



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ορθογνεύσιου Ικαρίας
με μηχανικά μέσα»**

Του σπουδαστή

Πατσίδα Γεώργιου

Επιβλέπων

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος Ν.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4	
ABSTRACT	5	
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	6	
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	8	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο		
ΕΙΣΑΓΩΓΗ		
1.1. Σκοπός της εργασίας.....	12	
1.2. Οργάνωση της εργασίας	13	
1.3. Περιεχόμενο της εργασίας.....	14	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο		
ΤΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΕΡΓΟ ΙΚΑΡΙΑΣ		
2.1. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας.....	15	
2.2. Γεωλογία της Ικαρίας	19	
2.3. Προέλευση των δειγμάτων πετρώματος	23	
2.4. Μικροσκοπική μελέτη ορθογνεύσιου Ικαρίας Α	26	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο		
ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΔΙΣΚΟΥ		30
3.1. Θεωρία Roxborough και Phillips (1975)	35	
3.2. Θεωρία Ozdemir, Miller και Wang (1978).....	38	
3.3. Θεωρία Sanio (1985).....	42	
3.4. Θεωρία Rostami (1993).....	46	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο		
ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΒΜ		
4.1. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	53	
4.1.1. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΝΤΗ	54	
4.2. ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	64	
4.2.1. Η ΜΕΘΟΔΟΣ CSM.....	65	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο		
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ		
5.1. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΟΡΘΟΓΝΕΥΣΙΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΟ ΤΥΠΟΥ ΔΙΣΚΟΥ		
5.1.1. Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	67	
5.1.2. Βαθμονόμηση του δυναμόμετρου	68	
5.1.3. Προετοιμασία των δοκιμίων.....	73	
5.1.4. Πειραματική διαδικασία.....	75	
5.1.5. Σχεδιασμός του πειράματος.....	76	
5.1.6. Πειραματικά αποτελέσματα	82	
5.2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΟΡΘΟΓΝΕΥΣΙΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΟ ΣΥΡΟΜΕΝΟΥ ΤΥΠΟΥ		
5.2.1. Γενικά.....	89	
5.2.2. Προδιαγραφές της δοκιμής.....	89	
5.2.3. Εργαστηριακή διάταξη.....	90	
5.2.4. Πειραματική διαδικασία.....	94	
5.2.5. Επεξεργασία και υπολογισμοί των πειραματικών αποτελεσμάτων.	95	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

6.1. Δοκιμή μονοαξονικής (ή ανεμπόδιστης) θλίψης.....	99
6.2. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	108
6.3. Δοκιμές σκληρομέτρησης των πετρωμάτων	112
6.3.1. Δοκιμή σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore	112
6.4. Δοκιμή αποξεστικότητας κατά Cerchar	120
6.5. Δοκιμή υπερήχων	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ MICRO TBM

7.1. Microtunnelling	134
7.2. Σχεδιασμός της κοπτικής κεφαλής.....	136
7.3. Δύναμη ώσης του Micro TBM	137
7.4. Ροπή στρέψης και ισχύς της κοπτικής κεφαλής.....	137
7.5. Στιγμαίος ρυθμός κοπής (ICR)	139
7.6. Διάρκεια ζωής των κοπτικών.....	141

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8°

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	142
--------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	145
---------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Διαγράμματα δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό τύπου δίσκου

α) Ορθογνεύσιου Ικαρίας Α - Δοκίμιο 01 (//)	147
β) Ορθογνεύσιου Ικαρίας Α - Δοκίμιο 02 (\perp).....	158

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Διαγράμματα δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό συρόμενου τύπου και φωτογραφίες των δοκιμών μετά την εκτέλεση της δοκιμής.....

.....	166
-------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Διαγράμματα τάσης-παραμορφώσεων της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης και φωτογραφίες των δοκιμών πριν και μετά την εκτέλεση της δοκιμής.....

.....	172
-------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

Φωτογραφίες των δοκιμών της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης

.....	177
-------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

Φωτογραφίες μικροσκοπίου των ακίδων της δοκιμής αποξεστικότητας Cerchar

.....	180
-------	-----

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ορθογνεύσιου Ικαρίας με μηχανικά μέσα, με την εκτέλεση σχετικών δοκιμών σε δείγματα προερχόμενα από την εκσκαφή της άνω δεξαμενής του Υβριδικού Ενεργειακού Έργου Ικαρίας. Εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο του μαθήματος «Μηχανική Όρυξη Σηράγγων» του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων», στο οποίο μετέχουν οι Σχολές Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών και Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Επίκουρο Καθηγητή Θεόδωρο Μιχαλακόπουλο, ο οποίος επέβλεψε την εκπόνηση της εργασίας. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Υποψήφιο Διδάκτορα Αντώνη Πολίτη και προς το προσωπικό του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων, για την πολύτιμη βοήθεια τους στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών. Επίσης, προς τη Μαρία Περράκη, Λέκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, η οποία διενήργησε τη μικροσκοπική μελέτη του πετρώματος. Τέλος, προς το Διευθυντή του Εργαστηρίου, Καθηγητή Γεώργιο Παναγιώτου και την εταιρεία ENET Α.Ε. για την παραχώρηση των δειγμάτων του πετρώματος, χωρίς τα οποία δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Αθήνα, 2012

Πατσίδης Γεώργιος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ : «Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ορθογενέσιου Ικαρίας με μηχανικά μέσα».

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: Πατσίδης Γεώργιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος Ν., Επίκουρος Καθηγητής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ: 2011-2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ορθογενέσιου Ικαρίας με μηχανικά μέσα και εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.

Σκοπός της εργασίας είναι ο εργαστηριακός προσδιορισμός:

- 1) των δυνάμεων που αναπτύσσονται τόσο με κοπτικό τύπου δίσκου όσο και συρόμενου τύπου κατά τη διάρκεια των δοκιμών κοπής του πετρώματος.
- 2) του δείκτη ειδικής ενέργειας κοπής του πετρώματος, ο οποίος ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος.
- 3) των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος, όπως αυτές προσδιορίζονται από τις κάτωθι εργαστηριακές δοκιμές:
 - Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.
 - Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.
 - Δοκιμή σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore.
 - Δοκιμή αποξεστικότητας κατά Cerchar.
 - Δοκιμή υπερήχων.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στα κοπτικά εργαλεία είναι δυνατόν να εκτιμηθούν επίσης από:
α) θεωρητικά μοντέλα όπως οι θεωρίες κοπής, οι οποίες μελετούν τους μηχανισμούς αστοχίας των πετρωμάτων όταν προσβάλλονται από κοπτικά εργαλεία, β) εμπειρικές και ημιεμπειρικές σχέσεις οι οποίες προέρχονται από μελέτες περιπτώσεων.

Οι δυνάμεις αυτές αποτελούν καθοριστικό παράγοντα τόσο για την πρόβλεψη της επίδοσης δεδομένης μηχανής όρυξης, όσο και για τη διαστασιολόγηση μηχανής όρυξης για επιθυμητό μέγεθος προχώρησης-παραγωγής.

Σκοπός των δοκιμών κοπής είναι η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης κοπτικού-πετρώματος στις πραγματικές συνθήκες όρυξης, έτσι ώστε στη φάση μελέτης σχεδιασμού της κεφαλής να επιλέγονται μέσω παραμετρικών αναλύσεων οι βέλτιστες παράμετροι εκσκαφής, όπως το βάθος κοπής και η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών.

Καθοριστικό κριτήριο βελτιστοποίησης στην παραμετρική ανάλυση αποτελεί η ελαχιστοποίηση της ειδικής ενέργειας κοπής καθώς επίσης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Η ειδική ενέργεια εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το επίπεδο των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα κοπτικά εργαλεία, ενώ η φθορά των κοπτικών εξαρτάται κυρίως από την ορυκτολογική συγκρότηση του πετρώματος.

DIPLOMA THESIS: **«Laboratory investigation on the mechanical excavation of orthogneiss from Ikaria, Greece».**

STUDENT: **Patsidis Georgios**

SUPERVISOR: **Michalakopoulos Theodoros N., Assistant Professor, School of Mining and Metallurgical Engineering**

ACADEMIC YEAR: **2011-2012**

ABSTRACT

The subject of this thesis is the laboratory investigation on the mechanical excavation of orthogneiss from Ikaria, Greece. The thesis has been prepared at the Laboratory of Excavation Engineering of NTUA's School of Mining & Metallurgical Engineering.

Aim of the thesis is the laboratory estimation of:

- 1) the forces developing on the cutting tools during the cutting process.
- 2) the specific energy index of the rock mentioned above. Specific energy is the energy or work required to cut a unit volume of rock.
- 3) the basic mechanical properties of the rock, as they are determined from the following laboratory tests:
 - Uniaxial compression test.
 - Brazilian tensile strength test.
 - Hardness test, using the Shore scleroscope.
 - The Cerchar abrasiveness test.
 - Ultrasonic test.

Forces acting on rock cutting tools can also be predicted from i) theoretical models such as cutting theories which study fracture and cutting mechanisms, ii) empirical and semi-empirical equations derived from case studies.

The cutting forces are of major importance in designing rock excavation machines for a given advance-production rate or in predicting the performance of a given machine.

Laboratory cutting tests are performed in order to simulate tool-rock interaction. The optimum excavating parameters of the cutterhead (depth of penetration, cutter spacing etc.) are estimated through parametric analysis.

Basic criteria in the optimization process are the criterion of the lowest specific energy and that of the least wear of the cutting tool.

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας με μια ματιά	15
Πίνακας 3.1. Θεωρίες κοπής των πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου	31
Πίνακας 3.2. Σύμβολα και ορισμοί των παραμέτρων για κοπτικά τύπου δίσκου.	33
Πίνακας 3.3. Γενικός συμβολισμός των παραμέτρων για κοπτικά τύπου δίσκου.	34
Πίνακας 4.1. Παράμετροι της βραχομάζας και του μηχανήματος	54
Πίνακας 4.2. Κατηγορίες της ρωγμάτωσης και οι αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ των επιπέδων ασυνέχειας.....	55
Πίνακας 4.3. Μοντέλα πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής.....	64
Πίνακας 5.1. Πρώτο set μετρήσεων για τον υπολογισμό των $F_{N,cal}$ και $F_{R,cal}$	71
Πίνακας 5.2. Τέταρτο set μετρήσεων για τον υπολογισμό των $F_{N,cal}$ και $F_{S,cal}$	72
Πίνακας 5.3. Τιμές των $F_{N,cal}$ και $F_{R,cal}$ των 3 set μετρήσεων.....	72
Πίνακας 5.4. Τιμές των $F_{N,cal}$ και $F_{S,cal}$ των 4 set μετρήσεων.	72
Πίνακας 5.5. Τελικές τιμές των $F_{N,cal}$, $F_{R,cal}$, και $F_{S,cal}$	72
Πίνακας 5.6. Βάθη κοπής p , αποστάσεις s μεταξύ διαδοχικών κοπών και λόγοι s/p των εκτελεσμένων δοκιμών.	76
Πίνακας 5.7. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του δοκιμίου 01 (//).	84
Πίνακας 5.8. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του δοκιμίου 02 (\perp).	85
Πίνακας 5.9. Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δυνάμεων κοπής.	87
Πίνακας 5.10. Διαστάσεις, μάζα και πυκνότητα των δοκιμίων κοπής.	95
Πίνακας 5.11. Μάζα των δοκιμίων πριν και μετά από κάθε κοπή.	97
Πίνακας 5.12. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου.	98
Πίνακας 5.13. Δείκτης ειδικής ενέργειας κοπής SE (MJ/m^3) των ορθογενέσιων A και B.	98
Πίνακας 6.1. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	107
Πίνακας 6.2. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	107
Πίνακας 6.3. Ταξινόμηση των πετρωμάτων βάσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (κατά ISRM 1981).	107
Πίνακας 6.4. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης	111
Πίνακας 6.5. Αντοχή σε εφελκυσμό (BTS) των ορθογενέσιων A και B.	111
Πίνακας 6.6. Διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή Shore.	115
Πίνακας 6.7. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Shore.....	117
Πίνακας 6.8. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Shore του ορθογενέσιου A	118
Πίνακας 6.9. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Shore του ορθογενέσιου B	119
Πίνακας 6.10. Δείκτης αποξεστικότητας Cerchar (CAI) των ορθογενέσιων A και B.	123

Πίνακας 6.11. Ταξινόμηση του δείκτη αποξεστικότητα Cerchar (CAI).....	123
Πίνακας 6.12. CAI του δοκιμίου Iκ_A_05 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.	124
Πίνακας 6.13. CAI του δοκιμίου Iκ_A_05 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.	124
Πίνακας 6.14. CAI του δοκιμίου Iκ_A_08 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.	125
Πίνακας 6.15. CAI του δοκιμίου Iκ_A_08 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.	125
Πίνακας 6.16. CAI του δοκιμίου Iκ_B_01 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.	126
Πίνακας 6.17. CAI του δοκιμίου Iκ_B_01 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.	126
Πίνακας 6.18. CAI του δοκιμίου Iκ_B_11 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.	127
Πίνακας 6.19. CAI του δοκιμίου Iκ_B_11 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.	127
Πίνακας 6.20. Ταχύτητες διάδοσης του διαμήκου (V_p) και εγκάρσιου (V_s) κύματος.....	129
Πίνακας 6.21. Ταχύτητες διάδοσης P-κυμάτων και S-κυμάτων, για διάφορους τύπους πετρωμάτων με ύπαρξη ασυνεχειών και χωρίς ασυνέχειες	130
Πίνακας 6.22. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής υπερήχων.	133
Πίνακας 6.23. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής υπερήχων.	133
Πίνακας 8.1. Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα ορθογενέσιου Ικαρίας Α.....	143
Πίνακας 8.2. Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα ορθογενέσιου Ικαρίας Β.	144

