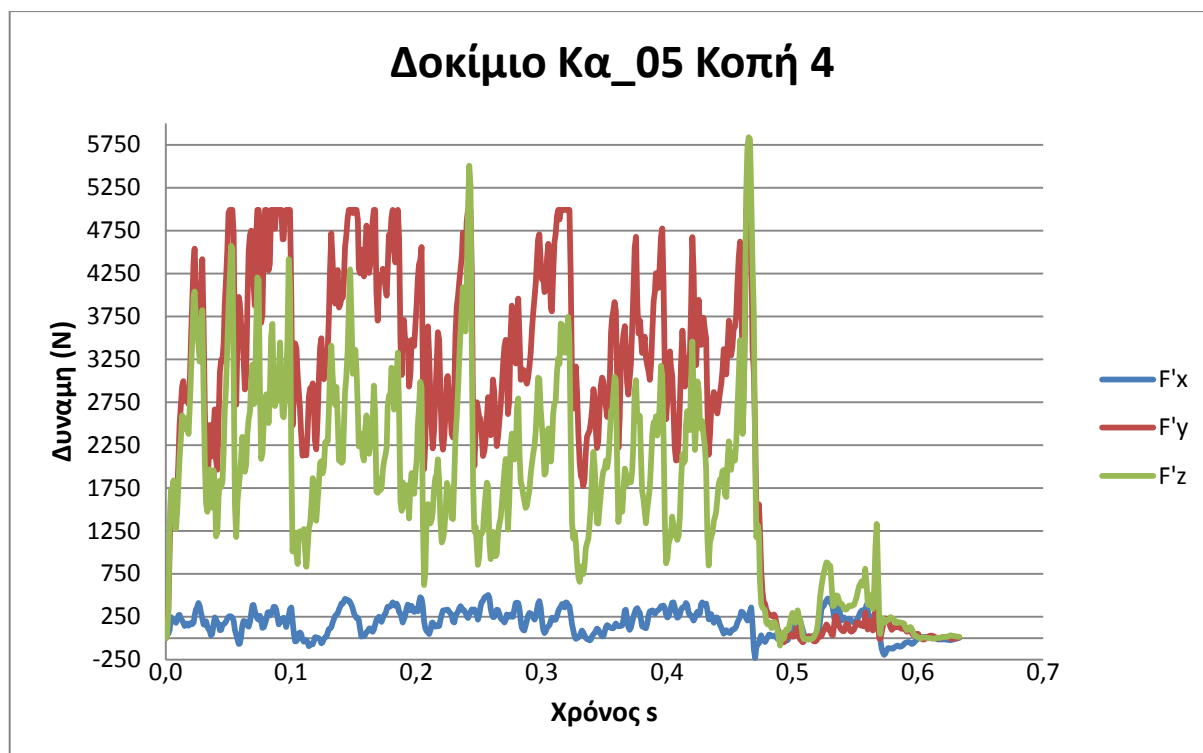
Σχήματα Π2.1, Π.2.2.. Διάγραμμα 1^η Κοπής Δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής



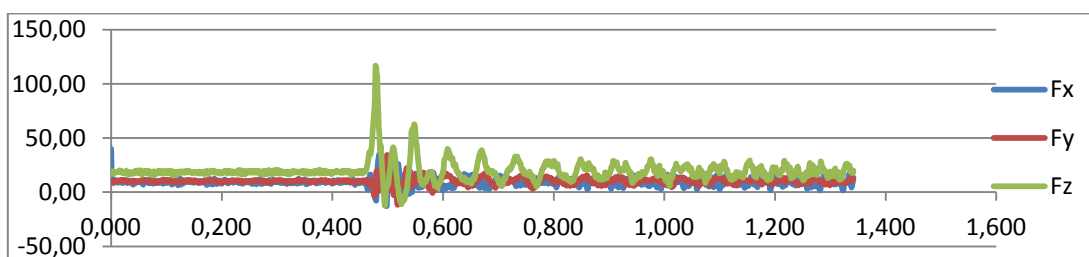
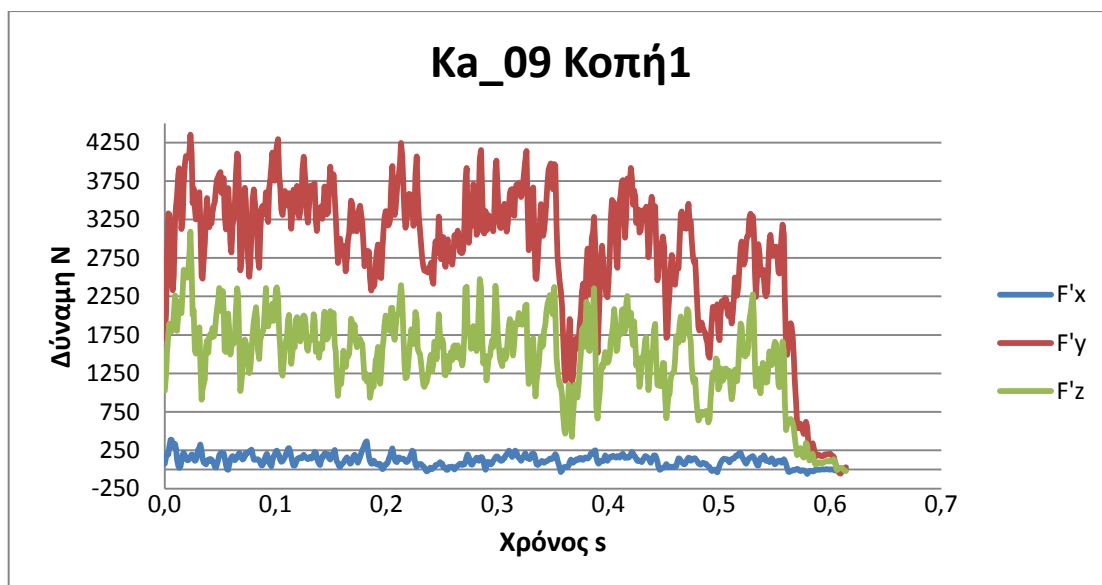
Σχήματα Π2.3, Π2.4. Διάγραμμα 2^η κοπής Δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής



Σχήματα Π2.5, Π.2.6. Διάγραμμα 3^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής



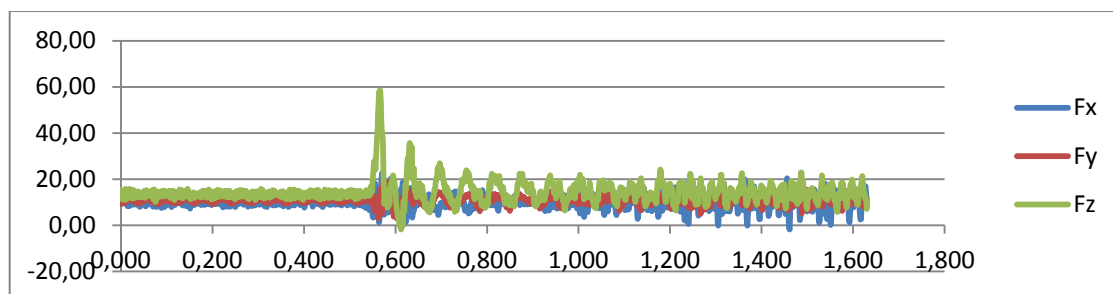
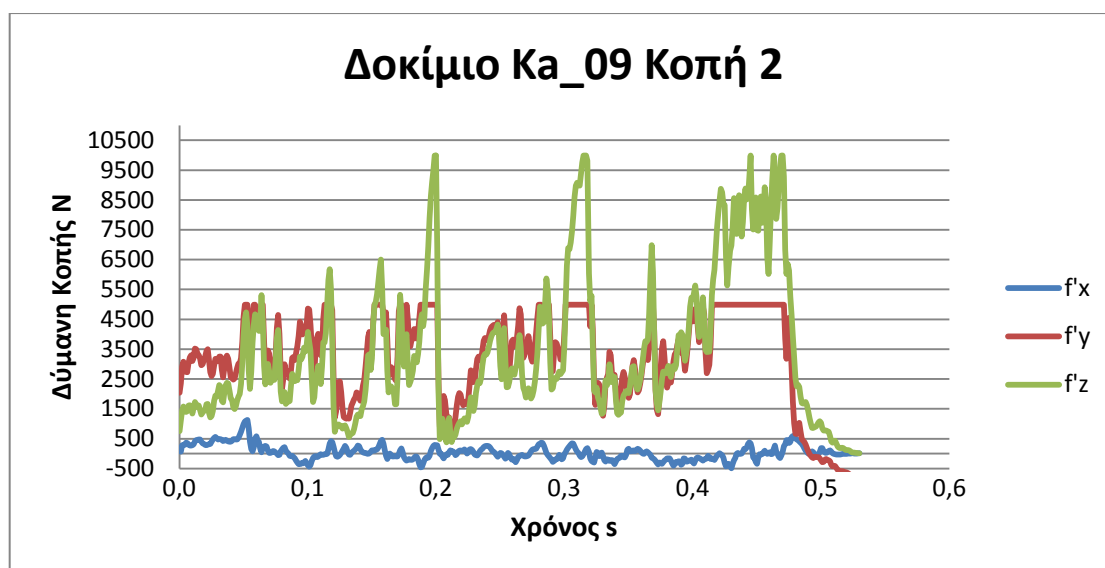
Σχήματα Π2.7, Π2.8. Διάγραμμα 4^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_05 , θόρυβος μηχανής



Σχήματα Π2.9, Π2.10.. Διάγραμμα 1^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_09 , θόρυβος μηχανής



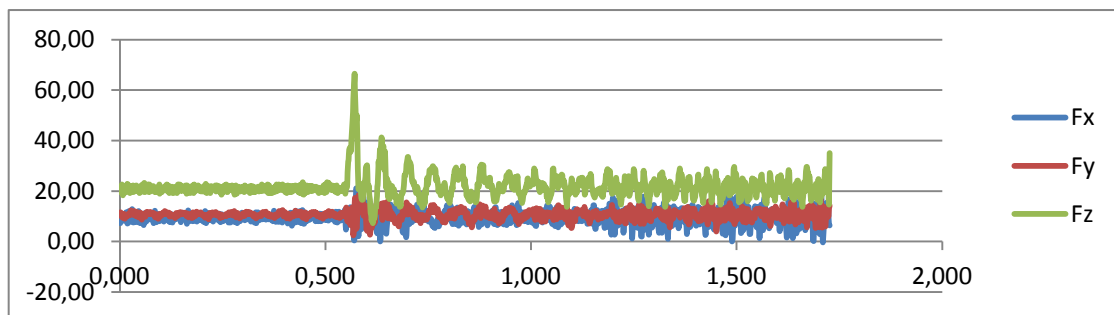
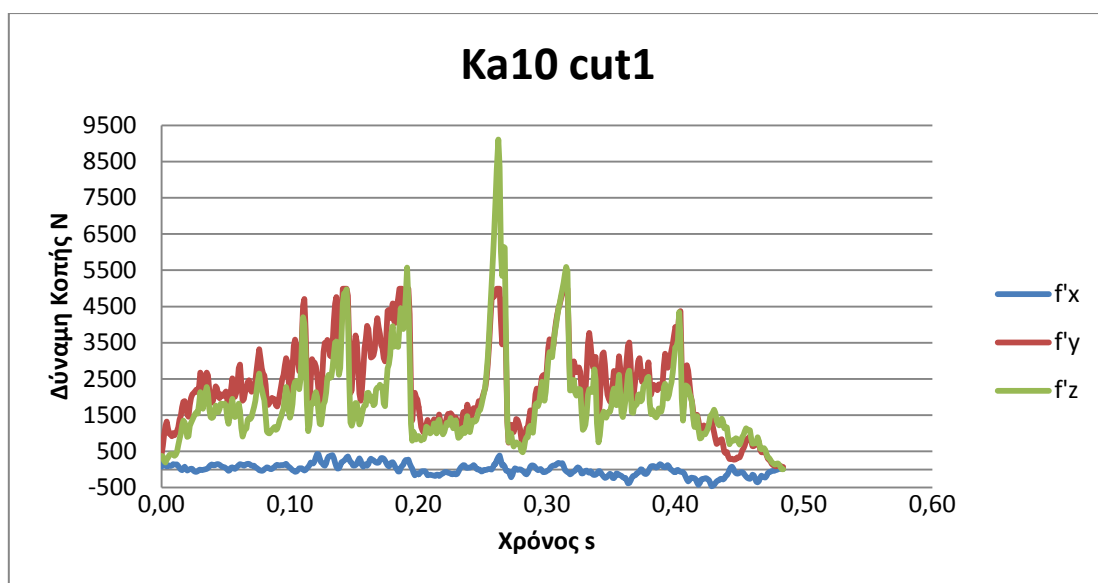
Φωτογραφία Π2.1. Κοπή 1^η δοκιμίου Κα_09