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας	18
Σχήμα 2.2. Γεωλογικός χάρτης Ελλάδος σε κλίμακα 1:50000, φύλλο Ικαρία, έκδοση ΙΓΜΕ. ...	20
Σχήμα 2.3. Γεωλογική τομή.....	20
Σχήμα 2.4. Στρωματογραφική στήλη των γεωλογικών σχηματισμών της Ικαρίας.....	21
Σχήμα 2.5. Θέση δειγματοληψίας – Εκσκαφή άνω δεξαμενής (θέση Προεσπέρα).	24
Σχήμα 2.6. Δείγματα (blocks) ορθογνέσιου Ικαρίας Α και Β.....	24
Σχήμα 2.7. Δοκίμια ορθογνέσιου Ικαρίας Α και Β.....	25
Σχήμα 2.8. Μικροφωτογραφίες από οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός, με κάθετα πολαροειδή.	26
Σχήμα 2.9. Μικροφωτογραφίες, από οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός, με παράλληλα (γ) και κάθετα (δ) πολαροειδή.	27
Σχήμα 2.10. Μικροφωτογραφίες, από οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός, με παράλληλα (ϵ) και κάθετα ($\sigma\tau$) πολαροειδή και με το πλακίδιο της γύψου (ζ).....	28
Σχήμα 2.11. Υπολειμματικός μαγματικός ιστός (γραφικές συμφύσεις χαλαζία-αστρίων).	29
Σχήμα 3.1. Συμβολισμός σε κοπτικά τύπου δίσκου	34
Σχήμα 3.2. Γεωμετρία κοπής με κοπτικό δίσκου κατά τη θεωρία Roxborough and Phillips.....	35
Σχήμα 3.3. Δύναμη ώσης F_T σε συνθήκες στατικές και κύλισης	36
Σχήμα 3.4. Οι κύριες δυνάμεις F_T και F_R που δρουν στο δίσκο κατά την κοπή	37
Σχήμα 3.5. Γεωμετρία διείδυσης δίσκου κατά τη θεωρία Ozdemir et al.....	38
Σχήμα 3.6. Διάγραμμα δυνάμεων για τον υπολογισμό της δύναμης ώσης κατά τη θεωρία Ozdemir et al.....	39
Σχήμα 3.7. Διάγραμμα δυνάμεων για τον υπολογισμό της δύναμης κύλισης κατά τη θεωρία Ozdemir et al.....	40
Σχήμα 3.8. Μηχανισμός διείδυσης σφήνας και δημιουργίας θραυσμάτων κατά τη θεωρία Sanio	42
Σχήμα 3.9. Ανάπτυξη ακτινικών εφελκυστικών ρωγμών από το όρια της ζώνης σύνθλιψης προς το άρρηκτο πέτρωμα, κατά τη θεωρία Sanio	43
Σχήμα 3.10. Υπολογισμός δύναμης ώσης κατά τη θεωρία Sanio	44
Σχήμα 3.11. Υπολογισμός δύναμης κύλισης κατά τη θεωρία Sanio	45
Σχήμα 3.12. Ζώνη σύνθλιψης κάτω από κοπτικό δίσκο.....	46
Σχήμα 3.13. Απλοποιημένο πεδίο τάσεων (υδροστατικό) της ζώνης σύνθλιψης και δημιουργία θραυσμάτων	47
Σχήμα 3.14. Δημιουργία θραυσμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες.....	48
Σχήμα 3.15. Κατανομή πιέσεων κατά μήκος της περιφέρειας κοπτικού δίσκου	50
Σχήμα 4.1. Βαθμοί ρωγμάτωσης για διάφορα πετρώματα	55

Σχήμα 4.2. Διακύμανση του δείκτη DRI για διάφορα πετρώματα	56
Σχήμα 4.3. Διακύμανση του δείκτη CLI για διάφορα πετρώματα	56
Σχήμα 4.4. Συνιστώμενη μέγιστη μέση ώση ανά κοπτικό δίσκο	57
Σχήμα 4.5. Ταχύτητα περιστροφής (rpm) της κοπτικής κεφαλής	57
Σχήμα 4.6. Αριθμός των κοπτικών δίσκων της κοπτικής κεφαλής	58
Σχήμα 4.7. Εγκατεστημένη ισχύς της κοπτικής κεφαλής	58
Σχήμα 4.8. Συντελεστής ρωγμάτωσης (k_s) και συντελεστής διόρθωσης για $DRI \neq 49$	60
Σχήμα 4.9. Βάθος κοπής ανά περιστροφή. $d_c=483\text{mm}$ και $a_c=70\text{mm}$	61
Σχήμα 4.10. Συντελεστής διόρθωσης της διαμέτρου του κοπτικού για $d_c \neq 483\text{mm}$	62
Σχήμα 4.11. Συντελεστής διόρθωσης της απόστασης μεταξύ των κοπτικών για $a_c \neq 70\text{mm}$	62
Σχήμα 4.12. Σταθερά c_c	63
Σχήμα 5.1. Μηχανή δοκιμής κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.	68
Σχήμα 5.2. Μανόμετρο (Ekerman) που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του δυναμόμετρου.	68
Σχήμα 5.3. Βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_R του δυναμόμετρου	69
Σχήμα 5.4. α) Τοποθέτηση του εμβόλου για τη βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_R	69
Σχήμα 5.4. β) Έλεγχος της σωστής τοποθέτησης του εμβόλου με χρήση νήματος της στάθμης.	69
Σχήμα 5.5. Βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_S του δυναμόμετρου	70
Σχήμα 5.6. Τοποθέτηση του εμβόλου για τη βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_S	70
Σχήμα 5.7. Ανάλυση της ασκούμενης δύναμης F_{RAM} του εμβόλου.	71
Σχήμα 5.8. Το δοκίμιο 01 (//) α) πριν και β) μετά τη διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειάς του.	73
Σχήμα 5.9. Το δοκίμιο 01 (//) και το δοκίμιο 02 (\perp) μετά τη διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειάς τους.	73
Σχήμα 5.10. Το δοκίμιο 01 (//) και το δοκίμιο 02 (\perp) μετά την εκτέλεση της πρώτης κοπής σε βάθος 3 mm.	74
Σχήμα 5.11. Επίδραση της απόστασης (s) μεταξύ διαδοχικών κοπών στην ειδική ενέργεια κοπής.	77
Σχήμα 5.12. Δοκίμιο 01 (//) – $p=2\text{mm}$	78
Σχήμα 5.13. Δοκίμιο 02 (\perp) – $p=2\text{mm}$	78
Σχήμα 5.14. Δοκίμιο 01 (//) – $p=3\text{mm}$	79
Σχήμα 5.15. Δοκίμιο 02 (\perp) – $p=3\text{mm}$	79
Σχήμα 5.16. Δοκίμιο 01 (//) – $p=5\text{mm}$	80
Σχήμα 5.17. Δοκίμιο 02 (\perp) – $p=5\text{mm}$	80

Σχήμα 5.18. Δοκίμιο 01 (/) – $p=2\text{mm}$	81
Σχήμα 5.19. Δοκίμιο 02 (\perp) – $p=2\text{mm}$	81
Σχήμα 5.20. Διάγραμμα δυνάμεων κοπής (F_R , F_N , και F_S) συναρτήσει του χρόνου.....	82
Σχήμα 5.21. Διάγραμμα δυνάμεων κοπής (F_R , F_N , και F_S) συναρτήσει της μετατόπισης.....	82
Σχήμα 5.22. Διάγραμμα δύναμης κύλισης F_R – μετατόπισης, που αντιστοιχεί στο μήκος κοπής του πετρώματος.....	83
Σχήμα 5.23. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-βάθους κοπής.	86
Σχήμα 5.24. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-s/p για βάθος κοπής $p=2\text{mm}$	86
Σχήμα 5.25. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-s/p για βάθος κοπής $p=3\text{mm}$	86
Σχήμα 5.26. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-s/p για βάθος κοπής $p=5\text{mm}$	87
Σχήμα 5.27. Η σχέση μεταξύ της ειδικής ενέργειας κοπής SE1, που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας (με κοπτικό συρόμενου τύπου), χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών (unrelieved cuts) σε βάθος 5mm και της ειδικής ενέργειας κοπής SE3, που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής πλήρους κλίμακας (με κοπτικό τύπου δίσκου), με αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών (relieved cuts) σε βάθος 9mm.	88
Σχήμα 5.28. Προδιαγραφές της εργαστηριακής δοκιμής κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου, για τον υπολογισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας κοπής κατά Mc Feat-Smith.....	90
Σχήμα 5.29. Βασικά μέρη ταχυπλάνης	91
Σχήμα 5.30. Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.....	92
Σχήμα 5.31. Εργαλειοφορείο ταχυπλάνης Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.	92
Σχήμα 5.32. Δυναμόμετρο Kistler 9257BA.....	93
Σχήμα 5.33. Διάγραμμα δυνάμεων κατά την κοπή συναρτήσει του χρόνου.	95
Σχήμα 5.34. Διάγραμμα ταχύτητας κοπτικού κατά την εκτέλεση των δοκιμών κοπής	96
Σχήμα 5.35. Έργο δύναμης κοπής.	97
Σχήμα 6.1. Ψαθυρή θραύση πετρώματος κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	99
Σχήμα 6.2. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	100
Σχήμα 6.3. Επικόλληση των μετρητών παραμορφώσεων	101
Σχήμα 6.4. Παραμόρφωση κυλινδρικού δοκιμίου σε θλίψη	103
Σχήμα 6.5. Πλήρες διάγραμμα τάσης-παραμορφώσεων	104
Σχήμα 6.6. Σχετικές μεταβολές στη δομή του δοκιμίου.....	104
Σχήμα 6.7. Γραφικός προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας	106
Σχήμα 6.8. Δακτύλιος προσαρμογής του δοκιμίου για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.....	109
Σχήμα 6.9. Μεταβολή της εφελκυστικής (σ_θ) και της θλιπτικής (σ_r) τάσης κατά μήκος της διαμέτρου Y-Y' για φόρτιση υπό γωνία $2\theta = 9.5^\circ$	110
Σχήμα 6.10. Πειραματική συσκευή Shore (D model), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της δοκιμής.....	113
Σχήμα 6.11. Βαθμονομημένη κλίμακα σκληροσκοπίου Shore (D model).....	114

Σχήμα 6.12. Τομή του αδαμάντινου άκρου του σκληροσκοπίου Shore.....	114
Σχήμα 6.13. Πειραματική συσκευή «West»	120
Σχήμα 6.14. Πειραματική συσκευή «West» για τον προσδιορισμό του δείκτη αποξεστικότητα Cerchar.....	121
Σχήμα 6.15. Μορφή της ακίδας πριν (α) και μετά τη χρήση της (β).	122
Σχήμα 6.16. Κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος .	128
Σχήμα 6.17. Ταχύτητες διάδοσης του διαμήκους θλιπτικού κύματος και του εγκάρσιου κύματος εντός διαφόρων πετρωμάτων και εδαφών	129
Σχήμα 6.18. Εργαστηριακή συσκευή PUNDIT	131
Σχήμα 6.19. Μηδενισμός της συσκευής PUNDIT	132
Σχήμα 7.1. Διάγραμμα ροής για τη διαστασιολόγηση TBM και την πρόβλεψη του ρυθμού προχώρησης.	135
Σχήμα 7.2. Συντελεστής κοπής CC(%) συναρτήσει του βάθους κοπής p για το δοκίμιο 01 (//).	138
Σχήμα 7.3. Συντελεστής κοπής CC(%) συναρτήσει του βάθους κοπής p για το δοκίμιο 02 (⊥).	138
Σχήμα 7.4. Διάγραμμα ειδικής ενέργειας κοπής-βάθους κοπής για το δοκίμιο 01 (//).	140
Σχήμα 7.5. Διάγραμμα ειδικής ενέργειας κοπής-βάθους κοπής για το δοκίμιο 02 (⊥).....	140
Σχήμα Π1. Διευθύνσεις δυνάμεων στο κοπτικό.	167

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ορθογνεύσιου Ικαρίας με μηχανικά μέσα.

Η εξορυξιμότητα ενός πετρώματος, δηλαδή η ευκολία ή η δυσκολία που παρουσιάζει το πέτρωμα στην εξόρυξη του εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αυτές οι παράμετροι, για εξόρυξη πετρώματος με μηχανή ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine-TBM).

Οι δυνάμεις κοπής που ασκούνται στα κοπτικά αποτελούν καθοριστικό παράγοντα τόσο για την εκτίμηση της λειτουργικής ικανότητας και επίδοσης του μηχανήματος, όσο και για τη διαστασιολόγηση του για επιθυμητό μέγεθος προχώρησης-παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, οι κάθετες δυνάμεις παρέχουν την απαιτούμενη ώση, ώστε τα κοπτικά δίσκου του μηχανήματος να παραμένουν στο επιθυμητό βάθος κοπής και οι δυνάμεις κύλισης καθορίζουν την απαιτούμενη ροπή στρέψης και ισχύ του μηχανήματος, ώστε να περιστρέφεται η κοπτική κεφαλή διατηρώντας τα κοπτικά της στο ορισμένο βάθος κοπής.

Η ειδική ενέργεια κοπής του πετρώματος ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος σε MJ/m³. Εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (αντοχή σε θλίψη-εφελκυσμό), τις ασυνέχειές του, τον τύπο των κοπτικών και τις παραμέτρους κοπής (βάθος κοπής και διάταξη των κοπτικών).

Η φθορά των κοπτικών εργαλείων και επομένως ο χρόνος αντικατάστασής τους, εξαρτάται κυρίως από την ορυκτολογική συγκρότηση του πετρώματος. Πέτρωμα με υψηλή αποξεστικότητα, που προκαλεί μεγάλη φθορά στα κοπτικά, απαιτεί συχνή αντικατάστασή τους με ανεπιθύμητα αποτέλεσμα στον προγραμματισμό και τα οικονομικά του έργου.

Η πρόβλεψη της επίδοσης ενός TBM σε δεδομένο γεωλογικό σχηματισμό είναι ένας από τους κύριους παράγοντες στον υπολογισμό των οικονομικών του έργου. Για το λόγο αυτό, είναι επιθυμητή η πρόβλεψη της επίδοσης του TBM με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την επίδοση των μηχανημάτων είναι οι μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και της βραχομάζας, η εισροή νερού, η διάμετρος, η ισχύς, η ροπή στρέψης και η δύναμη ώσης του μηχανήματος, η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ο τύπος και οι διαστάσεις των κοπτικών και η μεταξύ τους απόσταση.

1.2. Οργάνωση της εργασίας

Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας, το οποίο υλοποιείται σήμερα στη χώρα μας, αποτελεί ένα έργο, το οποίο θα παράγει καθαρή (οικολογική) ενέργεια που θα επιλύσει αξιόπιστα τις ενεργειακές ανάγκες της Ικαρίας. Η κατασκευή του έργου προβλέπει μεταξύ άλλων, την εγκατάσταση υπόγειων αγωγών προσαγωγής και κατάθλιψης του νερού μήκους 5.5 km. Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα εγκατάστασης των υπόγειων αγωγών χωρίς την εκσκαφή τάφρου, με διάνοιξη μικροσηράγγων με χρήση Micro TBM.

Για το λόγο αυτό ελήφθησαν δείγματα πετρώματος (ορθογνεύσιου) από την εκσκαφή της άνω δεξαμενής του έργου και εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές, από τις οποίες προσδιορίστηκαν:

- 1) οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος.
- 2) οι δυνάμεις που αναπτύσσονται τόσο με κοπτικό τύπου δίσκου όσο και συρόμενου τύπου κατά τη διάρκεια των δοκιμών κοπής του πετρώματος.
- 3) ο δείκτης ειδικής ενέργειας κοπής του πετρώματος, ο οποίος ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος.
- 4) ο βέλτιστος λόγος s/p (απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών/βάθος κοπής), για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής (από τις δοκιμές κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου).

Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων διαστασιολογήθηκε ένα Micro TBM για τη διάνοιξη μικροσήραγγας κυκλικής διατομής, με εξωτερική διάμετρο Φ900, σε ορθογνεύσιο Ικαρίας. Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε η απαιτούμενη δύναμη ώσης, η ροπή στρέψης, η ισχύς και ο στιγμιαίος ρυθμός κοπής του μηχανήματος.

1.3. Περιεχόμενο της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια και πέντε παραρτήματα.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται η γεωλογία της Ικαρίας, το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας, η προέλευση των δειγμάτων του πετρώματος και η μικροσκοπική μελέτη του.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι σημαντικότερες θεωρίες κοπής των πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στα μοντέλα εκτίμησης της επίδοσης των TBM. Από τα εμπειρικά μοντέλα αναπτύσσεται το NTH και από τα ημιεμπειρικά το CSM.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τον εργαστηριακό προσδιορισμό των χαρακτηριστικών κοπής του πετρώματος, με την εκτέλεση σχετικών δοκιμών σε ορθογώνιο Ικαρίας. Περιγράφεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται και η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Στις δοκιμές κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο κοπτικό, η ειδική ενέργεια κοπής (SE), ο συντελεστής κοπής (CC) και ο βέλτιστος λόγος s/p (απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών/βάθος κοπής) για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια. Στις δοκιμές κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο κοπτικό και η ειδική ενέργεια κοπής.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τον εργαστηριακό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος, όπως αυτές προσδιορίζονται από τις εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, αντιδιαμετρικής θλίψης, σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore, αποξεστικότητα κατά Cerchar και υπερήχων.

Στο έβδομο κεφάλαιο δίνεται ο ορισμός του microtunnelling και διαστασιολογείται ένα Micro TBM για τη διάνοιξη μικροσήραγγας σε ορθογώνιο Ικαρίας.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία.

Τέλος, τα παραρτήματα περιλαμβάνουν τα διαγράμματα των δοκιμών κοπής και της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, φωτογραφίες των δοκιμών της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης και φωτογραφίες μικροσκοπίου των ακίδων της δοκιμής αποξεστικότητας Cerchar.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΤΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΕΡΓΟ ΙΚΑΡΙΑΣ

2.1. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας

Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας, το οποίο υλοποιείται σήμερα στη χώρα μας, αποτελεί ένα καινοτόμο, πρωτοποριακό αναπτυξιακό έργο, σε τοπικό και ευρωπαϊκό επίπεδο, το οποίο θα παράγει καθαρή (οικολογική) ενέργεια που θα επιλύσει αξιόπιστα (χωρίς διακοπές και πτώσεις τάσης) τις ενεργειακές ανάγκες της Ικαρίας για τις επόμενες δεκαετίες. Η κατασκευή του άρχισε το Μάιο του 2009 από την ανάδοχο εταιρεία ENET Α.Ε.

Βασίζεται στο συνδυασμό δύο διαφορετικών μορφών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ):

- την αιολική ενέργεια
- την υδροηλεκτρική ενέργεια

Ο καινοτόμος συνδυασμός των δύο αυτών φυσικών πόρων, δίνει μια αξιόπιστη απάντηση στο πολύ σημαντικό ζήτημα της αποθήκευσης και ελεγχόμενης διανομής της παραγόμενης ενέργειας. Έτσι, το έτος ολοκλήρωσης του έργου, η ενεργειακή αυτονομία της Ικαρίας θα είναι βασισμένη σε μεγάλο βαθμό στη δύναμη της φύσης. Επίσης, η τεχνογνωσία που θα αποκτηθεί από το έργο αυτό θα μπορεί να εφαρμοσθεί και σε άλλα ελληνικά νησιά που έχουν ανάλογες προϋποθέσεις.

Πίνακας 2.1. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας με μια ματιά (ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.)

Συνολική Επένδυση	€ 23 εκατ.
Επένδυση για την αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου ΔΕΗ και για ανάπτυξη νέου δικτύου μεταφοράς	€ 3 εκατ.
Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας (ΜΥΗΣ Προεσπέρας & Κάτω Προεσπέρας, Αιολικό Πάρκο Στραβοκουντούρας)	15,11 GWh
Ετήσια Καθαρή Απόδοση Ηλεκτρικής Ενέργειας	10,96 GWh
Εργολάβος - Κατασκευαστής	ENET Α.Ε.
Σχεδιασμός – Μελέτη	ΔΑΥΕ - ΔΕΗ Α.Ε.
Επίβλεψη Κατασκευής	ΔΥΗΠ - ΔΕΗ Α.Ε.
Συγχρηματοδότηση	Ευρωπαϊκή Ένωση – Ελληνικό Δημόσιο

Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας αποτελείται από:

- Τον υπάρχοντα ταμιευτήρα στο Πέζι χωρητικότητας 900000 m^3 νερού.
- Δύο δεξαμενές αποταμίευσης νερού χωρητικότητας 80000 m^3 εκάστη, στην περιοχή της Προεσπέρας και Κάτω Προεσπέρας.
- Δύο Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς (ΜΥΗΣ) παραγωγής ενέργειας με υδροστροβίλους (συνολικής ισχύος $2 \times 1.55 \text{ MW} + 1.05 \text{ MW} = 4.15 \text{ MW}$) στις θέσεις Προεσπέρα και Κάτω Προεσπέρα.
- Αντλιοστάσιο ισχύος 2 MW για την ανύψωση του νερού από την κάτω στην επάνω δεξαμενή.
- Υπόγειους αγωγούς προσαγωγής και κατάθλιψης του νερού μήκους 5.5 km .
- Αιολικό Πάρκο (Α/Π) με τρεις Ανεμογεννήτριες του οίκου ENERCON συνολικής ισχύος $3 \times 900 \text{ kW} = 2.7 \text{ MW}$, στην περιοχή της «Στραβοκουντούρας» του Δήμου Ραχών, με μελλοντική τοποθέτηση άλλων 4 στη θέση Περδίκι, συνολικής ισχύος 1.8 MW .
- Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου (ΚΕ & ΚΦ) στον υπάρχοντα τοπικό σταθμό παραγωγής Αγίου Κηρύκου, ο οποίος θα αναβαθμισθεί.

Τα προαναφερθέντα επί μέρους στοιχεία του έργου συνδυάζονται μεταξύ τους για την παραγωγή και μερική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στα σχήματα 2.1.(α) και (β), ως εξής:

1. Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Ο ΜΥΗΣ Προεσπέρας, ισχύος 1.05 MW , εκμεταλλεύεται τις υπερχειλίσεις του υπάρχοντος ταμιευτήρα (θέση Πέζι) για την παραγωγή ενέργειας. Το νερό, εξερχόμενο από τον πρώτο ΜΥΗΣ γεμίζει την παρακείμενη άνω δεξαμενή. Στη συνέχεια, κατευθύνεται στον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, ισχύος 3.1 MW , όπου χρησιμοποιείται για την παραγωγή πρόσθετης ενέργειας και καταλήγει στη δεύτερη κατά σειρά, κάτω δεξαμενή.

2. Αιολική Ενέργεια

Το Αιολικό Πάρκο, συνολικής ισχύος 2.7 MW , παράγει ενέργεια η οποία διοχετεύεται ως εξής:

- στο Δίκτυο ηλεκτροδότησης
- στο Αντλιοστάσιο, όπου χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή και την εκ νέου παραγωγή ενέργειας από τον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας.

Η ετήσια καθαρή παραγωγή ενέργειας του Υβριδικού Ενεργειακού Έργου Ικαρίας φτάνει τις 10.96 GWh . Η ενέργεια αυτή επαρκεί για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των ενεργειακών αναγκών του νησιού για όλο το έτος, περιορίζοντας σημαντικά την ανάγκη λειτουργίας του θερμικού τοπικού σταθμού παραγωγής στον Άγιο Κήρυκο.

Η συνολική διαθέσιμη ισχύς κατά τους χειμερινούς μήνες, (Νοέμβριος-Μάρτιος), όπου υπάρχει περίσσεια νερού από την υπερχειλίση του φράγματος Πεζίου, ανάλογα και με τις ετήσιες βροχοπτώσεις, θα είναι $4.15 \text{ MW} + 2.7 \text{ MW} = 6.85 \text{ MW}$, η οποία θα υπερκαλύπτει τις ανάγκες της Ικαρίας. Έτσι ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται στον Άγιο Κήρυκο και καταναλώνει πετρέλαιο (μαζούτ) υψηλού θείου θα τίθεται σχεδόν σε ψυχρή εφεδρεία. Αυτό σημαίνει αφενός μεν μεγάλο περιβαλλοντικό όφελος για την περιοχή λόγω μη

εκπομπής βλαπτικών καυσαερίων (CO₂, SO₂, NO_x) και αφετέρου δε μεγάλο οικονομικό όφελος λόγω μη χρήσης πετρελαίου, η τιμή του οποίου έχει εκτιναχθεί στα ύψη με απρόβλεπτες μελλοντικές συνέπειες.

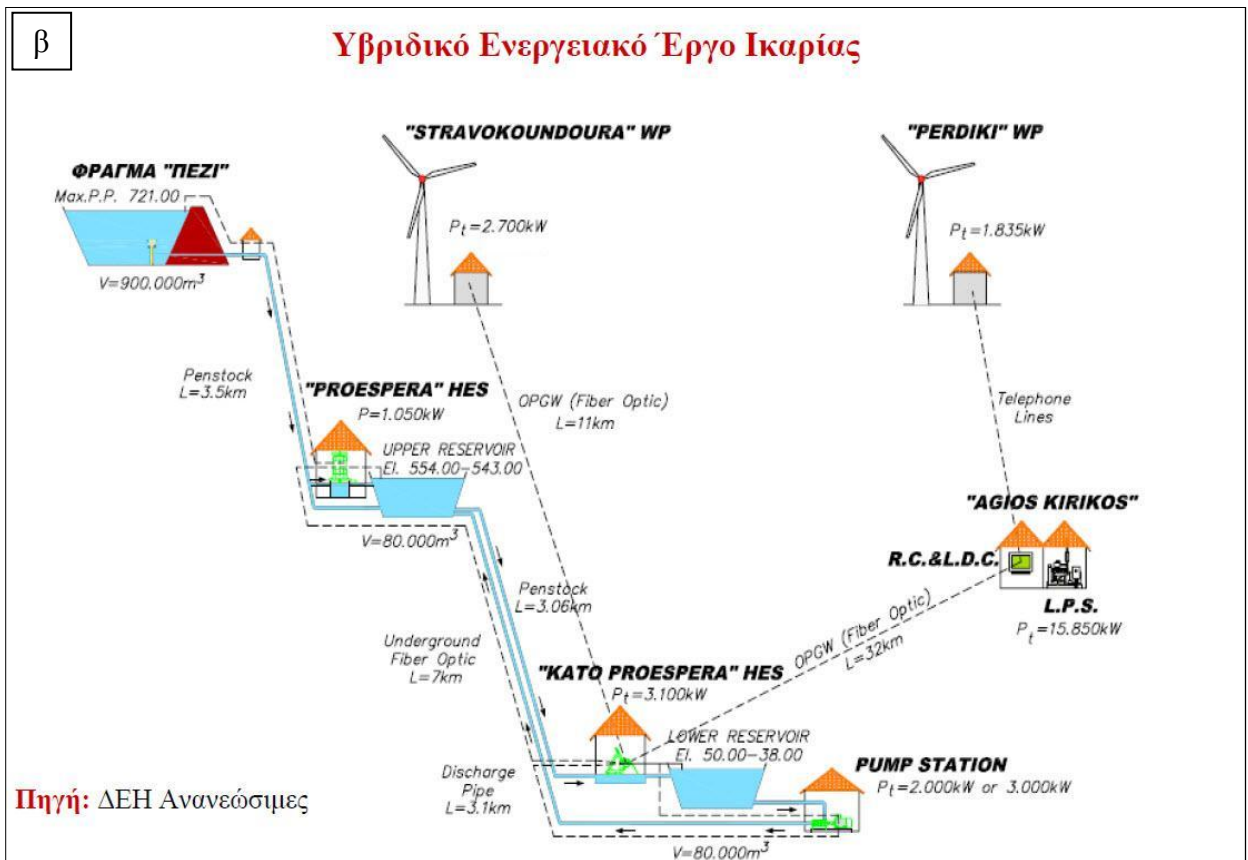
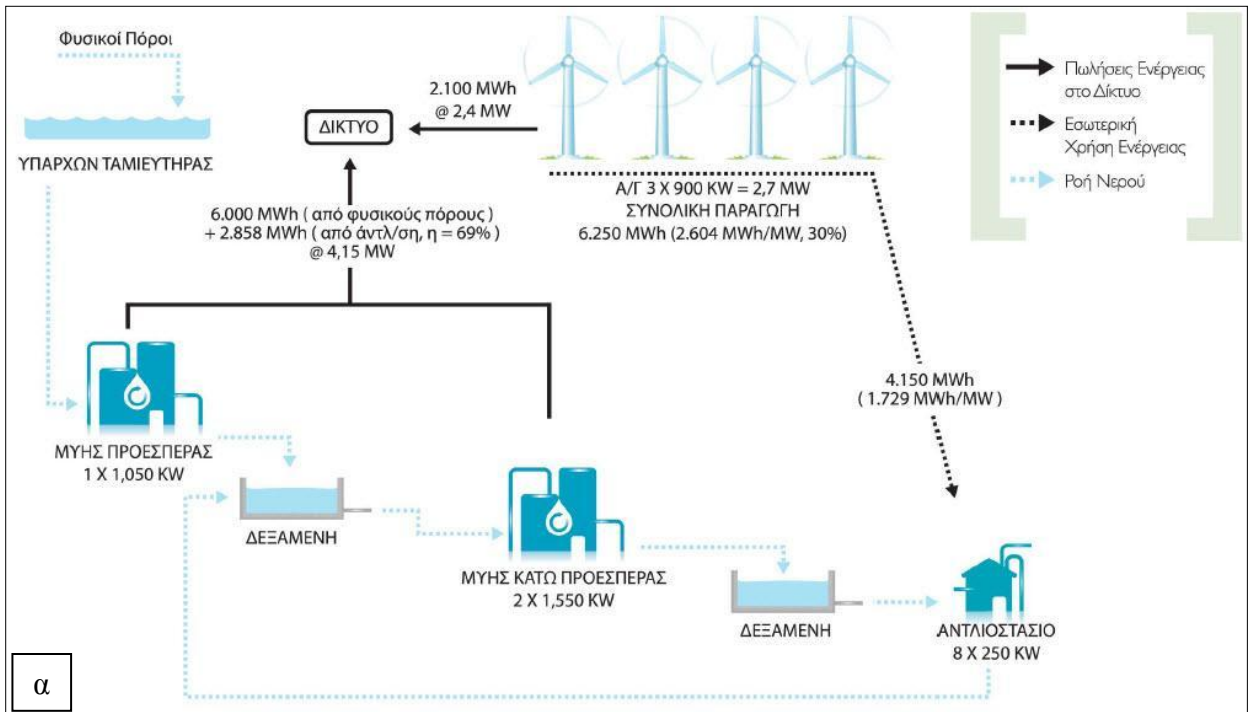
Τους υπόλοιπους μήνες (Απρίλιος-Οκτώβριος) όπου το νερό του φράγματος θα διατίθεται αποκλειστικά για ύδρευση και άρδευση της περιοχής, το νερό που βρίσκεται στην δεξαμενή της Κάτω Προεσπέρας, μετά τις μεταμεσονύκτιες ώρες όπου η ζήτηση ισχύος είναι χαμηλή, θα μεταφέρεται ανυψούμενο στην πάνω δεξαμενή με την λειτουργία του αντλιοστασίου, το οποίο θα χρησιμοποιεί την περίσσεια της ενέργειας του Αιολικού Πάρκου. Έτσι κατά τις ώρες αιχμής θα παράγεται ενέργεια μέσω των υδροστροβίλων με την πτώση του νερού στην κάτω δεξαμενή. Το έργο αυτό παρουσιάζει σημαντική πρωτοτυπία, διότι όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης της υδραυλικής ενέργειας στην πάνω δεξαμενή κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και η απόδοση αυτής κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης και έτσι επιτυγχάνεται αυξημένη συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα σε ποσοστό 60% έως 70% την παραπάνω περίοδο.