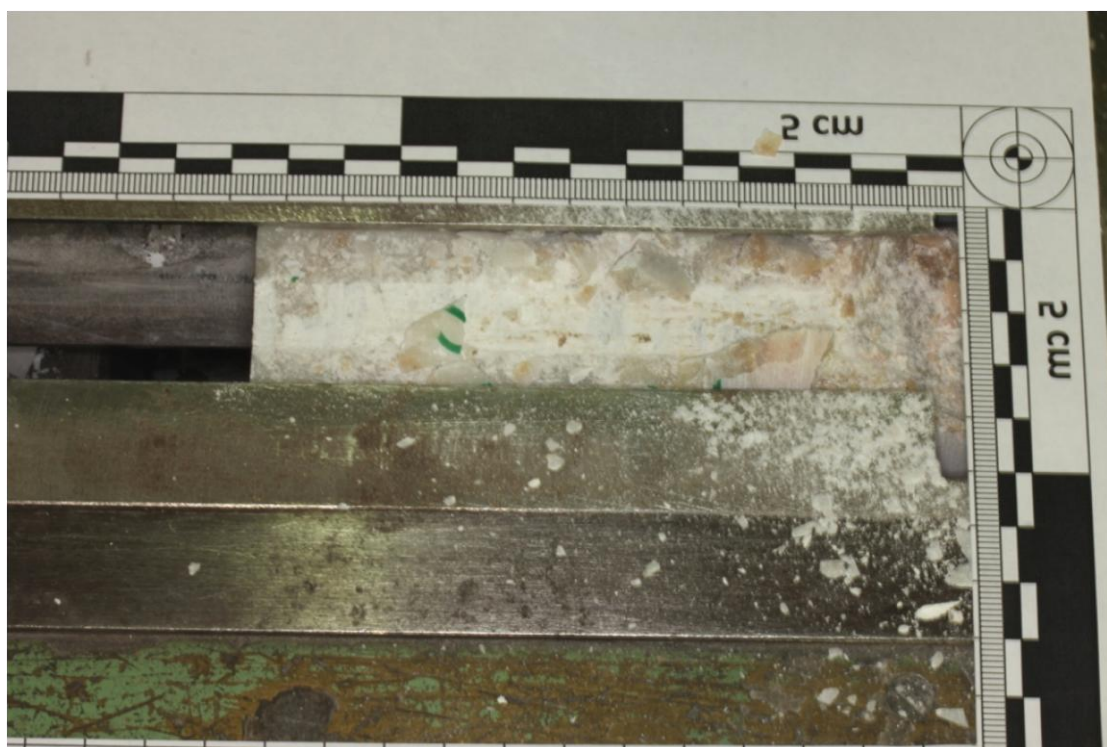
Σχήματα Π2.11, Π2.12 Διάγραμμα 2^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_09 , θόρυβος μηχανής



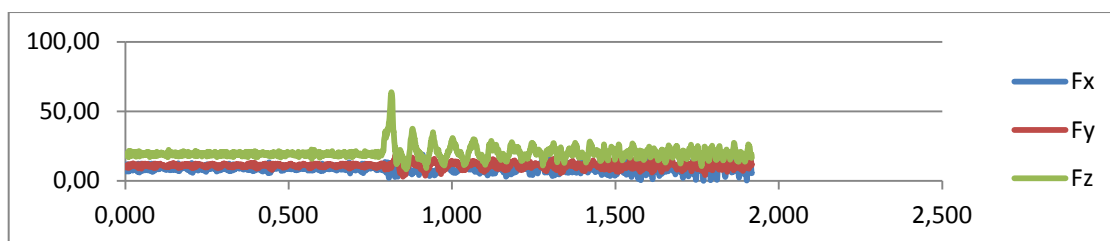
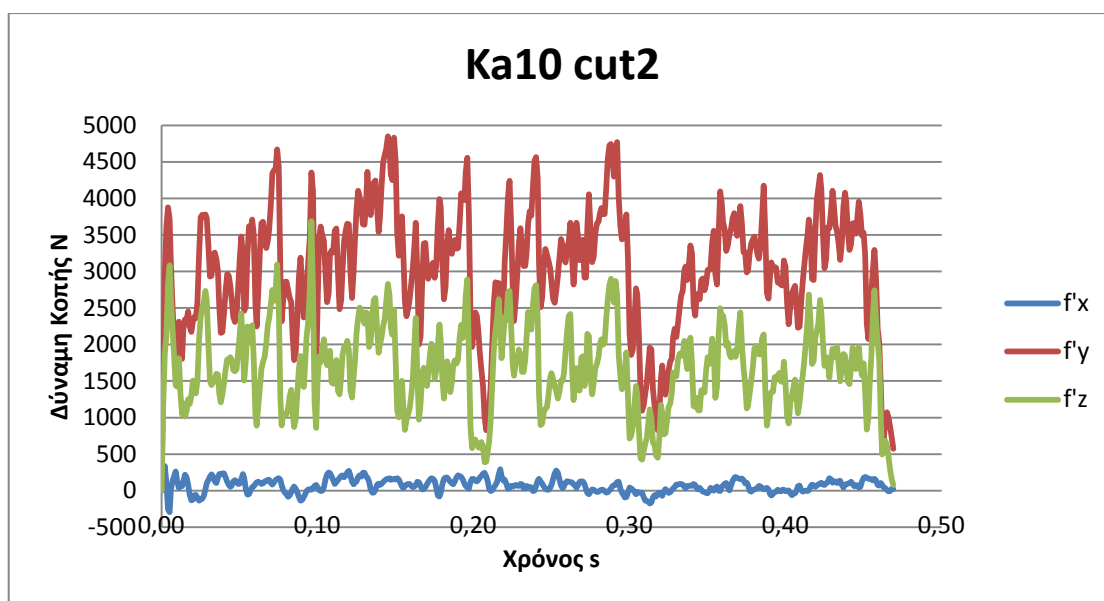
Φωτογραφία Π2.2. Κοπή 2^η δοκιμίου Κα_09



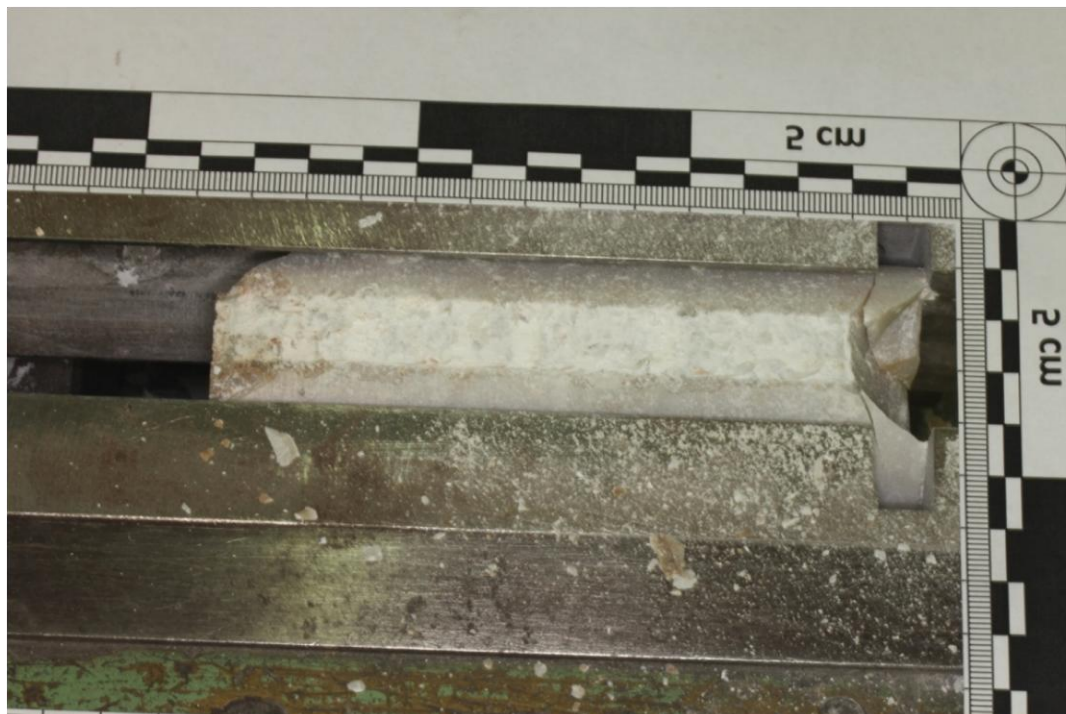
Σχήματα Π2.13, Π2.14.. Διάγραμμα 1^{ης} κοπής δοκιμίου Ka_10 , θόρυβος μηχανής