Επίσης ένα ακόμη σοβαρό όφελος για το νησί είναι ότι εξαιτίας της παραγόμενης επιπλέον ισχύος (6.8 MW) έχει μελετηθεί και θα κατασκευασθεί σύντομα από τη ΔΕΗ Α.Ε., η τροποποίηση και αναβάθμιση του αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου της Ικαρίας που τώρα είναι ασθενές, με εγκατάσταση νέας γραμμής μέσης τάσης (20 kV) μήκους περίπου 43 km, καθώς και η εγκατάσταση καλωδίου οπτικών ινών μήκους περίπου 50 km για την σύνδεση όλων των πηγών παραγωγής ενέργειας του νησιού με το Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου (ΚΕ & ΚΦ) που θα εγκατασταθεί στον τοπικό σταθμό παραγωγής Αγίου Κηρύκου, ο οποίος θα αναβαθμισθεί. Έτσι μέσω του Κέντρου Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου και με χρήση πρωτοποριακού λογισμικού συστήματος, θα παρακολουθούνται και θα συντονίζονται όλες οι πηγές ενέργειας του νησιού (υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αιολικά πάρκα, πετρελαϊκός σταθμός) ώστε με τους κατάλληλους χειρισμούς να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοσή τους, δηλαδή η μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης των υδροηλεκτρικών σταθμών και αιολικών πάρκων και η ελαχιστοποίηση της εκμετάλλευσης του πετρελαϊκού σταθμού. Το συνολικό κόστος για την αναβάθμιση του δικτύου είναι περίπου 3 εκατ. €. Το ποσό αυτό επιδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα “Ανταγωνιστικότητα” (ΕΠΑΝ) του Γ΄ ΚΠΣ σε ποσοστό έως 50%. (Μαλαχίας και Καρούτσος 2009)

Οφέλη του έργου στην κοινωνία

Τα οφέλη του έργου είναι πολλαπλά για την τοπική κοινωνία:

- Ενεργειακή επάρκεια του νησιού κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του έτους.
- Σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από την ελαχιστοποίηση της λειτουργίας του τοπικού θερμικού σταθμού.
- Αύξηση της απασχόλησης, μέσα από τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, οι οποίες θα καλυφθούν στην πλειονότητά τους από κατοίκους του νησιού.
- Βελτίωση υπαρχόντων και ανάπτυξη νέων τοπικών υποδομών (δίκτυο ηλεκτροδότησης και οδικό δίκτυο).
- Προβολή της Ικαρίας διεθνώς, καθώς θα καταστεί πόλος έλξης επιστημονικού τουρισμού.



Σχήμα 2.1. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας (ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.)

2.2. Γεωλογία της Ικαρίας

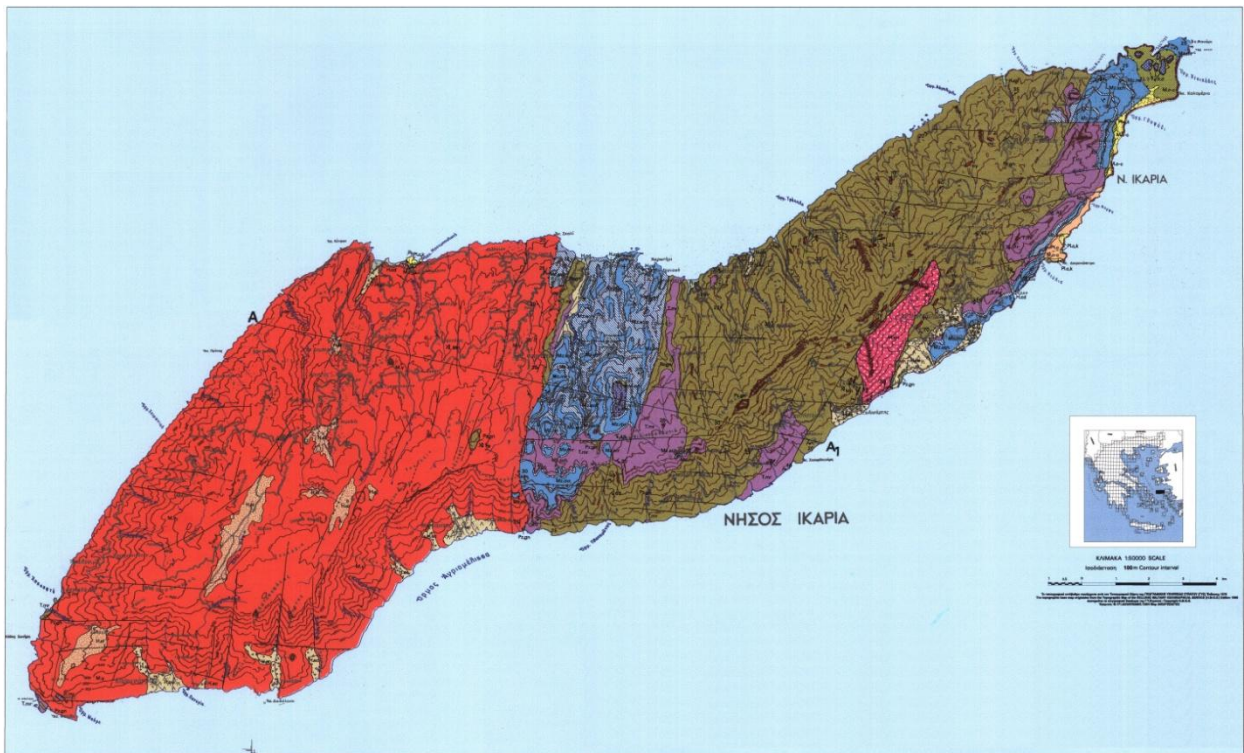
Σύμφωνα με τους Μαλαχία et al. (2003) η νήσος Ικαρία βρίσκεται στο κέντρο του Ανατολικού Αιγαίου και ανήκει στο νομό Σάμου. Έχει επίμηκες σχήμα με διεύθυνση ΑΒΑ/κή – ΔΝΔ/κή και αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία διασχίζονται από μειοκαινικούς γρανίτες.

Με βάση τα υπάρχοντα βιβλιογραφικά γεωλογικά δεδομένα, όπως επίσης και με αυτά που προέκυψαν από την πρόσφατη γεωλογική χαρτογράφηση (γεωλογικός χάρτης Ελλάδος σε κλίμακα 1:50000, φύλλο Ικαρία, έκδοση ΙΓΜΕ, αποσπάσματα του οποίου δίνονται στα σχήματα 2.2, 2.3 και 2.4), η νήσος Ικαρία δομείται από:

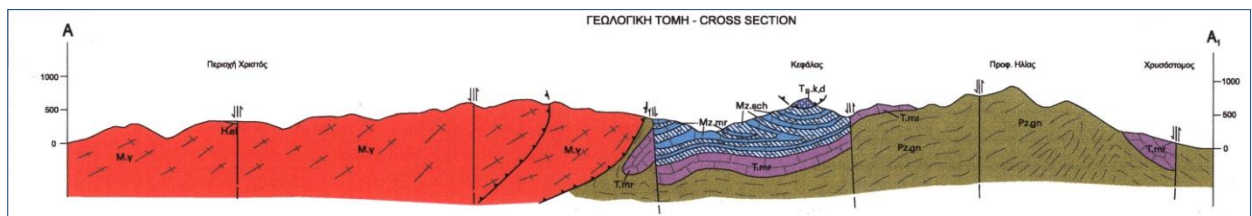
α) Την κατώτερη ενότητα που συνίσταται από ένα γνευσιακό υπόβαθρο αποτελούμενο από ορθογνεύσιους και παραγνεύσιους επί του οποίου αναπτύσσεται σχηματισμός μαρμάρων-σχιστολίθων. Μέσα στα μεταμορφωμένα αυτά πετρώματα έχουν διεισδύσει οι γρανίτες των Ραχών στα δυτικά και του Ξυλοσύρτη στα ανατολικά.

β) Την ανώτερη τεκτονική ενότητα η οποία αποτελείται από μολασσικούς οφιολιθικούς σχηματισμούς (ηφαιστειο-ιζηματογενή οφιολιθικά ολισθοστρώματα) συμπαρασύροντας ανακρυσταλλωμένους λευκόχρους ασβεστολίθους, όπως αυτούς που εμφανίζονται στο ύψωμα Κεφάλια (κεντρικό τμήμα του νησιού). Οι σχηματισμοί αυτοί της Ικαρίας βρίσκονται επωθημένοι επί των μαρμαροσχιστολιθικών σχηματισμών της κατώτερης ενότητας, όπως στην περιοχή της Κεφάλιας. Νεότεροι σχηματισμοί (νεογενούς ηλικίας κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ψαμμούχες μάργες και μάργες με κροκαλολατυποπαγείς αναβαθμίδες του Τεταρτογενούς τοπικά) συμπληρώνουν τη γεωλογική εικόνα του νησιού.

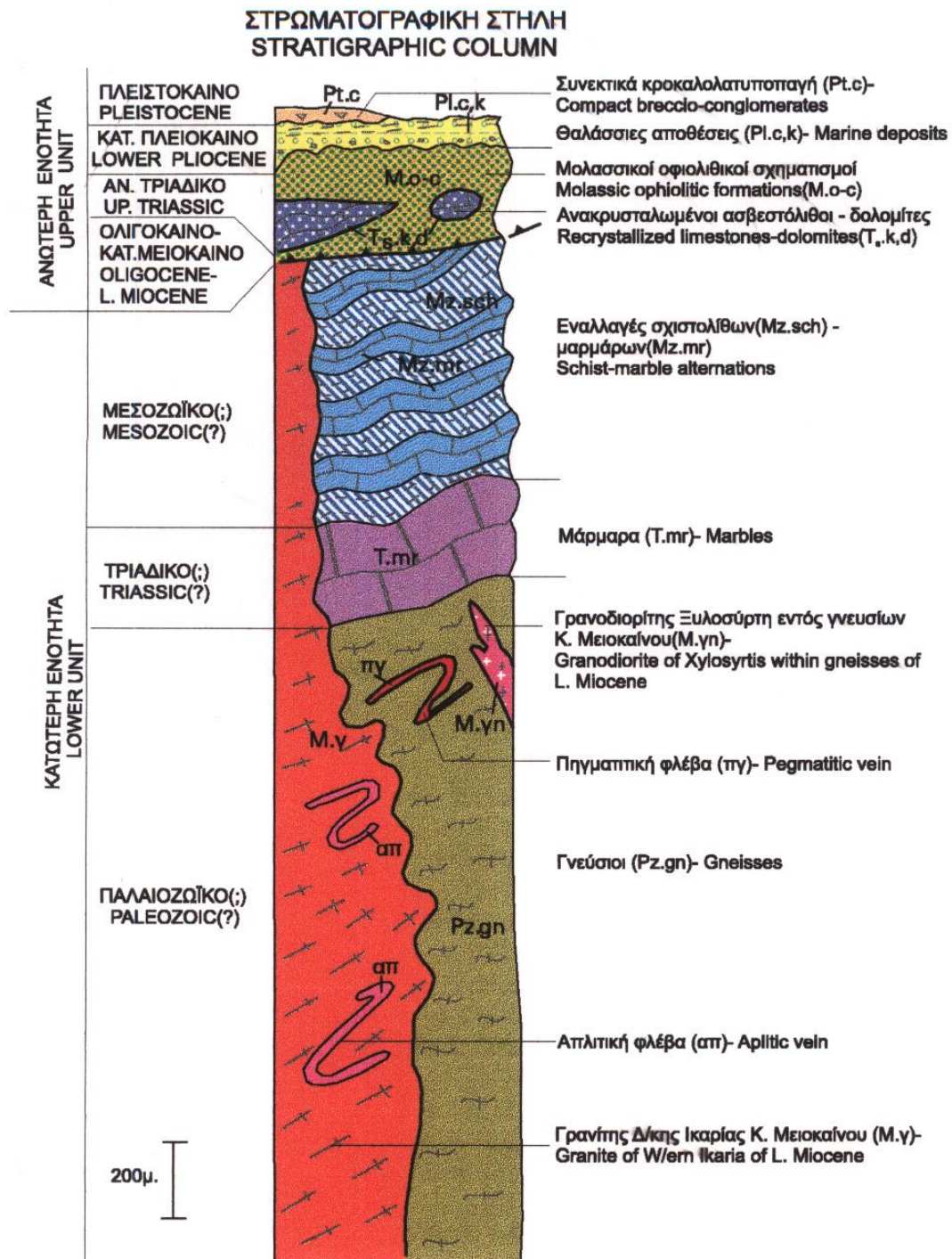
Η περιοχή υλοποίησης (δήμος Ραχών) του Υβριδικού Ενεργειακού Έργου Ικαρίας βρίσκεται στο δυτικό τμήμα του νησιού, το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από γρανιτογνεύσιους και γρανίτες που καλύπτουν περίπου τη μισή έκταση του νησιού.



Σχήμα 2.2. Γεωλογικός χάρτης Ελλάδος σε κλίμακα 1:50000, φύλλο Ικαρία, έκδοση ΙΓΜΕ.



Σχήμα 2.3. Γεωλογική τομή (ΙΓΜΕ).



Σχήμα 2.4. Στρωματογραφική στήλη των γεωλογικών σχηματισμών της Ικαρίας (IGME).

Γρανίτης Δυτικής Ικαρίας

Όπως προαναφέρθηκε, ο γρανίτης δυτικής Ικαρίας ηλικίας Κατώτερου Μειοκαίνου καταλαμβάνει το δυτικό ήμισυ του νησιού και αποτελεί το μεγαλύτερο πλουτώνιο σώμα του Αιγαίου. Ο κατακλαστικός λευκογρανίτης της Ικαρίας εντάσσεται σύμφωνα με τον Altherr στους I-τύπου γρανίτες, ασβεσταλκαλικής σύστασης και ανήκει στους K-ούχους πλουτωνίτες του μειοκαινικού μαγματικού τόξου (με παράλληλη διεύθυνση προς την ελληνική τάφρο).

Η διείσδυση του γρανίτη εντός των γνευσίων και μαρμάρων της κατώτερης ενότητας παρατηρείται στο ΝΔ/κό άκρο του νησιού καθώς και στις ανατολικές εμφανίσεις του γρανίτη. Στην ανατολική πλευρά του νησιού, η επαφή του γρανίτη με την κατώτερη ενότητα είναι τεκτονική και συνοδεύεται από διάφορα παραμορφωτικά συνοδά φαινόμενα, μακροσκοπικά ορατά. Τα φαινόμενα αυτά είναι η ανάπτυξη οφθαλμώδους ιστού ανάμεσα στα S-C επίπεδα σχιστότητας με ταυτόχρονη περιστροφή των πορφυροκλαστών (άστριοι) προς τα BBA/κά και η πτύχωση των συνοδών απλιτικών φλεβών με αξονικά επίπεδα BBA/κής διεύθυνσης (περιοχές Πηγής και Φραντάτου). Τα αξονικά επίπεδα είναι παράλληλα με αυτά της φύλλωσης με ΝΔ/κή βύθιση και με την τεκτονική επαφή γρανίτη-μεταμορφωμένων πετρωμάτων της κατώτερης ενότητας. Η παραμόρφωση και του γρανίτη συντέλεσε στη μυλωνιτίωσή του με αποτέλεσμα τα μακροσκοπικά του χαρακτηριστικά να διαφέρουν από θέση σε θέση: στις νότιες πλευρές παρουσιάζει τη χαρακτηριστική γρανιτική λεπτο-μεσοκοκκώδη υφή, στα ανατολικά του όρια γίνεται μικρο-λεπτοκοκκώδης, έντονα μυλωνιτωμένος έως οφθαλμώδης-σχιστώδης, ενώ τέλος στα δυτικά, κεντρικά και βόρεια τμήματα εμφανίζει γνευσιακή έως οφθαλμώδη υφή με σαφή προσανατολισμό των αστρίων και των φυλλοπυριτικών ορυκτών (περιοχή Αρμενιστή).

Ο διαμελισμός του γρανιτικού ορεινού όγκου κατά τη θραυστιγενή-ρηξιγενή κατάσταση του, κυρίως κατά την BBA/κή και BBA/κή διεύθυνση, δεν εκδηλώνεται με την ίδια ένταση καθ' όλη την έκτασή του, συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στη δημιουργία τεκτονικών κεράτων με επιφανειακές-πεδογενετικές εξαλλοιώσεις στις περιοχές Καλάμου και Πέζι Ραχών-Γιαλισκάρι, όπως επίσης μεγάλων απόκρημνων βεράθρων (ρέμα Χάλαρη, Αρμενιστή).

Πετρογραφικά συνίσταται από αδροκοκκώδεις πορφυροκλάστες K-ούχων αστρίων με φαινόμενα περθιτίωσης και μυρμηκιτικών αποφύσεων στην επαφή τους, αλλοτριόμορφο χαλαζία με κυματοειδή κατάσβεση, υπιδιόμορφα όξινα πλαγιόκλαστα, φυλλάρια βιοτίτη με εγκλείσματα ζirkονίου και απατίτη, καθώς επίσης και μοσχοβίτη.

2.3. Προέλευση των δειγμάτων πετρώματος

Η θέση της δειγματοληψίας είναι η περιοχή της εκσκαφής της άνω δεξαμενής στη θέση Προεσπέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Τα δείγματα (blocks) των ορθογνεύσιων απεικονίζονται στο σχήμα 2.6.

Επειδή οι ορθογνεύσιμοι διαφοροποιούνται ως προς το βαθμό μεταμόρφωσης τους, με αποτέλεσμα τα μακροσκοπικά τους χαρακτηριστικά να διαφέρουν, διακρίνονται, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σε ορθογνεύσιο Ικαρίας Α και Β.

Ορθογνεύσιο Ικαρίας Α

Ορυκτολογική Σύσταση (από μικροσκοπική μελέτη):

Χαλαζία, Άστριοι, Βιοτίτης, Μοσχοβίτης.

Ιστός (από μικροσκοπική μελέτη):

Έντονα παραμορφωμένο πέτρωμα, στο οποίο κυριαρχούν οι επιφάνειες της σχιστότητας (S-τεκτονίτης). Η σχιστότητα διαμορφώνεται από τον προσανατολισμό των μαρμαρυγιών (βιοτίτη, μοσχοβίτη) και ταινιών ανακρυσταλλωμένου χαλαζία και αναστομώνεται γύρω από πορφυροκλάστες αστρίων και συσσωματωμάτων ανακρυσταλλωμένου χαλαζία. Κατά θέσεις, διατηρείται ο υπολειμματικός μαγματικός ιστός (γραφικές συμφύσεις χαλαζία-αστρίων).

Ορθογνεύσιο Ικαρίας Β

Ορυκτολογική Σύσταση:

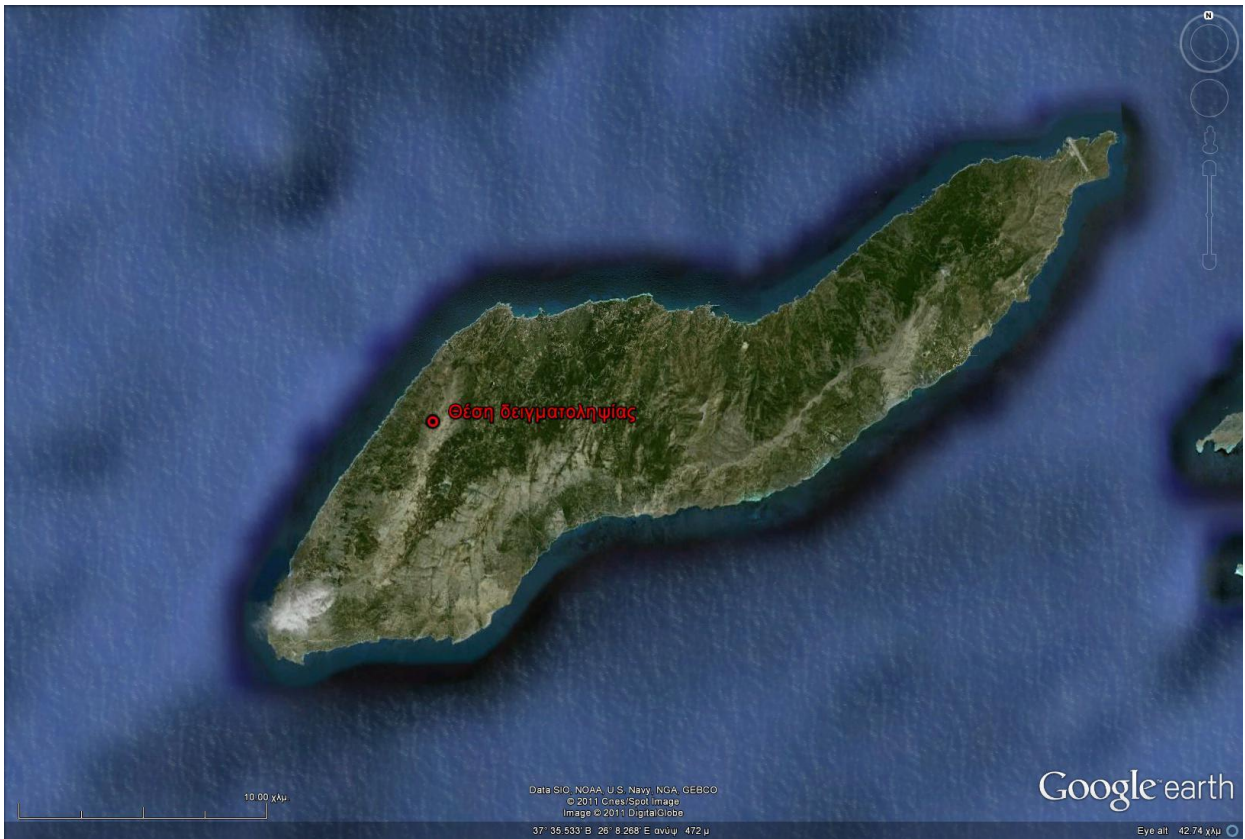
Από μακροσκοπική αναγνώριση είναι παρεμφερής με αυτή του ορθογνεύσιου Α:

Χαλαζία, Άστριοι, Μαρμαρυγίες.

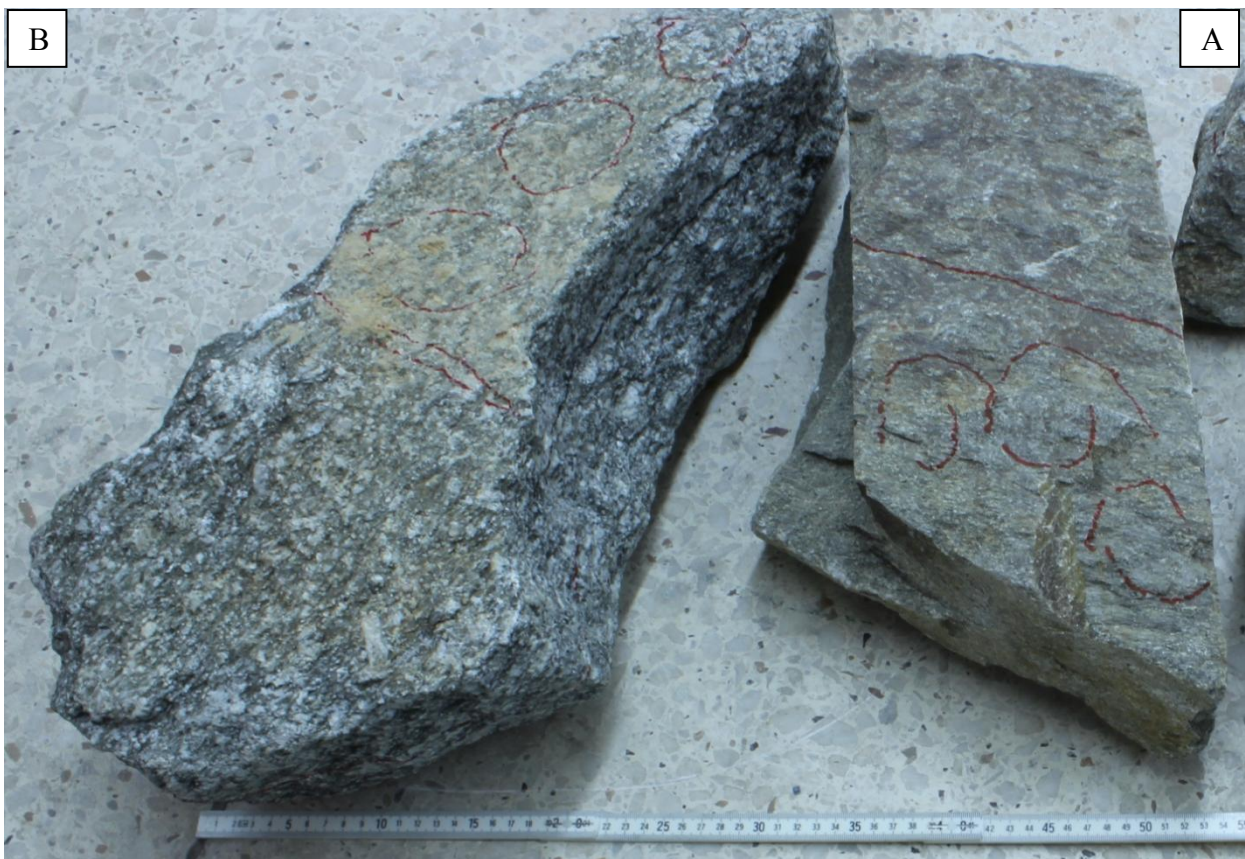
Ο ιστός του είναι οφθαλμώδης και διακρίνονται μακροσκοπικά οι σαφώς προσανατολισμένοι οφθαλμοί αστρίων.

Ο βαθμός παραμόρφωσης του είναι μικρότερος από του ορθογνεύσιου Α, καθώς παρατηρείται ότι διατηρείται καλύτερα ο γρανιτικός ιστός και είναι πιο αδρόκοκκος.

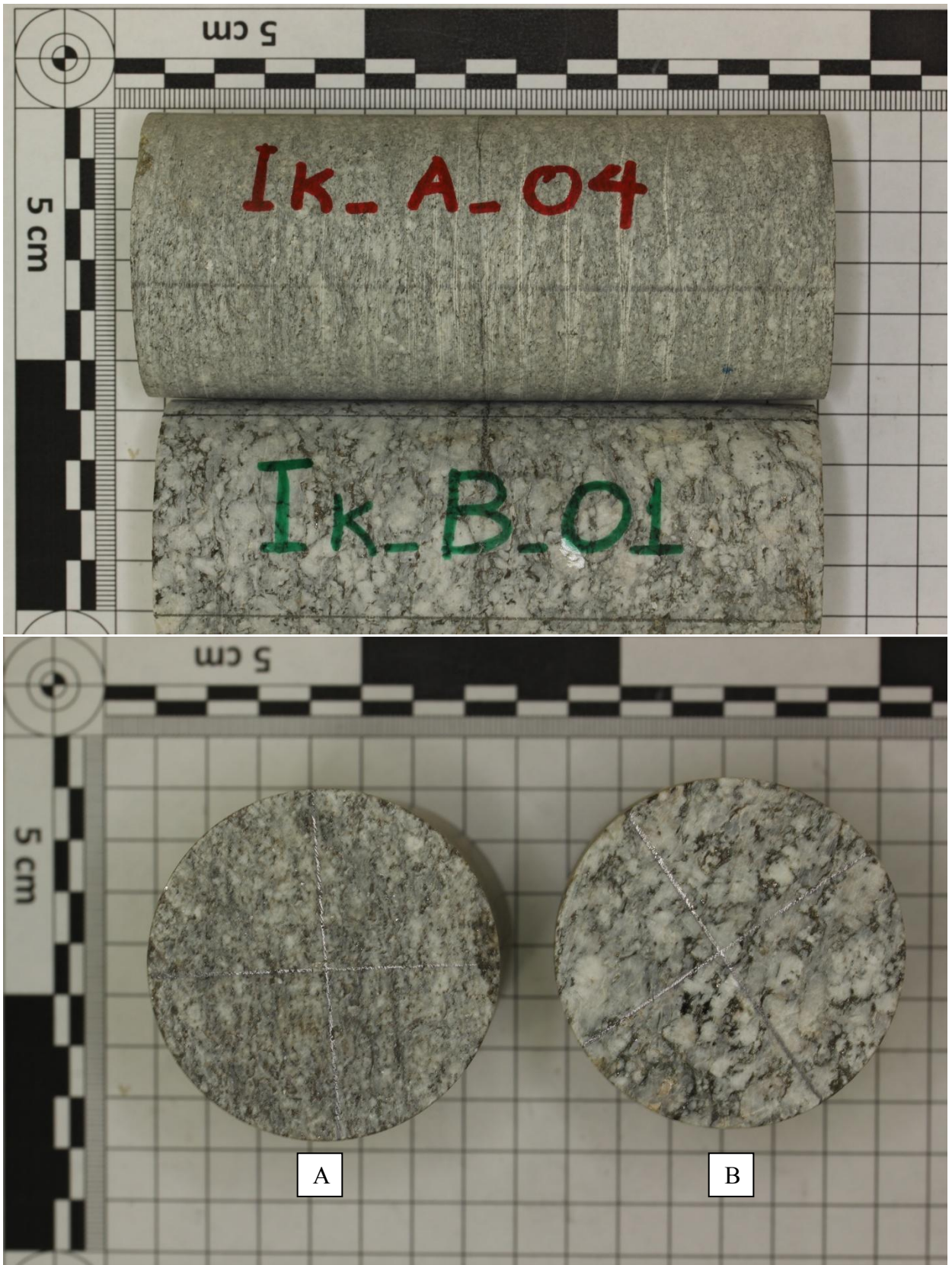
Η διαφοροποίηση των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών των δύο ορθογνεύσιων είναι εμφανής στα δοκίμια του σχήματος 2.7.