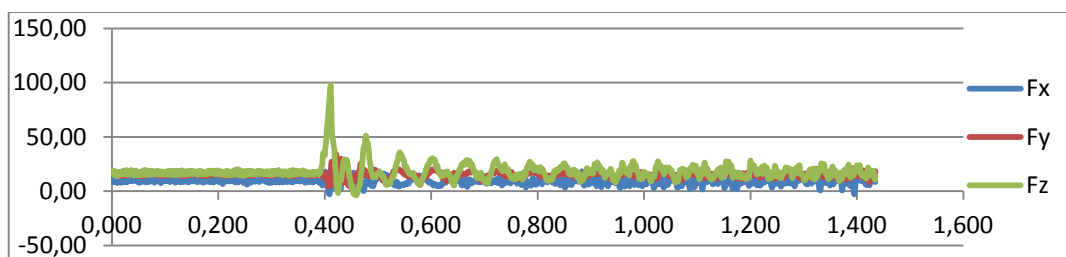
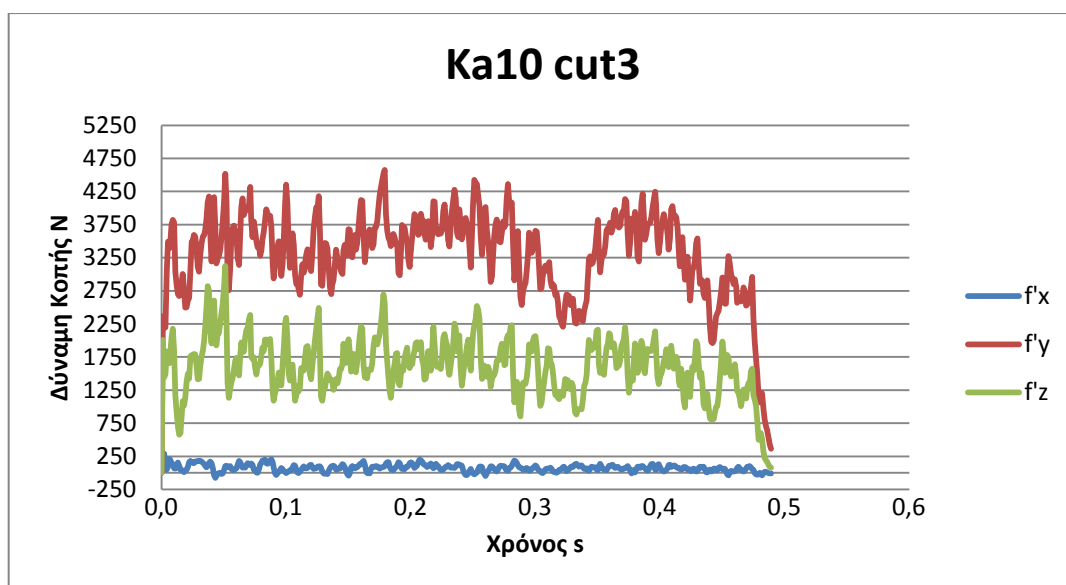
Φωτογραφία Π2.3. Κοπή 1^η δοκιμίου Ka_10



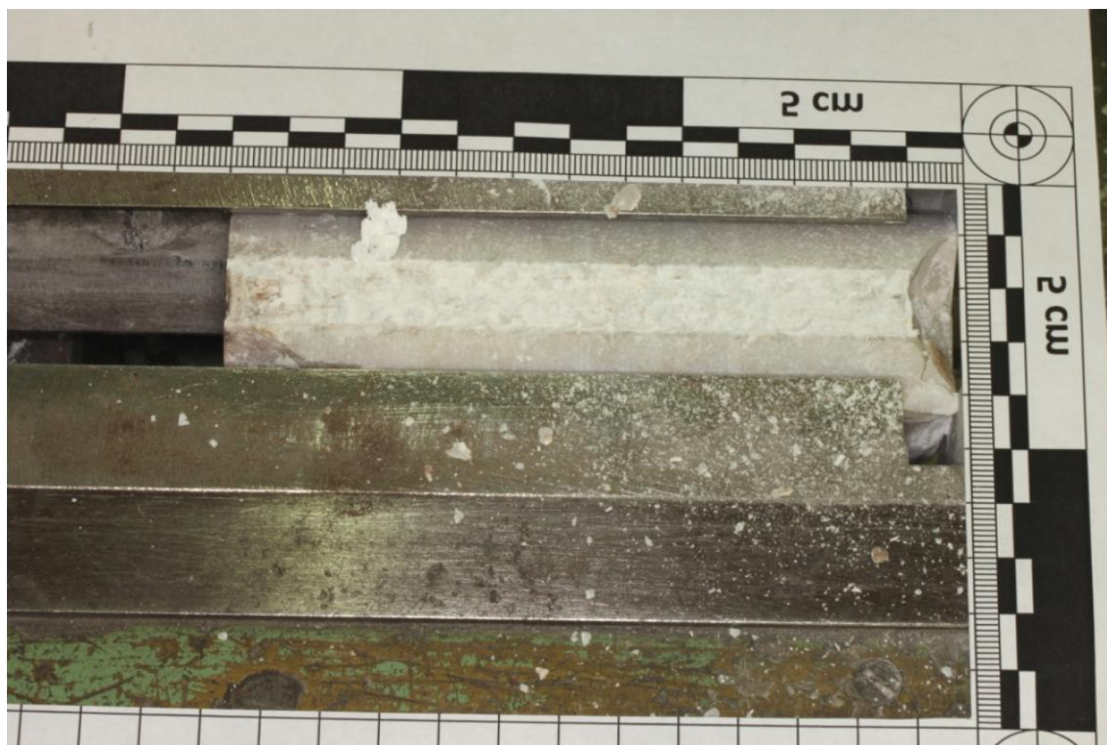
Σχήματα Π2.15, Π2.16. Διάγραμμα 2^{ης} κοπής δοκιμίου Ka_10 , θόρυβος μηχανής



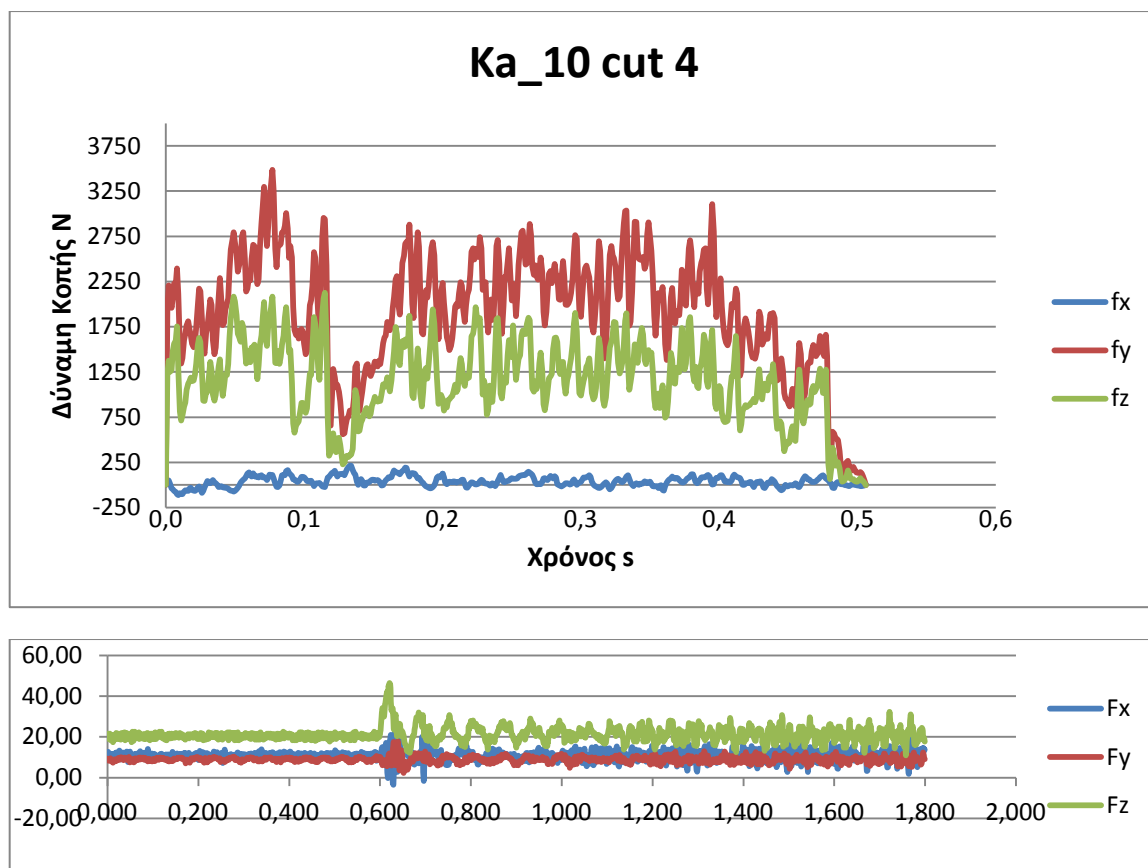
Φωτογραφία Π2.4. 2^η κοπή δοκιμίου Ka_10



Σχήματα Π2.17, Π2.18. Διάγραμμα 3^{ης} κοπής δοκιμίου Ka_10 , θόρυβος μηχανής



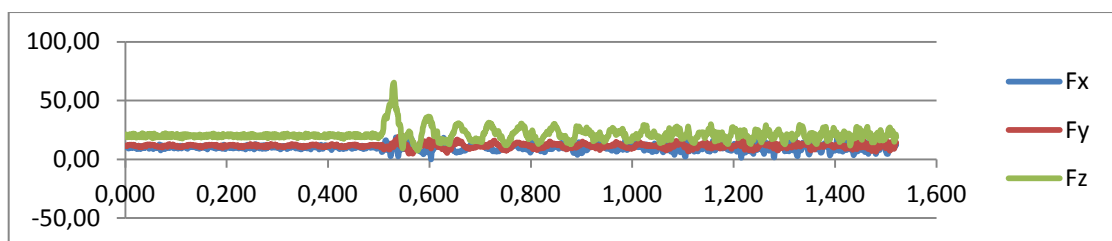
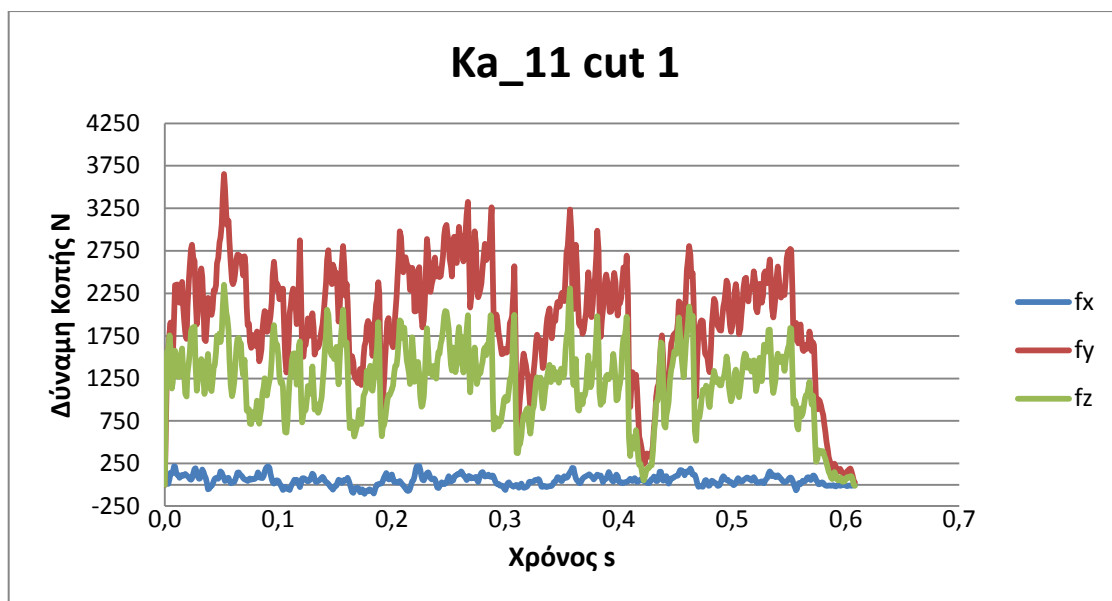
Φωτογραφία. Π2.5. 3^η κοπή δοκιμίου Ka_10