Σχήμα 2.5. Θέση δειγματοληψίας – Εκσκαφή άνω δεξαμενής (θέση Προεσπέρα).



Σχήμα 2.6. Δείγματα (blocks) ορθογνεύσιου Ικαρίας A και B.

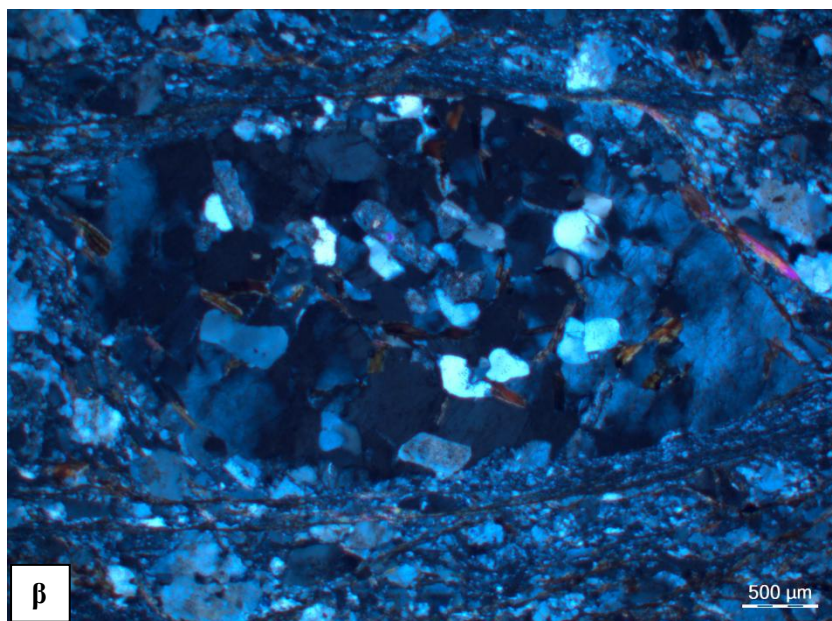
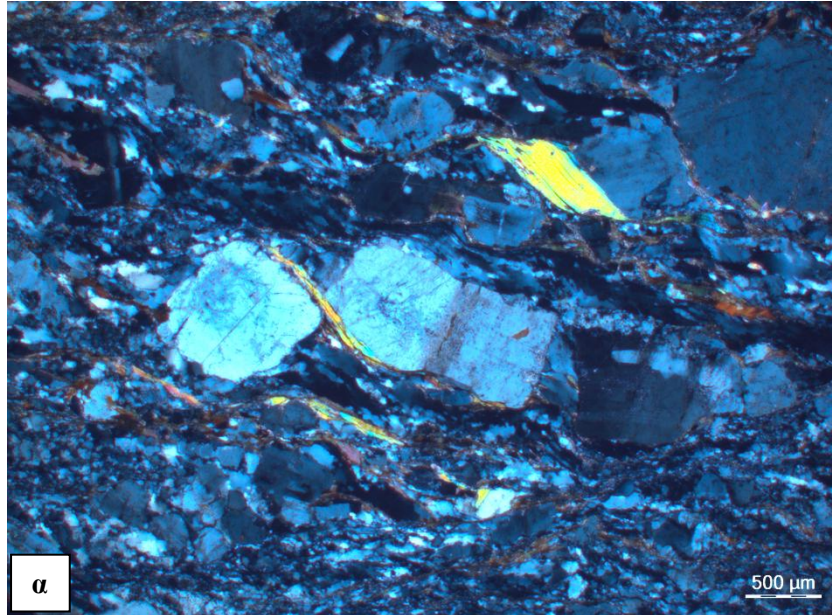


Σχήμα 2.7. Δοκίμια ορθογέσιου Ικαρίας Α και Β.

2.4. Μικροσκοπική μελέτη ορθογνεύσιου Ικαρίας Α

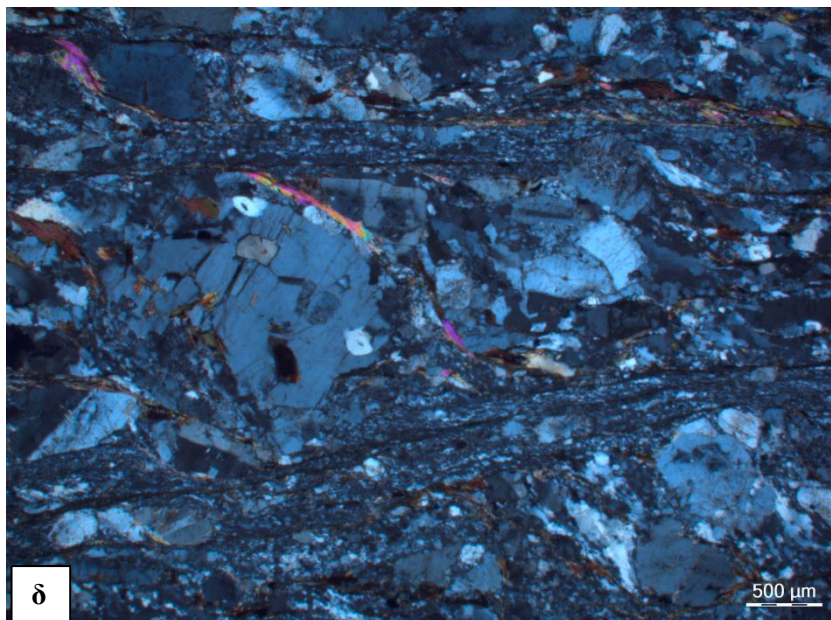
Η μικροσκοπική μελέτη του πετρώματος διενεργήθηκε από τη Μαρία Περράκη, Λέκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π..

Στις μικροφωτογραφίες του σχήματος 2.8 διακρίνονται επιφάνειες σχιστότητας, από προσανατολισμένα φυλλάκια μοσχοβίτη και βιοτίτη και κόκκους χαλαζία, οι οποίες αναστομώνονται γύρω από αστρίους (α) και πολυκρυσταλλικά συσσωματώματα χαλαζία (β).



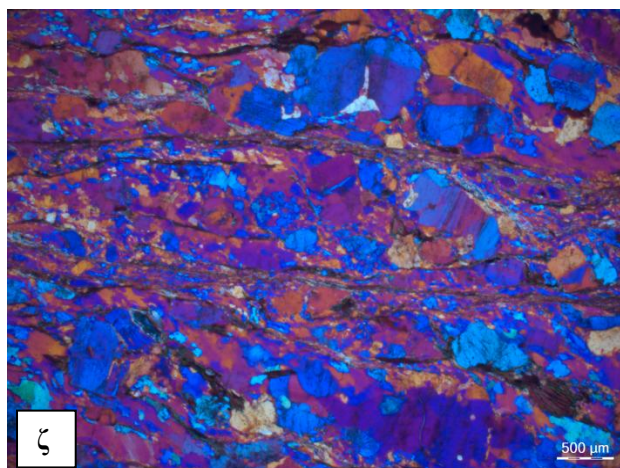
Σχήμα 2.8. Μικροφωτογραφίες από οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός, με κάθετα πολωροειδή.

Στις μικροφωτογραφίες του σχήματος 2.9 διακρίνονται επιφάνειες σχιστότητας από προσανατολισμένα φυλλάρια μοσχοβίτη και βιοτίτη και κόκκους χαλαζία, οι οποίες αναστομώνονται γύρω από αστρίους και χαλαζία. Χαρακτηριστικές είναι οι S-C (Schistosity-Cleavage) δομές παραμόρφωσης.

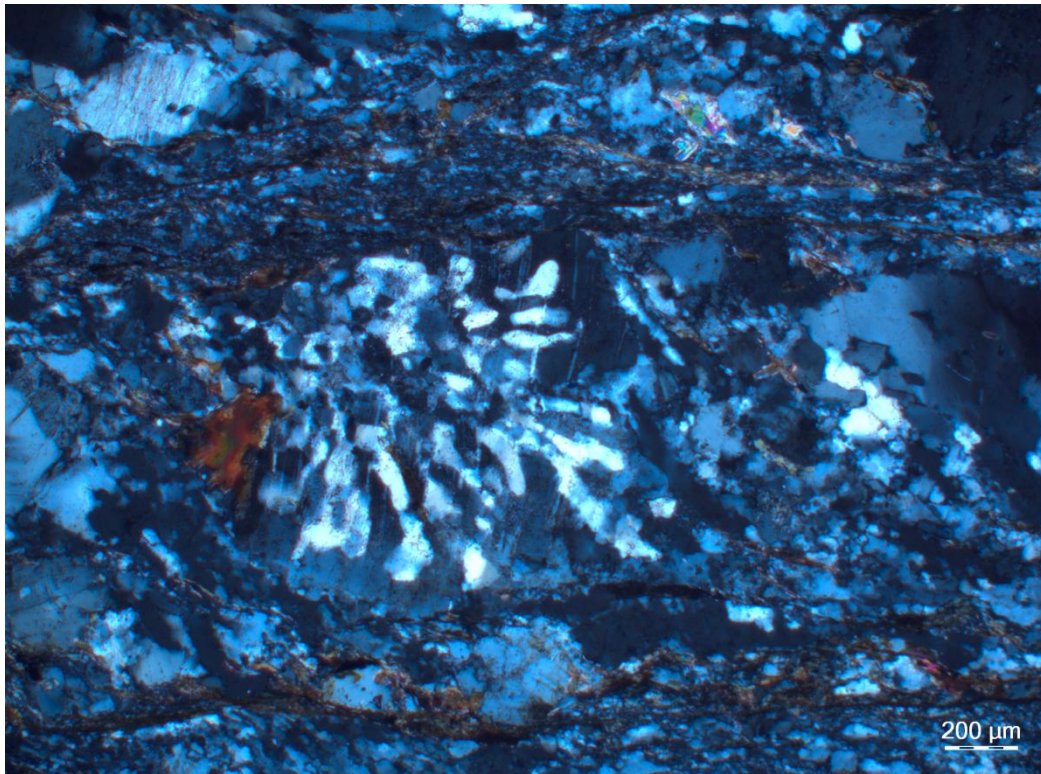


Σχήμα 2.9. Μικροφωτογραφίες, από οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός, με παράλληλα (γ) και κάθετα (δ) πολαιοειδή.

Στις μικροφωτογραφίες του σχήματος 2.10 διακρίνονται χαρακτηριστικές S-C δομές παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.10. Μικροφωτογραφίες, από οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός, με παράλληλα (ε) και κάθετα (στ) πολωροειδή και με το πλακίδιο της γύψου (ζ).



Σχήμα 2.11. Υπολειμματικός μαγματικός ιστός (γραφικές συμφύσεις χαλαζία-αστρίων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

Η τεχνολογία διάνοιξης σιηράγγων με TBM έχει φτάσει σε πολύ υψηλό επίπεδο ανάπτυξης. Ρυθμοί προχώρησης 10-50 m/ημέρα σε εδάφη και υψηλών αντοχών πετρώματα είναι συνήθεις σήμερα. Η πρόβλεψη της επίδοσης ενός TBM σε δεδομένο γεωλογικό σχηματισμό είναι ένας από τους κύριους παράγοντες στον υπολογισμό των οικονομικών του έργου. Είναι επιθυμητή η πρόβλεψη της επίδοσης του TBM με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στον προγραμματισμό του χρονοδιαγράμματος του έργου, πριν την έναρξη της διάνοιξης της σιηραγγας. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την επίδοση των μηχανημάτων είναι οι μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και της βραχομάζας, η εισροή νερού, η διάμετρος, η ισχύς, η ροπή στρέψης και η δύναμη ώσης του μηχανήματος, η ταχύτητα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής, ο τύπος και οι διαστάσεις των κοπτικών και η μεταξύ τους απόσταση. (Balci 2009).

Οι μέθοδοι πρόβλεψης της επίδοσης ενός TBM μπορούν να ταξινομηθούν ως: θεωρητικοί, εμπειρικοί, εργαστηριακές δοκιμές κοπής πλήρους κλίμακας (full-scale cutting tests), εργαστηριακές δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας (small-scale cutting tests) και δοκιμές στο πεδίο πραγματικού μηχανήματος.

Τα εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης βασίζονται κυρίως στην παρελθούσα εμπειρία και την ερμηνεία των προηγούμενων καταγεγραμμένων δεδομένων πεδίου. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία αυτών των μοντέλων εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων, η συλλογή των οποίων είναι συνήθως δύσκολη.

Οι δοκιμές κοπής πλήρους κλίμακας σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος είναι ενδεχομένως η πιο αξιόπιστη διαθέσιμη μέθοδος σήμερα, καθώς οι δυνάμεις κοπής μετρώνται σε πραγματικού μεγέθους κοπτικούς δίσκους σε μεγάλα δείγματα πετρώματος (μεγέθους περί του ενός m³) με μηχανή γραμμικής κοπής (linear cutting machine - LCM).