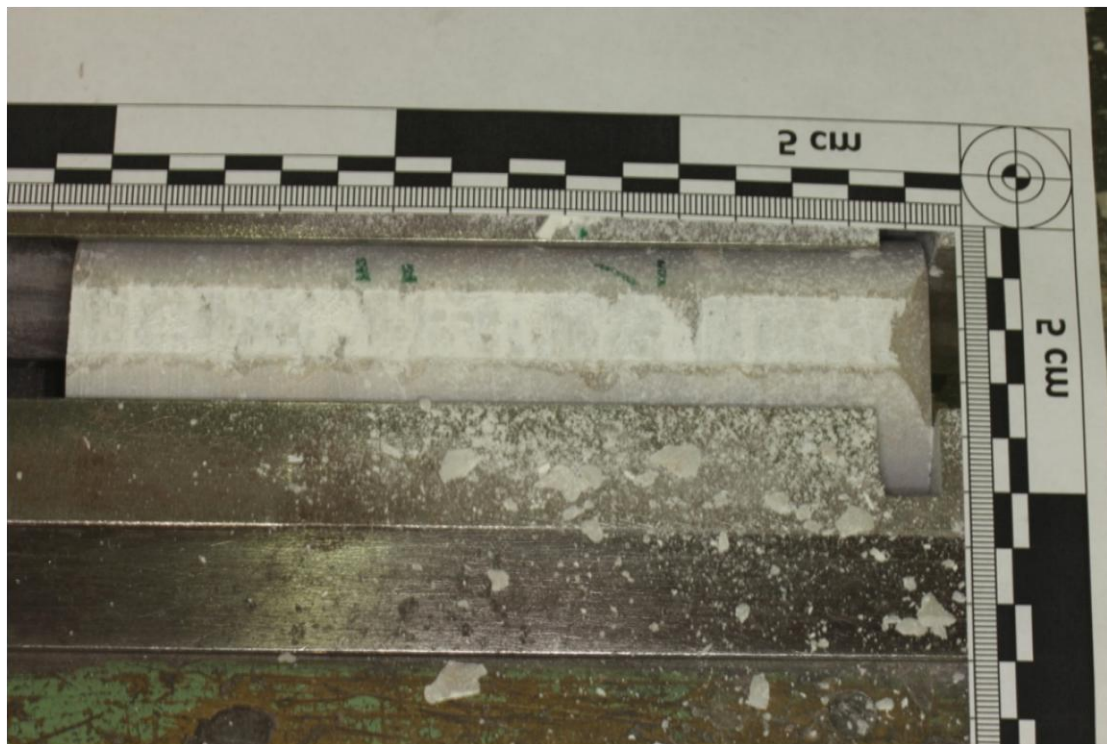
Σχήματα Π2.19, Π2.20. Διάγραμμα 4^{ης} κοπής δοκιμίου Ka_10 , θόρυβος μηχανής



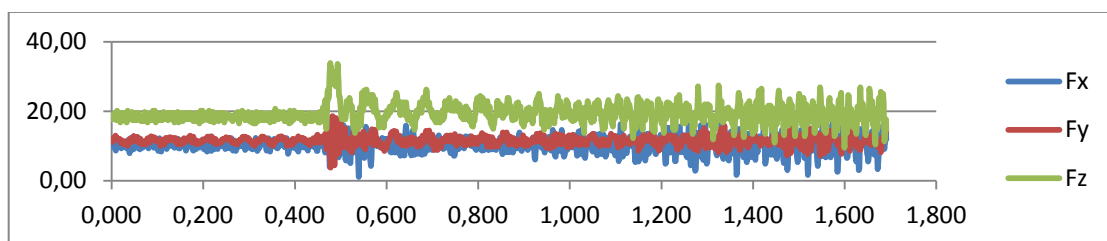
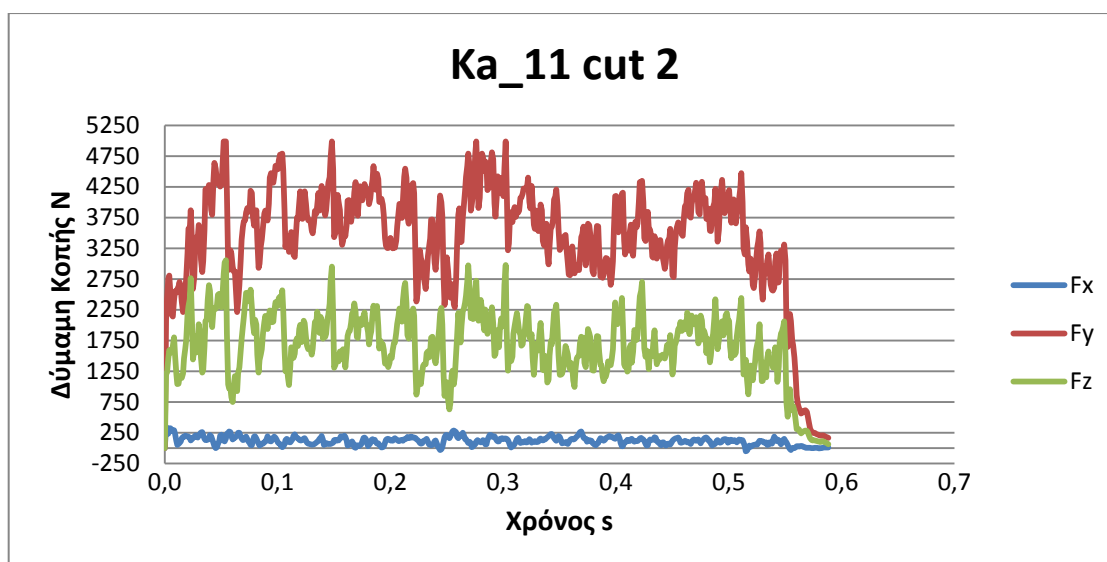
Φωτογραφία Π2.6. 4^η Κοπή δοκιμίου Ka_10



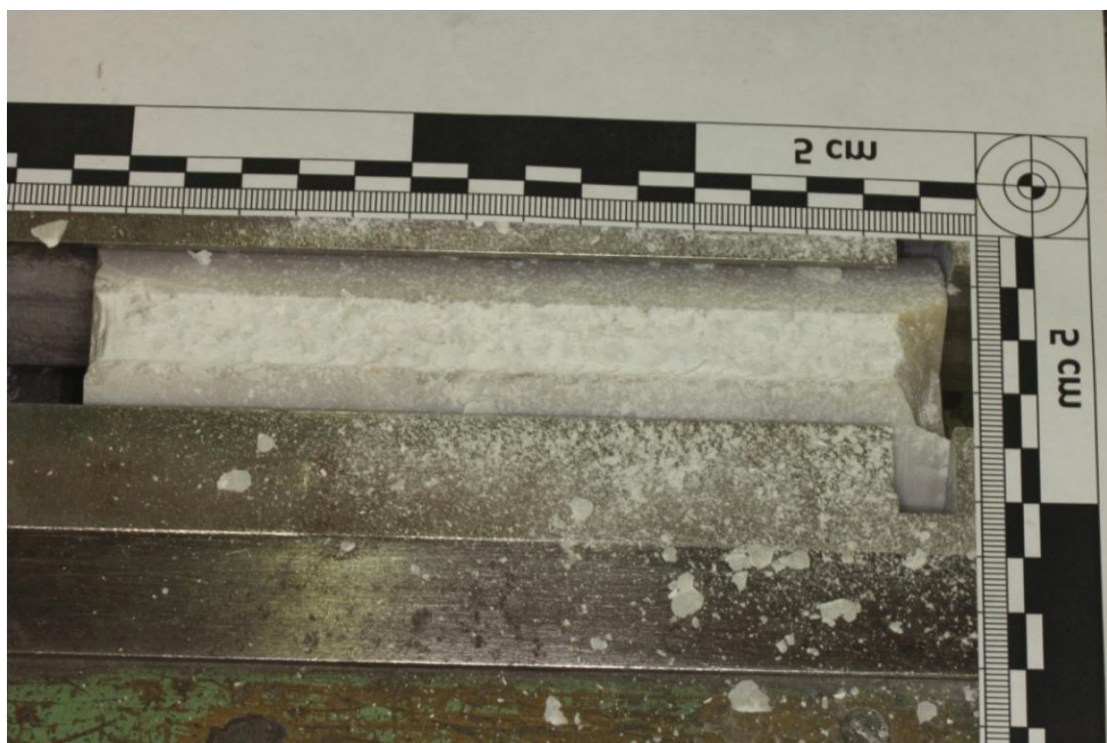
Σχήματα Π2.21, Π2.22. Διάγραμμα 1^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής



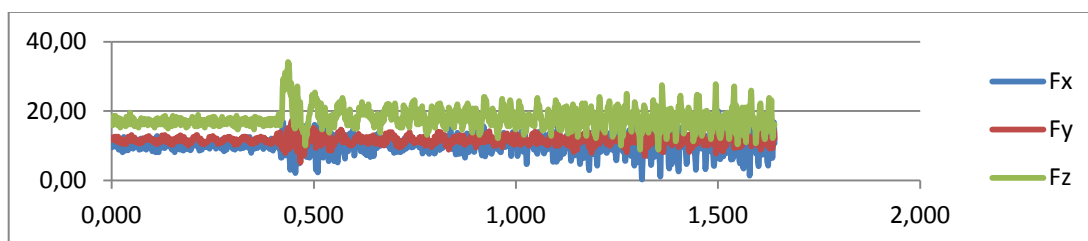
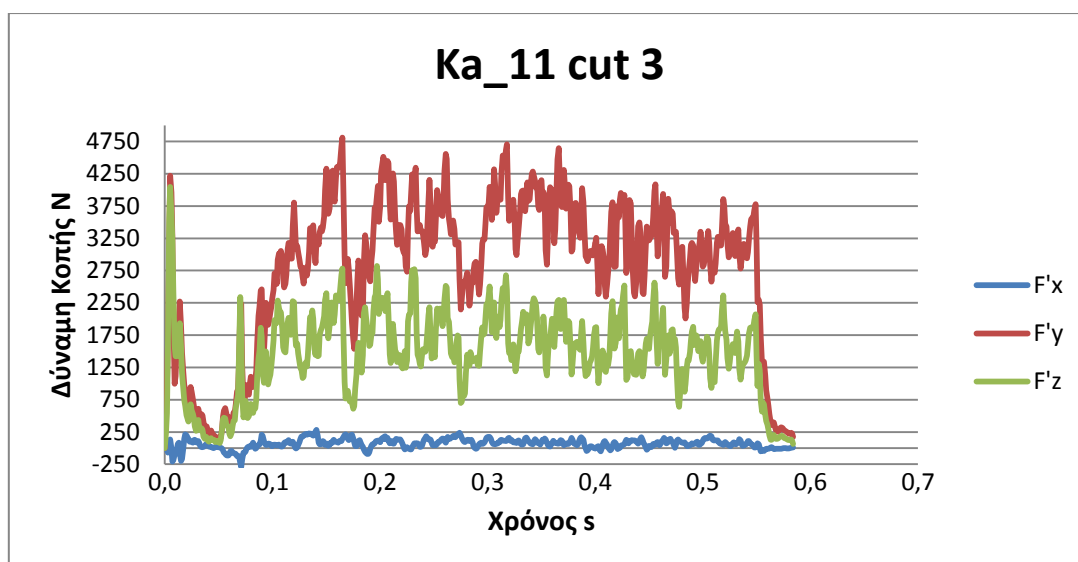
Φωτογραφία Π2.7. 1^η Κοπή δοκιμίου Κα_11



Σχήματα Π2.23, Π2.24. Διάγραμμα 2^{ης} κοπής Δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής



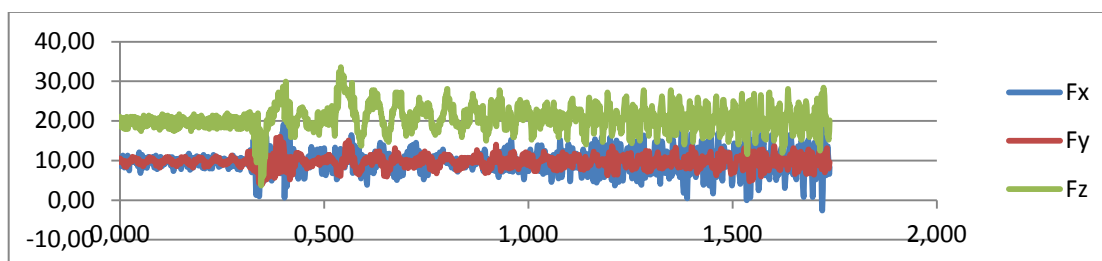
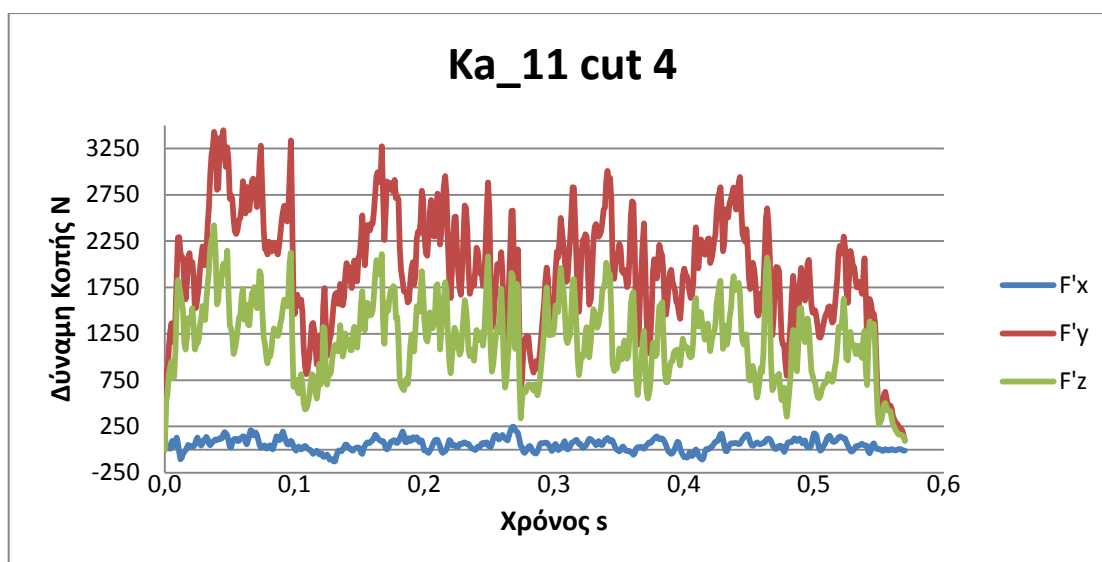
Φωτογραφία Π2.8. 2^η Κοπή δοκιμίου Κα_11



Σχήματα Π2.25, Π2.26. Διάγραμμα 3^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_11 , θόρυβος μηχανής



Φωτογραφία Π2.9. 3^η Κοπή δοκιμίου Κα_11



Σχήματα Π2.27, Π2.28. Διάγραμμα 4^{ης} κοπής δοκιμίου Κα_11, θόρυβος μηχανής



Φωτογραφία Π2.10. 4^η Κοπή δοκιμίου Κα_11

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3
ΔΟΚΙΜΗ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ
ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟ SHORE

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την δοκιμή σκληρομέτρησης με σκληρόμετρο Shore. Στους πίνακες που ακολουθούν βρίσκονται τα στοιχεία των δοκιμών για τα δοκίμια Κα_01, Κα_02, Κα_03, Κα_04, Κα_05.

Δοκίμιο Κα_01				
α/α	ΓΕ-1	ΓΕ-2	ΓΕ-3	ΓΕ-4
H1	46	46	41	40
H20	50	56	53	50
2	41	41	38	40
3	43	44	36	43
4	44	42	36	44
5	38	42	42	43
6	42	37	38	36
Δείκτης Πλαστικότητας	0,080	0,179	0,226	0,200

Πίνακας Π3.1 Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_01

Δοκίμιο Κα_02				
α/α	ΓΕ-1	ΓΕ-2	ΓΕ-3	ΓΕ-4
H1	48	44	46	43
H20	51	55	60	56
2	47	46	45	43
3	45	43	48	48
4	48	45	44	48
5	45	50	44	47
6	43	40	43	39
Δείκτης Πλαστικότητας	0,059	0,200	0,233	0,232

Πίνακας Π3.2 Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_02

Δοκίμιο Κα_03				
α/α	ΓΕ-1	ΓΕ-2	ΓΕ-3	ΓΕ-4
H1	45	44	52	45
H20	38	48	58	52
2	40	52	46	42
3	45	38	42	49
4	44	41	43	40
5	46	40	44	34
6	42	43	53	38
Δείκτης Πλαστικότητας	-0,184(μη αποδεκτή)	0,083	0,103	0,135

Πίνακας Π3.3 Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_03

Δοκίμιο Κα_04				
α/α	ΓΕ-1	ΓΕ-2	ΓΕ-3	ΓΕ-4
H1	45	45	45	43
H20	46	55	54	51
2	41	38	46	40
3	40	40	40	40
4	42	38	39	38
5	38	36	40	38
6	44	37	41	39
Δείκτης Πλαστικότητας	0,02	0,18	0,17	0,16

Πίνακας Π3.4 Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_04

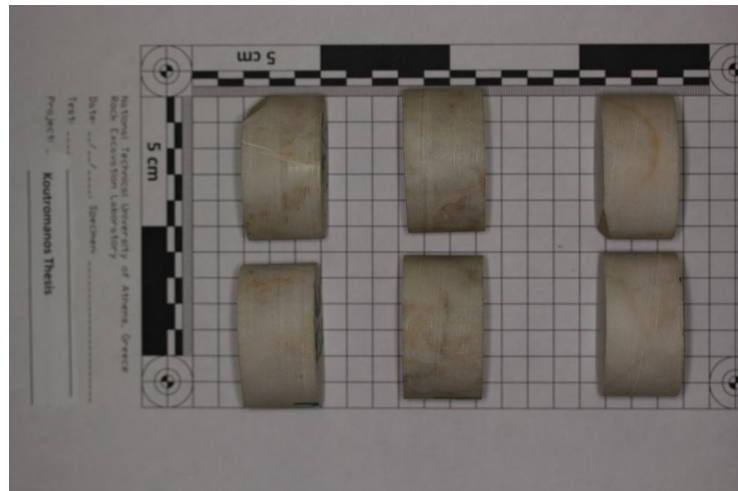
Δοκίμιο Κα_05				
α/α	ΓΕ-1	ΓΕ-2	ΓΕ-3	ΓΕ-4
H1	46	46	45	42
H20	50	53	52	52
2	42	42	42	40
3	45	42	45	46
4	44	43	43	38
5	46	44	42	42
6	40	34	45	37
Δείκτης Πλαστικότητας	0,08	0,13	0,13	0,19

Πίνακας Π3.5 Αποτελέσματα δοκιμών στο δοκίμιο Κα_05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4
ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ
(Brazilian test)

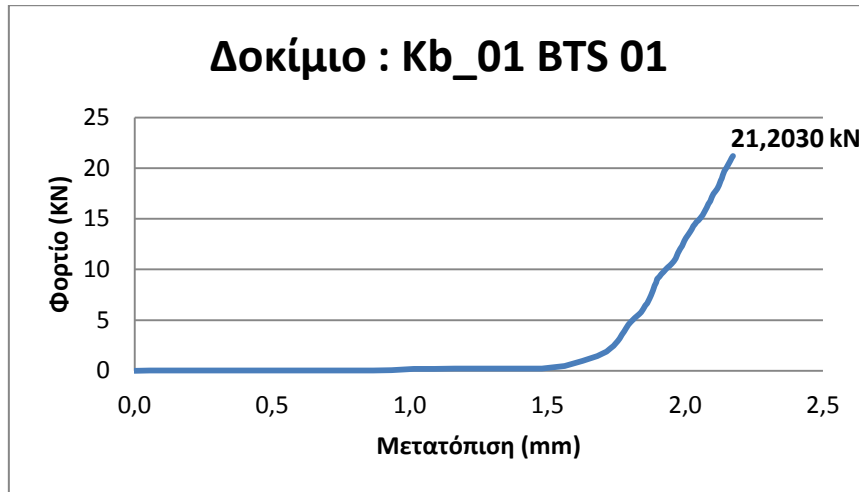


Φωτογραφία Π4.1. Κάτοψη των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης



Φωτογραφία Π4.2. Πλάγια όψη των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

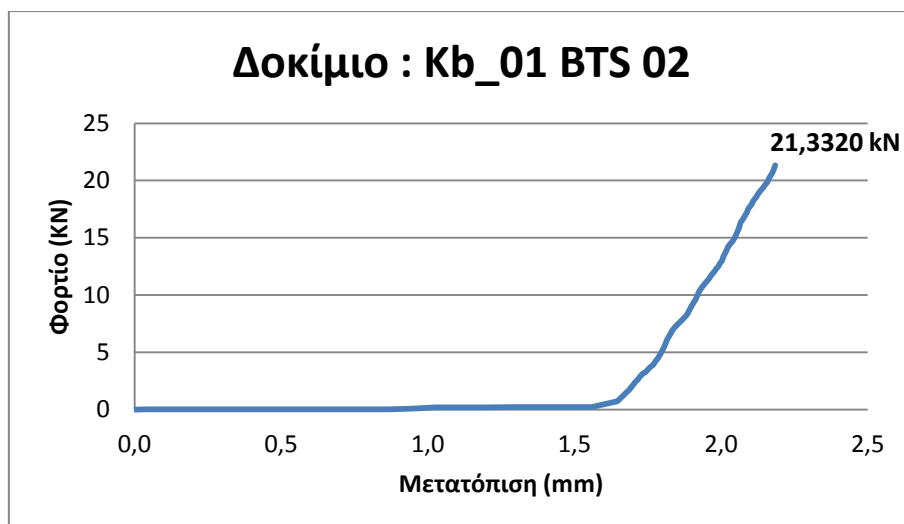
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης των δοκιμών μέχρι την αστοχία τους κατά την δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.



Σχήμα Π4.1. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_01 BTS01



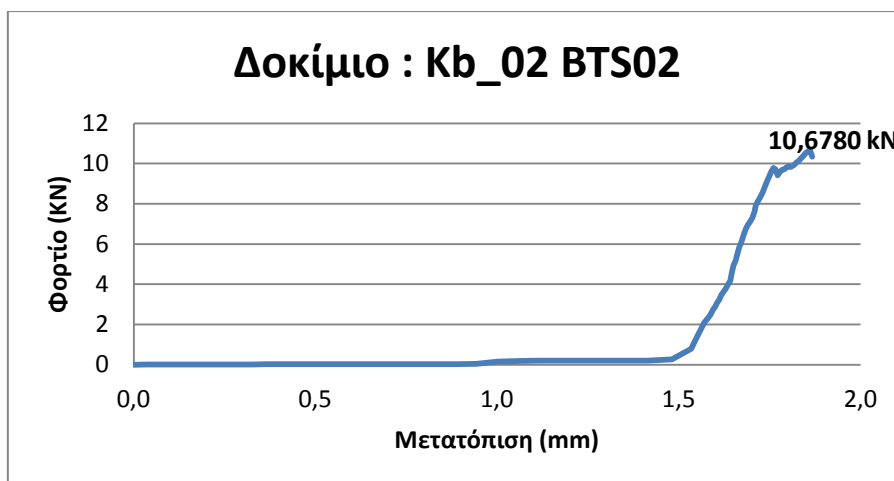
Φωτογραφία Π4.3, Π4.4. Το δοκίμιο Kb_01_BTS01 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης



Σχήμα Π4.2. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_01 BTS02



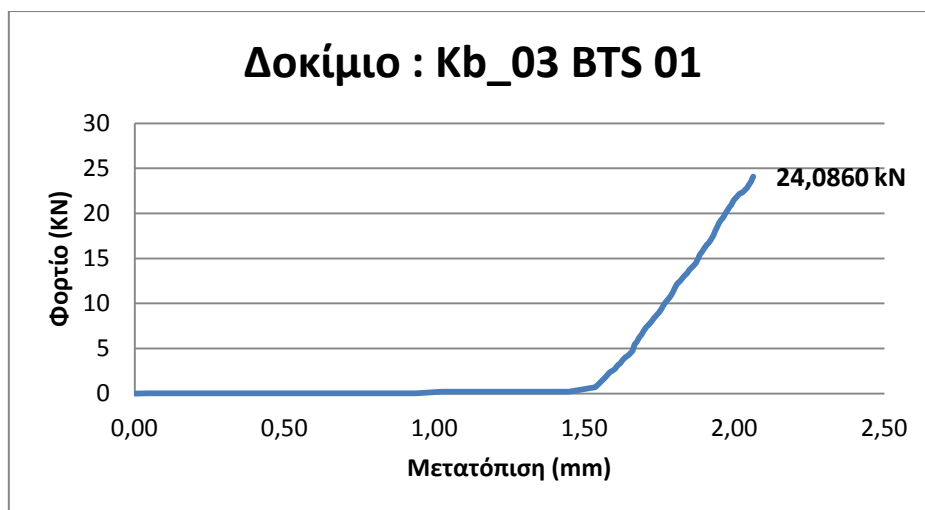
Φωτογραφία Π4.5, Π4.6. Το δοκίμιο Kb_01_BTS02 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης



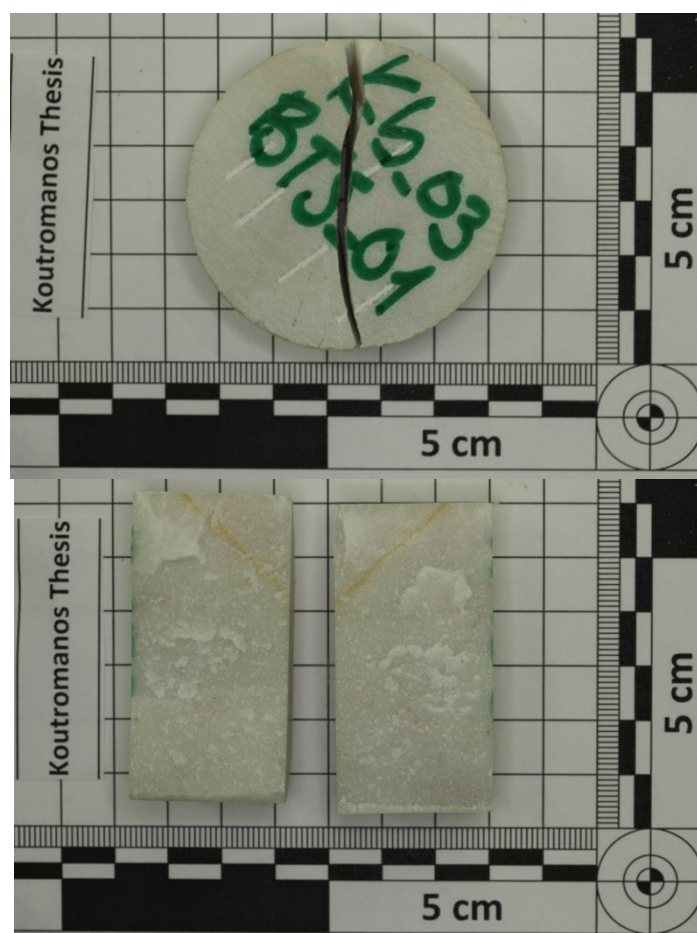
Σχήμα Π4.3. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_02 BTS02



Φωτογραφία Π4.7, Π4.8. Το δοκίμιο Kb_02_BTS02 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης



Σχήμα Π4.4. Σχηματάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Kb_03 BTS01

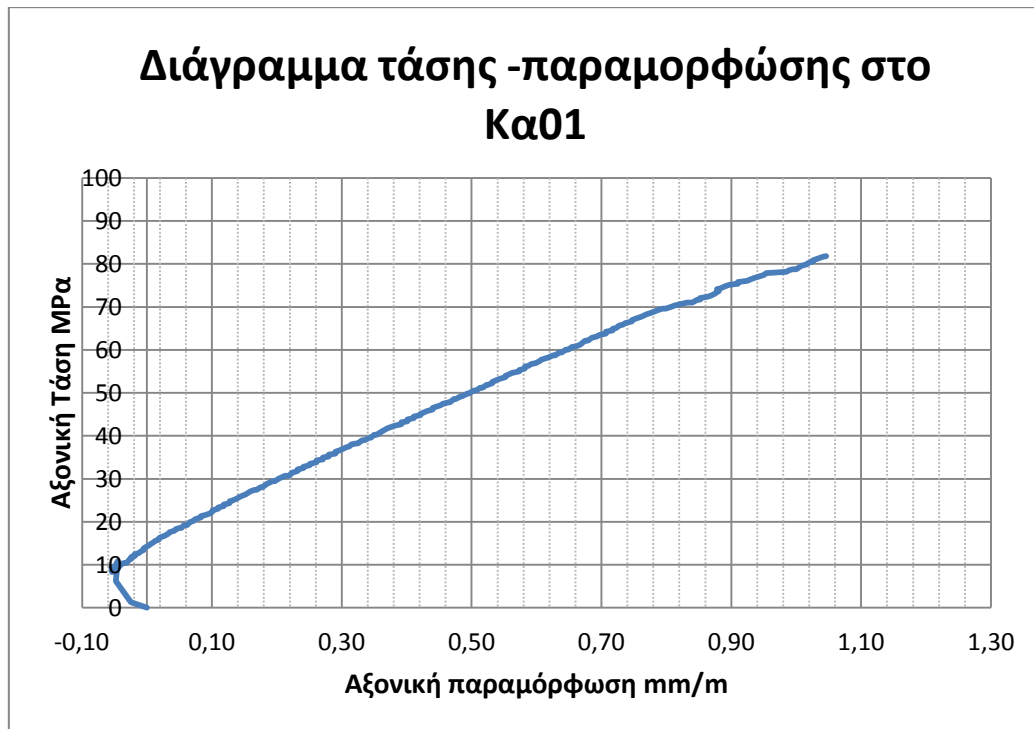


Φωτογραφία Π4.9, Π4.10. Το δοκίμιο Kb_03_BTS01 μετά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ (UCS)

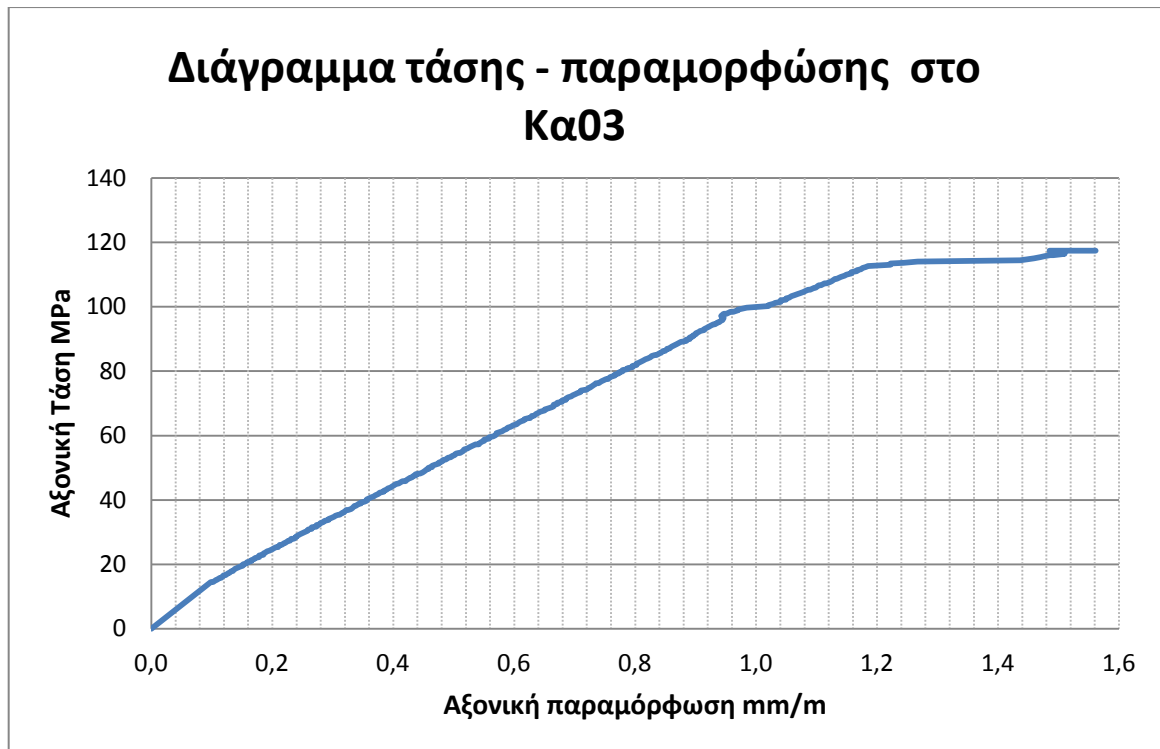
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η σχέση της αξονικής τάσης με την αξονική παραμόρφωση για τα διαγράμματα Κα_01, Κα_03.