Τα θεωρητικά μοντέλα βασίζονται στην ανάλυση των δυνάμεων που δρουν στο κοπτικό και στη συσχέτιση τους: α) με τις μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, όπως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό και η διατμητική αντοχή, β) με τις ιδιότητες της βραχομάζας, όπως ο δείκτης ποιότητας βράχου (RQD) και γ) με τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος.

Οι δυνάμεις κοπής (κύλισης, ώσης και πλευρικές) χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση και τη διάταξη της κοπτικής κεφαλής του TBM και γενικά για το σχεδιασμό του μηχανήματος. Χρησιμοποιούνται επίσης για την εκτίμηση της λειτουργικής ικανότητας και επίδοσης του μηχανήματος, που είναι καίρια ζητήματα στη μελέτη της δυνατότητας χρησιμοποίησης συγκεκριμένου συστήματος μηχανικής όρυξης σε δεδομένο γεωλογικό σχηματισμό.

Όσον αφορά τον τύπο αστοχίας που ευθύνεται για τη δημιουργία θραυσμάτων (chipping), έχουν αναπτυχθεί δύο απόψεις. Στα θραύσματα που παράγονται κατά την προχώρηση της διάτρησης, έχουν παρατηρηθεί επιφάνειες που έχουν αστοχήσει σε διάτμηση, οι οποίες υποστηρίζουν την ύπαρξη αστοχίας λόγω *διάτμησης*. Επίσης, η λειτουργία σφήνας του κοπτικού ενισχύει αυτόν τον τύπο αστοχίας. Στον αντίποδα, η δημιουργία θραυσμάτων μεγέθους που υπερβαίνει το βάθος κοπής ή το μήκος επαφής κοπτικού-πετρώματος - καλούμενη ως *υπερεκσκαφή* - τείνει να καταδείξει μηχανισμό αστοχίας λόγω *εφελκυσμού*.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ανασκόπηση των κύριων θεωρητικών ερευνών που έχουν διενεργηθεί για την ερμηνεία του μηχανισμού αστοχίας των πετρωμάτων υπό τη δράση κοπτικών εργαλείων. Οι μελέτες αυτές έχουν διενεργηθεί για να παρέχουν καλύτερη κατανόηση αυτού του μηχανισμού, ώστε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων κοπής των πετρωμάτων. Λόγω όμως της πολύπλοκης φύσης των πετρωμάτων, ενδεχομένως να μη δίνουν ρεαλιστικές τιμές. Η βιβλιογραφική αυτή έρευνα επικεντρώνεται στις μαθηματικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν για να προσομοιώσουν τη δράση των κοπτικών τύπου δίσκου.

Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι προαναφερόμενες θεωρίες και στη συνέχεια αναπτύσσονται τέσσερις εξ' αυτών.

Πίνακας 3.1. Θεωρίες κοπής των πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου (Ozdemir 2009).

Name	Equations	Var.
Roxborough,1975 and 1978	<p><i>Normal force,</i></p> $F_N = 4 \cdot \sigma_c \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sqrt{D \cdot p^3 - p^4}, \text{ kN}$ <p><i>Rolling force,</i></p> $F_R = 4 \cdot \sigma_c \cdot p^2 \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right), \text{ kN}$ <p><i>Influence of tip geometry</i></p> $F_{N1} = F_N \cdot e^{A \cdot r}, \text{ kN}$ $F_{R1} = F_R \cdot e^{B \cdot r}, \text{ kN}$ $A = 0.0354 + (0.6554/p)$ $B = 0.060 + (0.0383/p)$ $r = \text{tip radius (mm)}$	$\sigma_c = \text{MPa}$ $D = \text{mm}$ $p = \text{mm}$ $\phi = \text{deg.}$ $r = \text{mm}$
Snowdon,1975	<p><i>Normal force,</i></p> $F_N = \sigma_c \cdot (0.15p - 0.21), \text{ kN}$ <p><i>Rolling force,</i></p> $F_R = \sigma_c \cdot (0.027p - 0.07), \text{ kN}$	$\sigma_c = \text{Mpa}$ $p = \text{mm}$
Bilgin,1977	<p><i>Normal force,</i></p> $F_N = 4.2 + b \cdot A, \text{ kN}$ $b = 0.00762 + 0.000998\sigma_c$ $A = \frac{8}{3} \cdot p \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot \sqrt{D \cdot p - p^2}$ <p><i>Rolling force,</i></p> $F_R = c \cdot A_1^{0.778}, \text{ kN}$ $c = -0.025 + 0.0072\sigma_c$ $A_1 = p^2 \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)$	$\sigma_c = \text{MPa}$ $D = \text{mm}$ $p = \text{mm}$ $\phi = \text{deg}$
Ozdemir,1978	<p><i>Normal force,</i></p> $F_N = D^{1/3} \cdot p^{3/2} \cdot \left[\frac{4}{3} \sigma_c + 2 \cdot \sigma_t \cdot \left(\frac{s}{p} - 2 \tan(\phi) \right) \right] \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)$ <p><i>Rolling force,</i></p> $F_R = \frac{\sigma_c \cdot p^2 + 4 \sigma_t \cdot \phi \cdot \left(s - 2 \cdot p \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)}{D \cdot (\phi - \sin(\phi) \cdot \cos(\phi))} \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)$ <p>where</p> $\phi = a \cos\left(\frac{R - p}{p}\right) \quad R = \text{cutter radius (in.)}$	$\sigma_c = \text{psi}$ $\sigma_t = \text{psi}$ $D = \text{in}$ $p = \text{in}$ $s = \text{in}$ $\phi = \text{deg.}$

Πίνακας 3.1 (συνέχεια). Θεωρίες κοπής των πετρωμάτων με κοπτικά τύπου δίσκου.

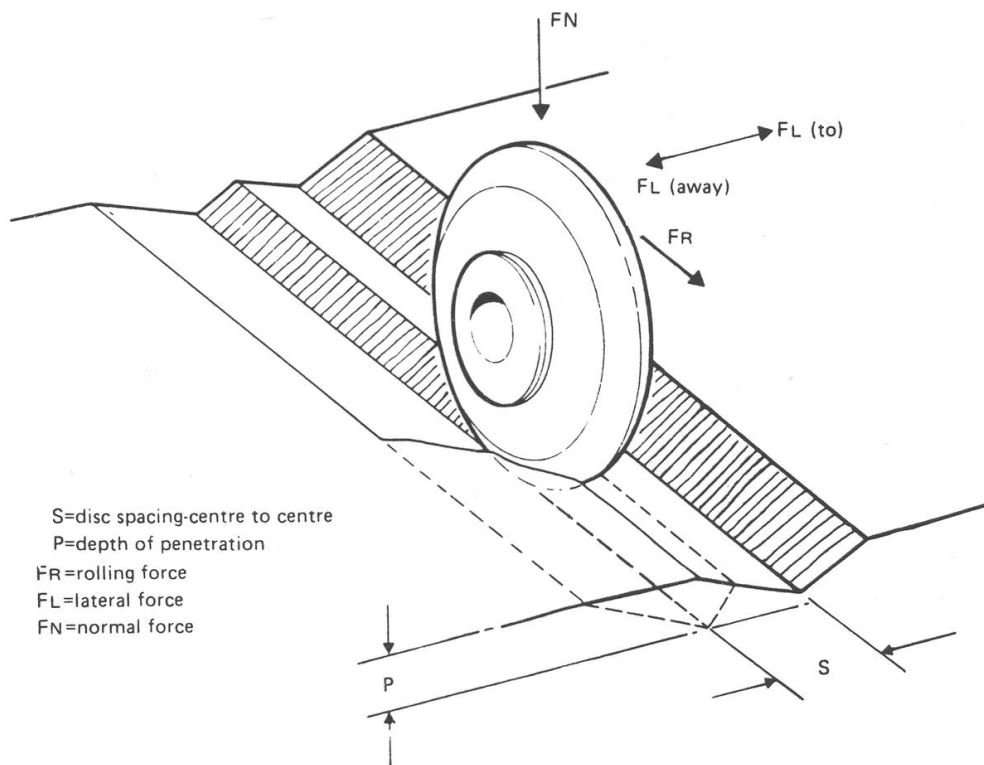
Name	Equation	Var.																								
Sato, 1990	<p>Normal force, $F_n = A \cdot p^m$, kN</p> <p>Rolling force, $F_R = B \cdot p^n$, kN</p> <p>where,</p> $A = K_T \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2} + \alpha\right) \cdot \sqrt{D \cdot s} \cdot p^m$ $B = K_R \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2} + \alpha\right) \cdot \sqrt{s} \cdot p^n$ $K_T = 0.13 E^{0.36} \cdot K_{CB}^{0.23}$ $K_R = 0.11 E^{0.40} \cdot K_{CB}^{0.28}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>m</th> <th>n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.48</td><td>1.09</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.53</td><td>1.07</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.58</td><td>1.04</td></tr> <tr><td>15</td><td>0.53</td><td>1.08</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.43</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>25</td><td>0.54</td><td>1.14</td></tr> <tr><td>30</td><td>0.57</td><td>1.23</td></tr> </tbody> </table> <p>For practical applications, m=0.5 and n=1.15</p>	α	m	n	0	0.48	1.09	5	0.53	1.07	10	0.58	1.04	15	0.53	1.08	20	0.43	1.01	25	0.54	1.14	30	0.57	1.23	<p>E = GPa $K_{CB} =$ MN/m^{3/2} D = mm p = mm s = mm $\phi =$ deg $\alpha =$ deg</p>
α	m	n																								
0	0.48	1.09																								
5	0.53	1.07																								
10	0.58	1.04																								
15	0.53	1.08																								
20	0.43	1.01																								
25	0.54	1.14																								
30	0.57	1.23																								
Wijk, 1992	<p>Normal force, $F_N = 3 \cdot \left[w + p \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \right] \cdot \sigma_c \cdot \sqrt{p \cdot D}$, N</p> <p>Rolling force, $F_R = 3 \cdot \sigma_c \cdot p \cdot \left[w + \frac{2 \cdot p \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right)}{3} \right]$, N</p>	<p>$\sigma_c =$ Pa D = m p = m w(r) = m</p>																								
Rostami, 1993	<p>Normal force, $F_N = F_T \cdot \cos(\beta)$</p> <p>Rolling force, $F_R = F_T \cdot \sin(\beta)$</p> <p>where,</p> $F_T = \frac{P^1 \cdot R \cdot T \cdot \varphi}{\psi + 1}$ $\varphi = a \cos\left(\frac{R - p}{p}\right)$ <p>$\psi =$ a value between 0 and 1 $P^1 = 100599 + 12170 \cdot s - 7.88 \cdot \sigma_c - 2883 \cdot \sigma_c^{0.1} - 192 \cdot s^3 - 29450 \cdot w - 13000 \cdot R$</p>	<p>$\sigma_c =$ psi $\sigma_t =$ psi D = in S = in p = in w = in</p>																								

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα σύμβολα των παραμέτρων που εμφανίζονται στα σχήματα και τις σχέσεις των θεωριών κοπής για κοπτικά τύπου δίσκου και οι αντίστοιχοι ορισμοί.

Πίνακας 3.2. Σύμβολα και ορισμοί των παραμέτρων για κοπτικά τύπου δίσκου.

Κοπτικά τύπου δίσκου			
Σύμβολο	Παράμετρος	Μονάδα	Ορισμός
F_R	Δύναμη κύλισης (rolling force)	kN	Δύναμη η οποία ασκείται στη διεύθυνση της κοπής, ώστε ο δίσκος να κυλά στο απαιτούμενο βάθος κοπής.
F_N ή F_T	Δύναμη ώσης ή κάθετη δύναμη (thrust-normal force)	kN	Δύναμη η οποία ασκείται στο κοπτικό κάθετα προς τη διεύθυνση της κύλισης (κοπής). Αντιστοιχεί στην ώση που διατηρεί το κοπτικό στο επιθυμητό βάθος κοπής.
F_S ή F_L	Πλευρική δύναμη (lateral-sideways force)	kN	Δύναμη η οποία ασκείται στο πέτρωμα από τα πλευρικά τοιχώματα του κοπτικού. Έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζουν οι δύο προηγούμενες δυνάμεις.
R	Ακτίνα δίσκου	cm	
a	Γωνία αιχμής δίσκου	ακτίνια	
A	Επιφάνεια προσβολής	cm ²	Διεπιφάνεια αιχμής δίσκου-πετρώματος.

Στο σχήμα 3.1 και στον πίνακα 3.3 δίνεται ο συμβολισμός των παραμέτρων για κοπτικά τύπου δίσκου.



Σχήμα 3.1. Συμβολισμός σε κοπτικά τύπου δίσκου (Snowdon et al. 1982).

Πίνακας 3.3. Γενικός συμβολισμός των παραμέτρων για κοπτικά τύπου δίσκου.

Γενικά		
Σύμβολο	Παράμετρος	Μονάδα
d ή p	Βάθος κοπής ή διείσδυσης (depth of penetration)	cm
s	Απόσταση διαδοχικών κοπτικών	cm
w	Πλάτος αιχμής σφήνας	cm
σ_c	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	kN / cm ²
σ_t	Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό	kN / cm ²
θ (γωνία που σχηματίζεται από το οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο αστοχίας)	Γωνία αστοχίας	ακτίνια

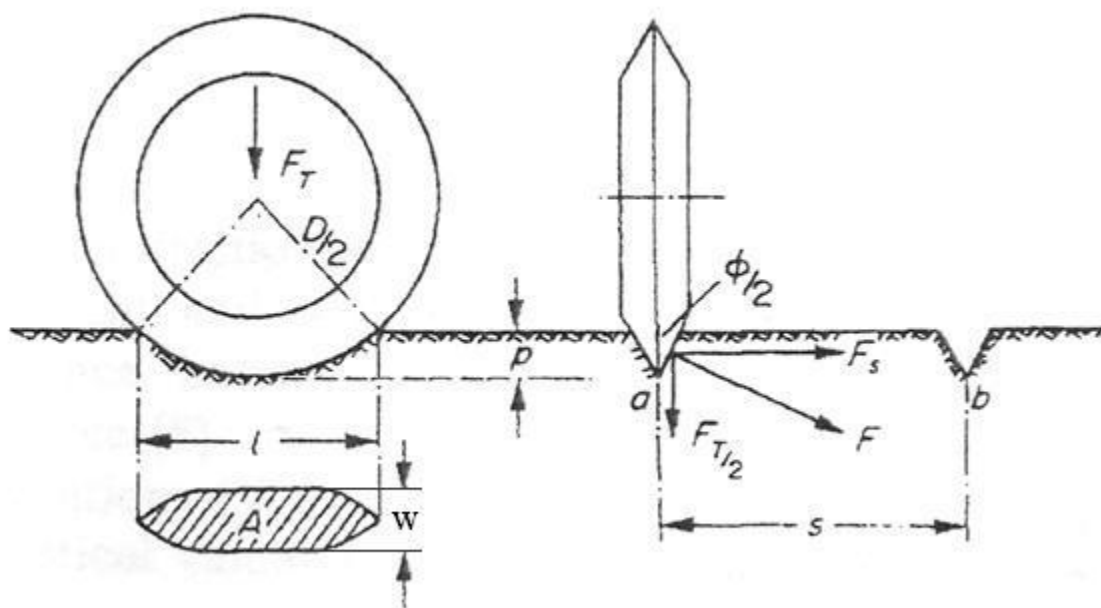
3.1. Θεωρία Roxborough και Phillips (1975)

Οι Roxborough και Phillips για να περιγράψουν την εξόρυξη πετρώματος με κοπτικά τύπου δίσκου προτείνουν ένα απλό μαθηματικό μοντέλο, με το οποίο υπολογίζονται τα μέτρα των κύριων δυνάμεων που αναπτύσσονται πάνω στο κοπτικό, συναρτήσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος σ_c , του βάθους κοπής p και της γεωμετρίας του κοπτικού (διάμετρος D , γωνία αιχμής ϕ).