Σχήμα Π5.1. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης στο δοκίμιο Κα_01



Φωτογραφία Π5.1. Το δοκίμιο Κα_01 μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης



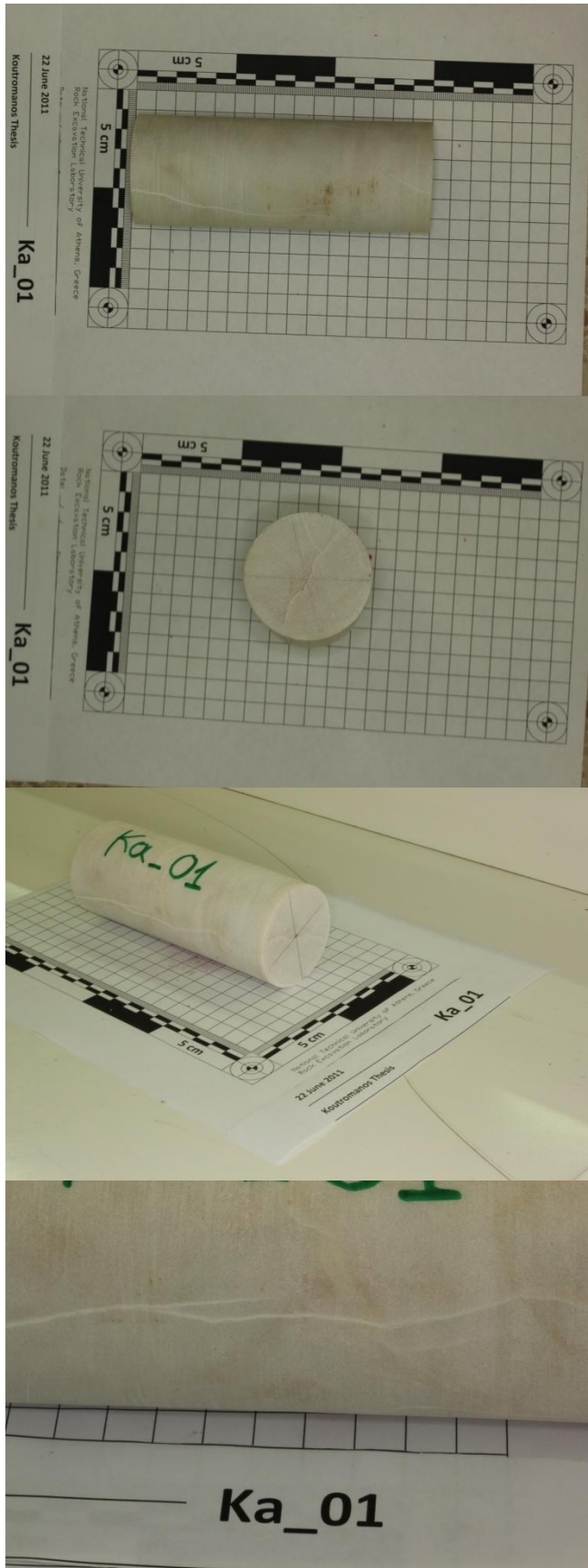
Σχήμα Π5.2. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στο δοκίμιο Κα_03



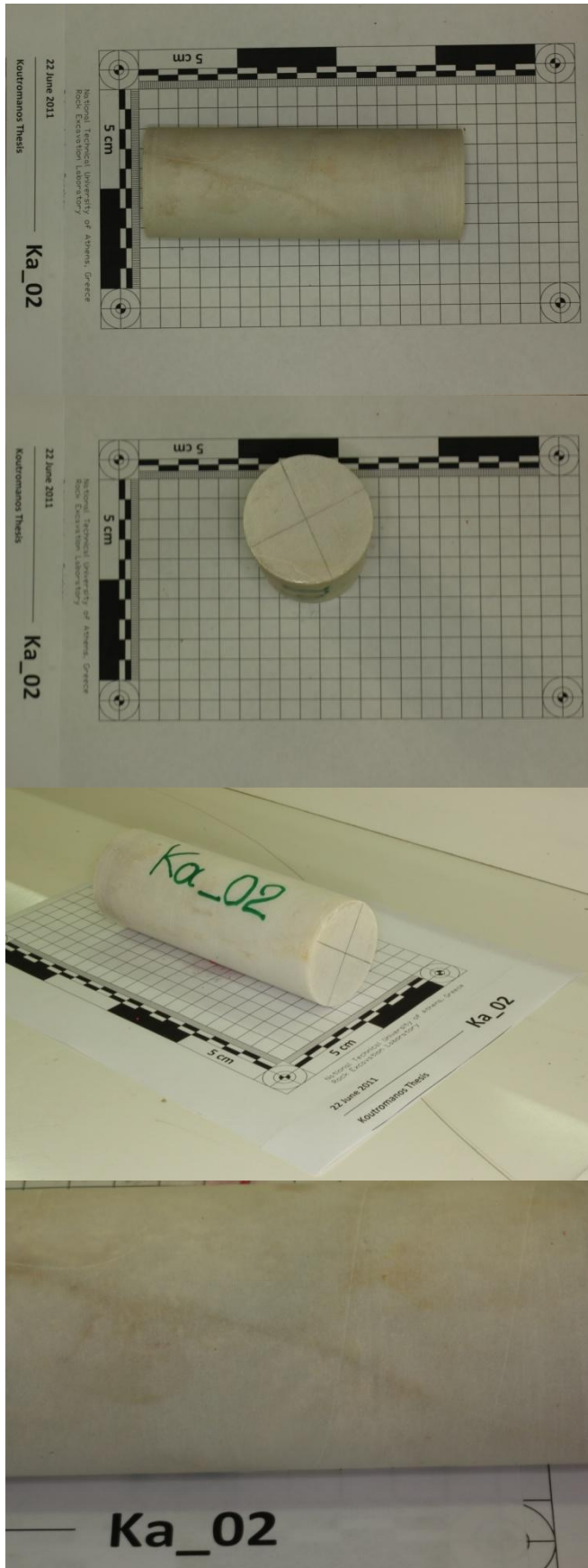
Φωτογραφία Π5.1. Το δοκίμιο Κα_03 μετά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6

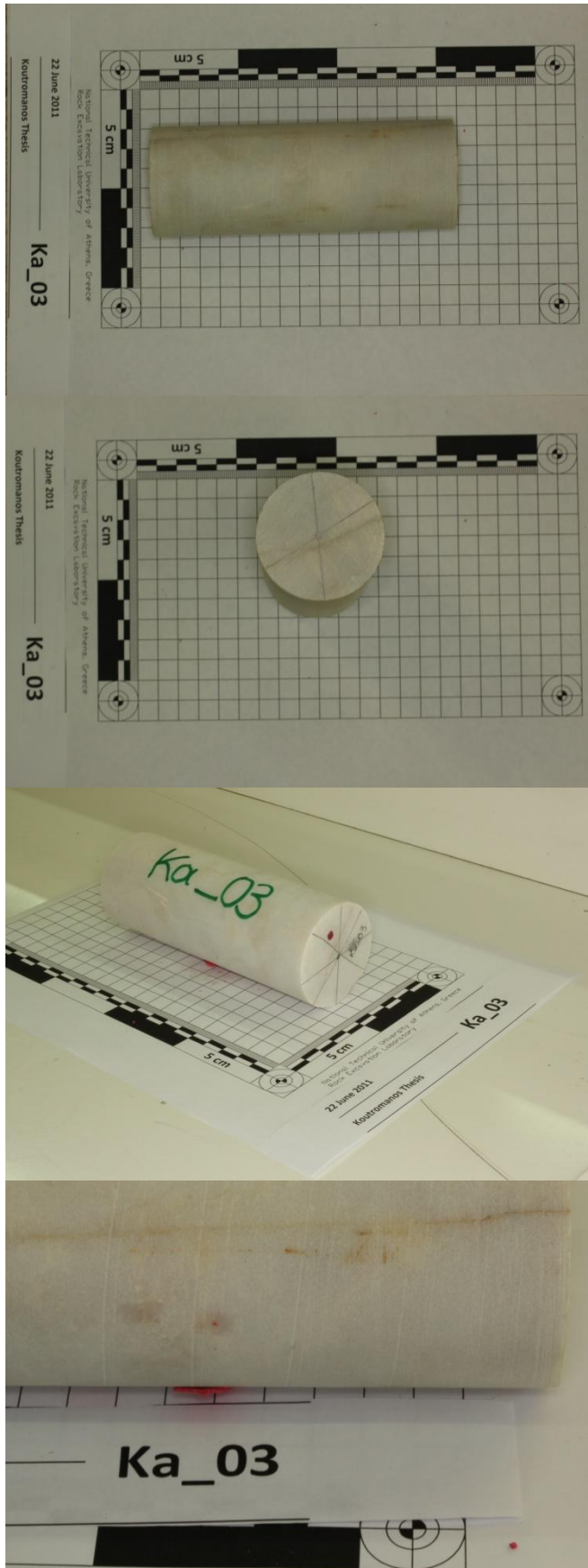
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ



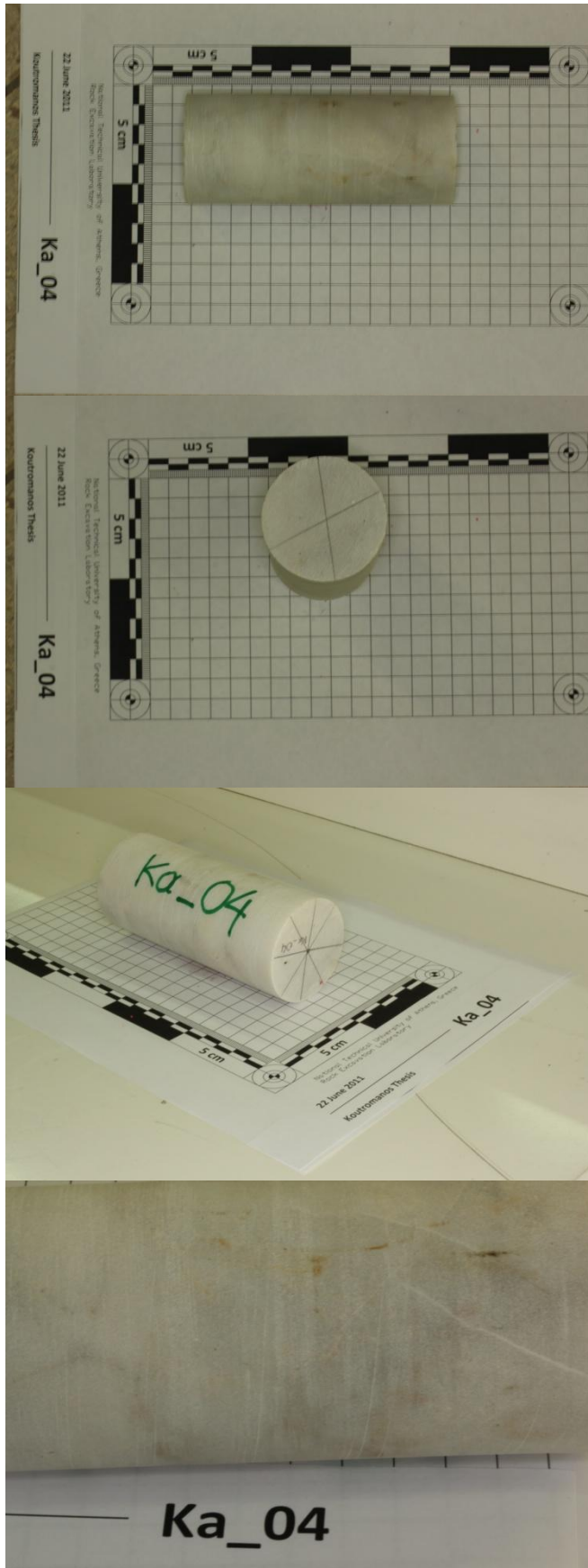
Φωτογραφίες Π6.1 – Π6.4
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_01



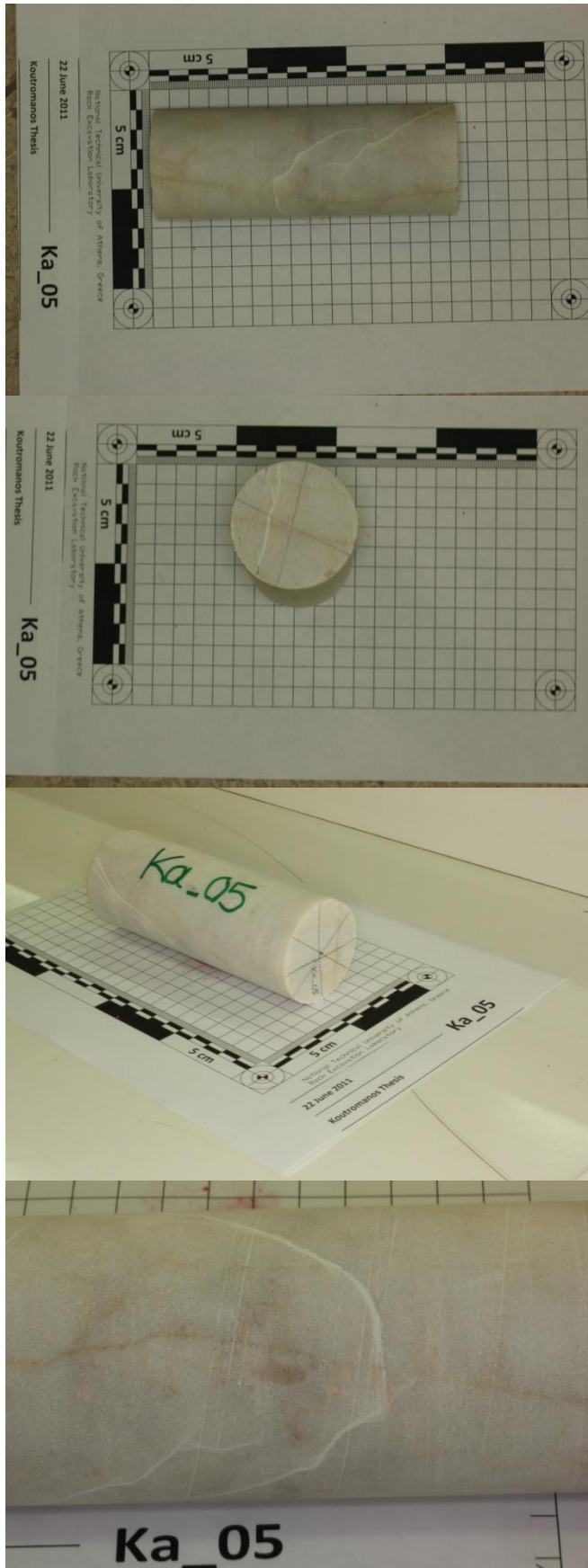
Φωτογραφίες Π6.5 – Π6.8
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_02



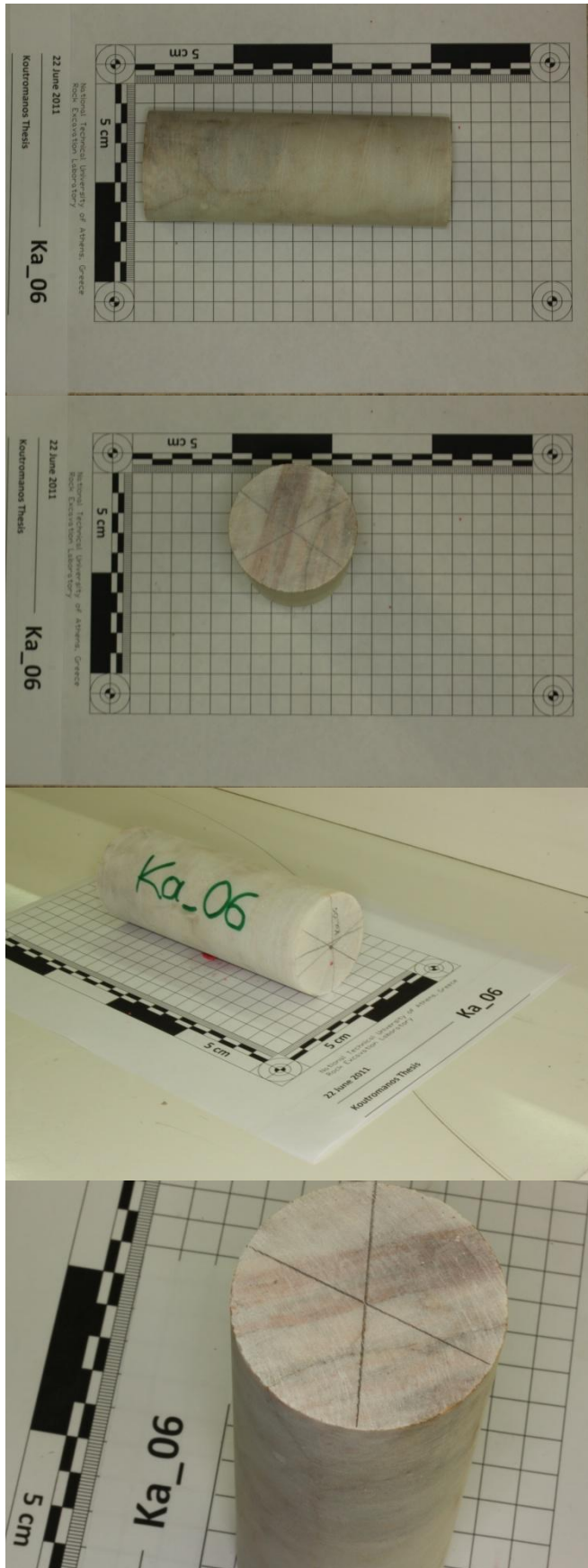
Φωτογραφίες Π6.9 – Π6.12
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_03



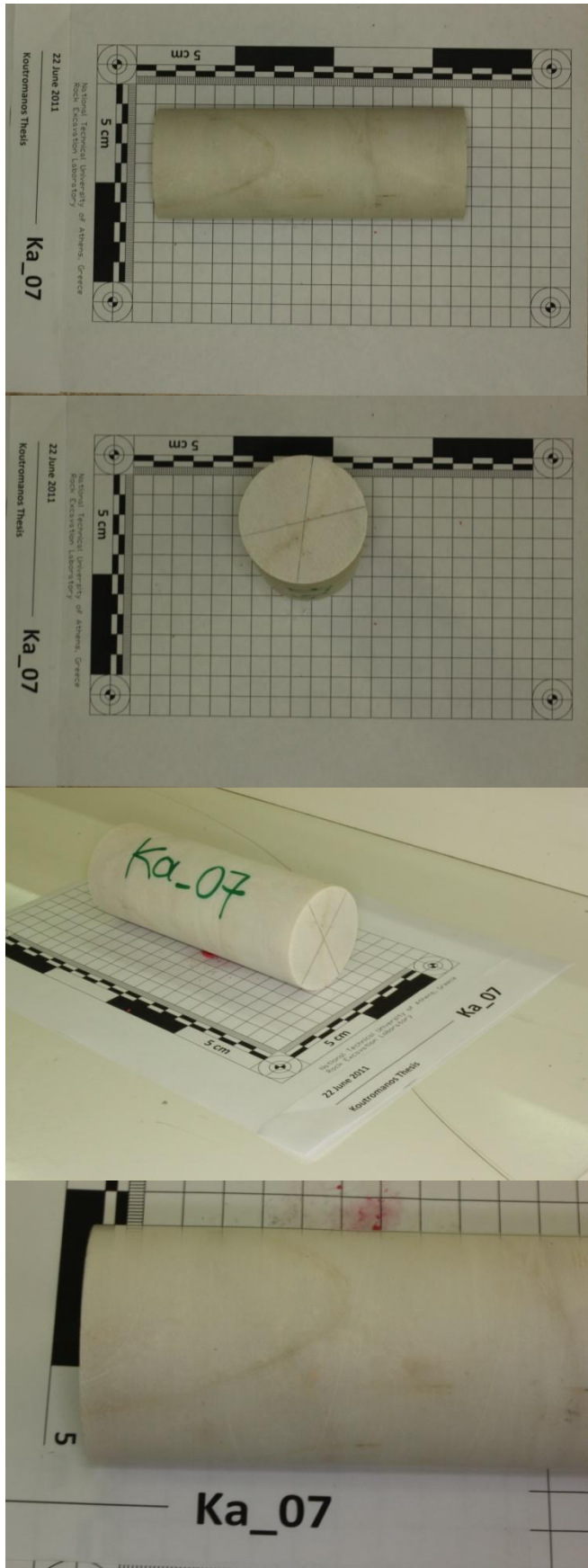
Φωτογραφίες Π6.13 – Π6.16
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_01



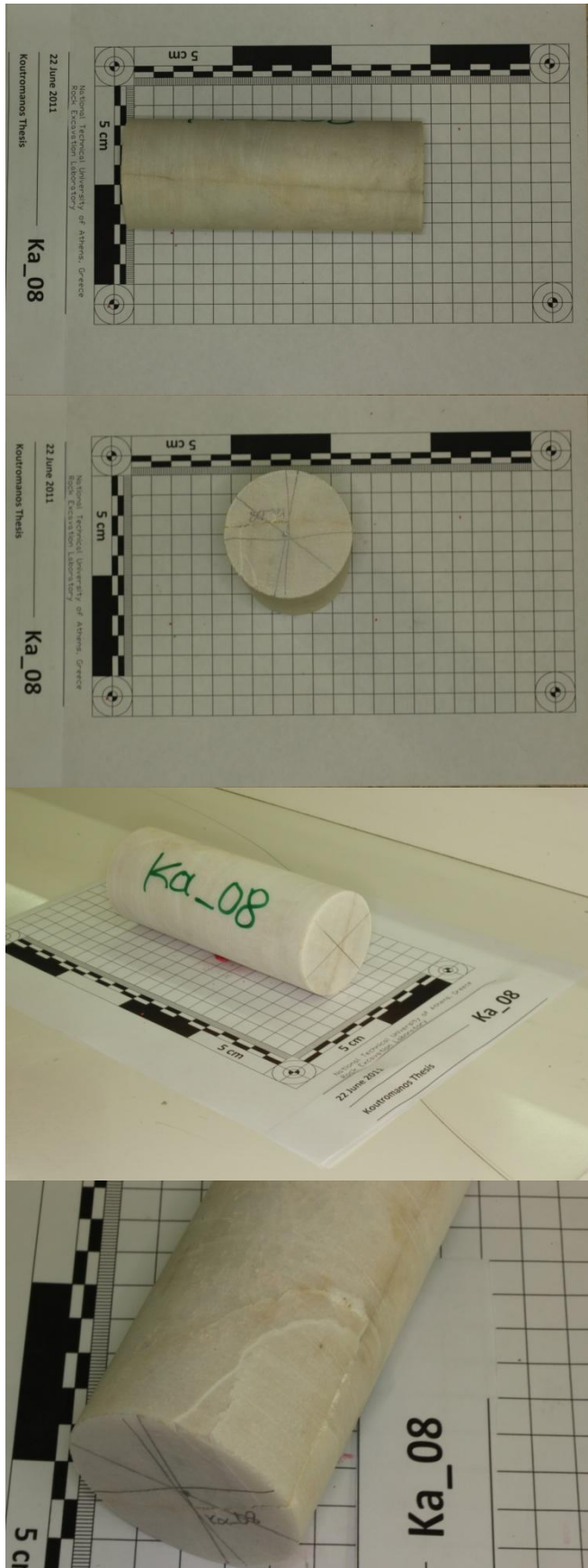
Φωτογραφίες Π6.1 7– Π6.20
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_05



Φωτογραφίες Π6.21 – Π6.24
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_06



Φωτογραφίες Π6.25 – Π6.28
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_07



Φωτογραφίες Π6.29– Π6.32
Κάτοψη , Πλάγια όψη και
λεπτομέρειες δοκιμίου Ka_08