Οι δυνάμεις που υπολογίζονται από το μοντέλο έχουν καλή συσχέτιση με πειραματικά αποτελέσματα και δεδομένα πραγματικών μετρήσεων και συνεπώς παρέχουν υψηλή αξιοπιστία στη χρήση τους.

Υπολογισμοί

Θεωρείται το κοπτικό του σχήματος 3.2, γωνίας αιχμής ϕ , διαμέτρου D και πλάτους αιχμής w , το οποίο διεισδύει σε επιφάνεια πετρώματος υπό τη δράση της δύναμης F_T (Panagiotou 1992).



Σχήμα 3.2. Γεωμετρία κοπής με κοπτικό δίσκου κατά τη θεωρία Roxborough and Phillips (1975).

$$\text{Θεωρείται ότι: } p > \frac{w}{2} \cdot \cot \frac{\phi}{2} \Rightarrow w > 2p \cdot \tan \frac{\phi}{2} \quad (3.1)$$

Το μήκος της χορδής l αυξάνεται με την αύξηση του βάθους κοπής κατά τη σχέση:

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left(\frac{D}{2} - p\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \Rightarrow l = 2\sqrt{D \cdot p - p^2} \quad (3.2)$$

Η αντίσταση του πετρώματος στη διείσδυση του δίσκου θεωρείται ότι είναι ίση με τη θλιπτική αντοχή του πετρώματος και ότι η δύναμη ώσης του δίσκου F_T ενεργοποιεί αυτήν την αντοχή στην προβαλλόμενη στο οριζόντιο επίπεδο διεπιφάνεια κοπτικού-πετρώματος A :

$$F_T = \sigma_c \cdot A \quad (3.3)$$

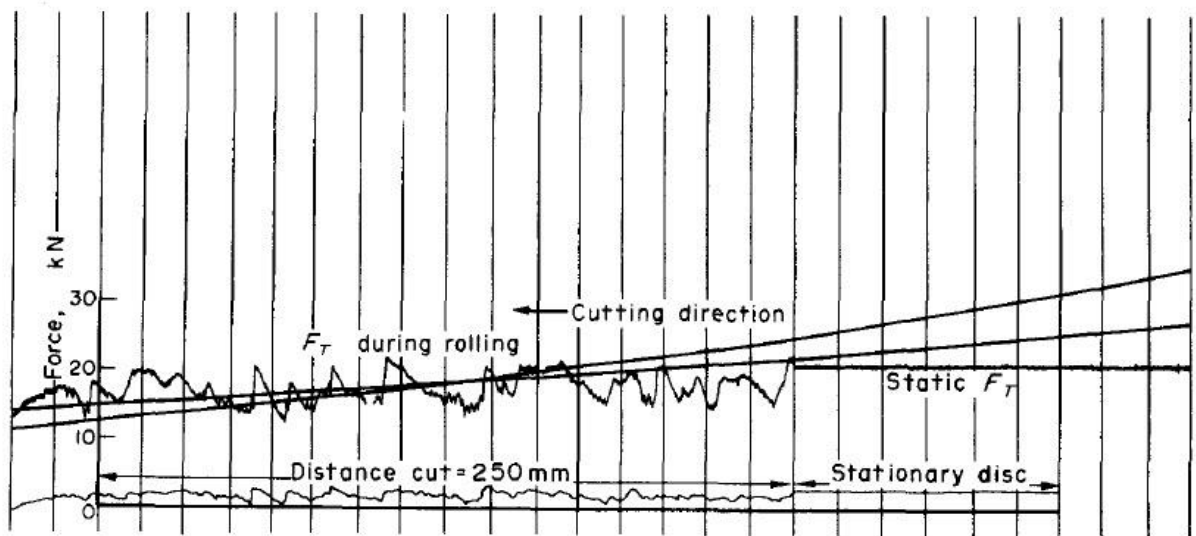
Επειδή ο ακριβής υπολογισμός της επιφάνειας A περιέχει μια πολύπλοκη παράσταση, μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση:

$$A = 2 \cdot p \cdot l \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \quad (3.4)$$

Αντικαθιστώντας την (3.2) στην (3.4) και έπειτα την (3.4) στην (3.3) προκύπτει:

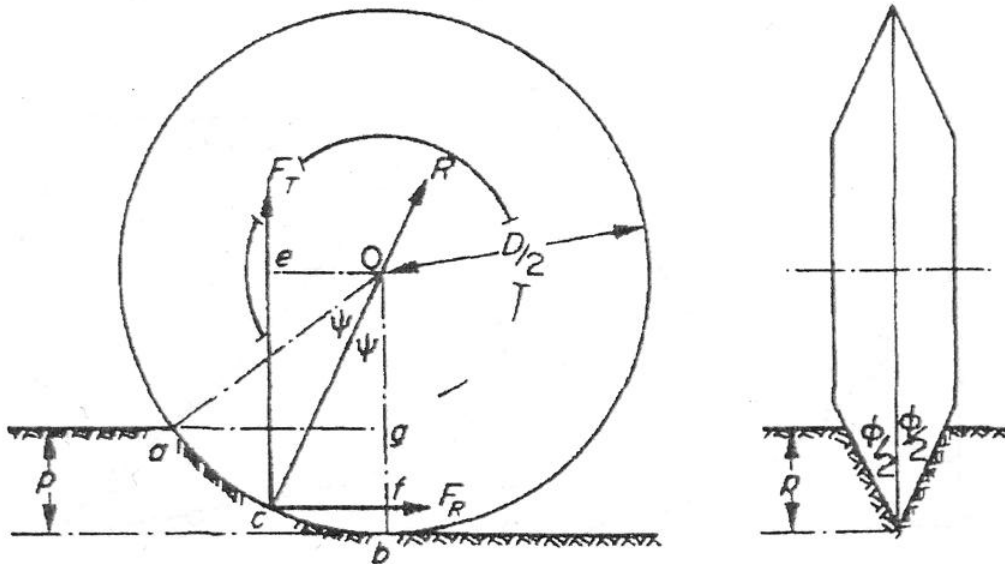
$$F_T = 4 \cdot \sigma_c \cdot \tan \frac{\varphi}{2} \cdot \sqrt{D \cdot p^3 - p^4} \quad (3.5)$$

Περαιτέρω ανάλυση προϋποθέτει τη θεώρηση ότι η F_T διατηρείται σταθερή καθόσον ο δίσκος υποβάλλεται σε κύλιση. Η προϋπόθεση αυτή δικαιολογείται από το σχήμα 3.3, το οποίο είναι ένα αναλογικό διάγραμμα της στατικής δύναμης ώσης F_T και στη συνέχεια της ίδιας δύναμης, μετρούμενης ενώ ο δίσκος κυλιέται. Φαίνεται ότι οι κορυφαίες τιμές της F_T είναι ουσιαστικά ίδιες για συνθήκες στατικές και κύλισης. Από τη στιγμή που παρατηρείται στην πράξη ότι το θραυσμένο πέτρωμα πίσω από το δίσκο παραμένει στη θέση του, είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι ο τομέας του δίσκου που έχει διεισδύσει, παραμένει σε συνεχή επαφή με τις επιφάνειες της αύλακος κατά τη διάρκεια της κύλισης.



Σχήμα 3.3. Δύναμη ώσης F_T σε συνθήκες στατικές και κύλισης (Roxborough and Phillips 1975).

Στο σχήμα 3.4 φαίνεται ο δίσκος υπό τη δράση των δύο κυρίων δυνάμεων F_T και F_R . Αν ο δίσκος περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από το O και θεωρηθούν αμελητέες οι τριβές, τότε η συνισταμένη των κυρίων δυνάμεων θα πρέπει να περνάει από το O προκειμένου να ικανοποιείται η ισορροπία ροπών γύρω από το O .



Σχήμα 3.4. Οι κύριες δυνάμεις F_T και F_R που δρουν στο δίσκο κατά την κοπή (Roxborough and Phillips 1975).

Επίσης αν θεωρηθεί ότι η συνισταμένη R των δυνάμεων ασκείται στο μέσο του τόξου acb , τότε για την ισορροπία ροπών στο O θα πρέπει:

$$F_R \cdot \overline{Of} = F_T \cdot \overline{Oe} \Rightarrow \frac{F_T}{F_R} = \cot\psi \quad (3.6)$$

και

$$\frac{\overline{Og}}{\overline{Oa}} = \frac{\frac{D}{2} - p}{\frac{D}{2}} = \cos 2\psi = \frac{1 - \tan^2\psi}{1 + \tan^2\psi} \quad (3.7)$$

Άρα:

$$\tan^2\psi = \frac{p}{D - p} \quad (3.8)$$

Η (3.6) βάσει της (3.8) γίνεται:

$$\frac{F_T}{F_R} = \sqrt{\frac{D - p}{p}} \quad (3.9)$$

και αντικαθιστώντας την (3.5) στην (3.9) προκύπτει:

$$\boxed{F_R = 4 \cdot \sigma_c \cdot p^2 \cdot \tan \frac{\phi}{2}} \quad (3.10)$$

3.2. Θεωρία Ozdemir, Miller και Wang (1978)

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων ώσης και κύλισης των κοπτικών τύπου δίσκου οι Ozdemir, Miller και Wang προτείνουν την ακόλουθη θεωρία, η οποία συμφωνεί σε ικανοποιητικό βαθμό με μετρούμενες τιμές.

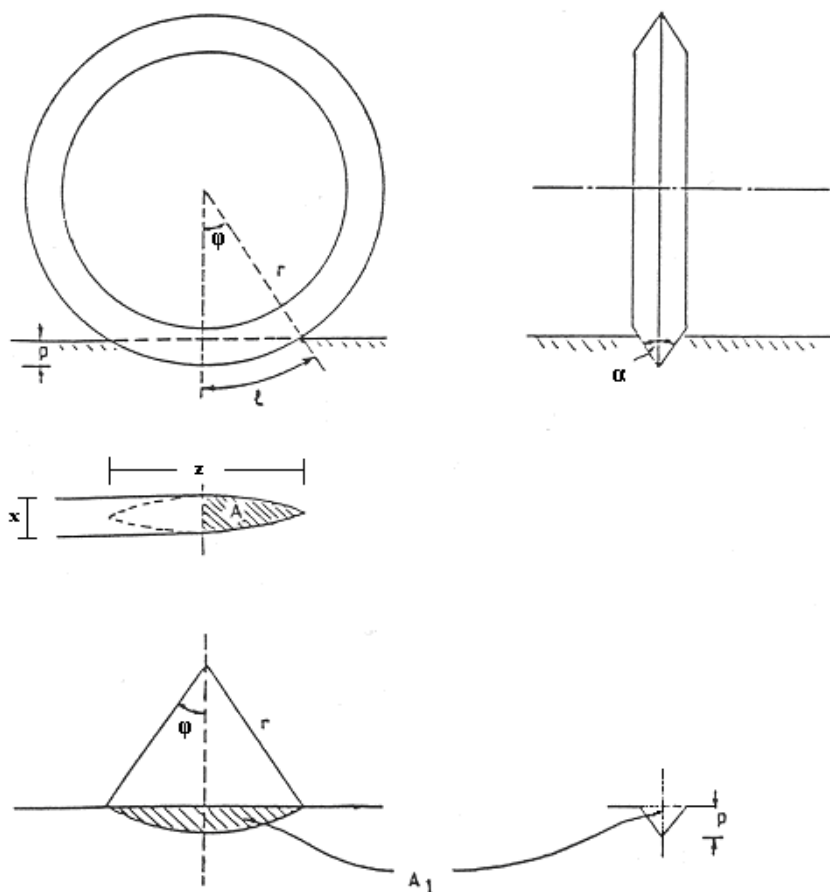
Μηχανισμός

Οι Ozdemir, Miller και Wang παρατήρησαν ότι η προβαλλόμενη στο οριζόντιο επίπεδο διεπιφάνεια κοπτικού-πετρώματος που δίνεται από τη θεωρία Roxborough και Phillips συμβαίνει μόνο όταν ο δίσκος διεισδύει στο πέτρωμα χωρίς κύλιση. Έτσι ισχυρίζονται ότι κατά την κύλιση η επιφάνεια αυτή είναι η μισή. Επίσης θεωρούν ότι το μέτρο της δύναμης ώσης F_N προέρχεται κατά ένα μέρος από την αντοχή του πετρώματος σε διείσδυση και κατά ένα δεύτερο μέρος, το οποίο δίνει διατμητική συνιστώσα που προκαλεί διατμητική αστοχία μεταξύ γειτονικών κοπών.

Υπολογισμοί

- Υπολογισμός της δύναμης ώσης F_N .

Θεωρείται δίσκος ακτίνας r , γωνίας αιχμής α , ο οποίος διεισδύει σε επιφάνεια πετρώματος σε βάθος p , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Γεωμετρία διείσδυσης δίσκου κατά τη θεωρία Ozdemir et al. (Αναγνώστου 2006).

Η επιφάνεια A όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 είναι:

$$A = A_1 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} = r^2 \cdot (\varphi - \cos\varphi \cdot \sin\varphi) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.11)$$

Θεωρούμε ότι η δύναμη ώσης του δίσκου F_N είναι άθροισμα δύο δυνάμεων, F_1 και F_2 :

$$F_N = F_1 + F_2 \quad (3.12)$$

Όπου F_1 : δύναμη που απαιτείται για τη διείδυση του δίσκου σε βάθος p .

F_2 : δύναμη που παρέχει η οριζόντια συνιστώσα F_S , η οποία υποβάλλει σε διάτμηση το πέτρωμα μεταξύ γειτονικών κοπών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6 (a).

Η αντοχή του πετρώματος σε διείδυση θεωρείται ίση με την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη σ_c :

$$F_1 = \sigma_c \cdot A = \sigma_c \cdot r^2 \cdot (\varphi - \sin\varphi \cdot \cos\varphi) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.13)$$

Η οριζόντια συνιστώσα F_S κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας είναι:

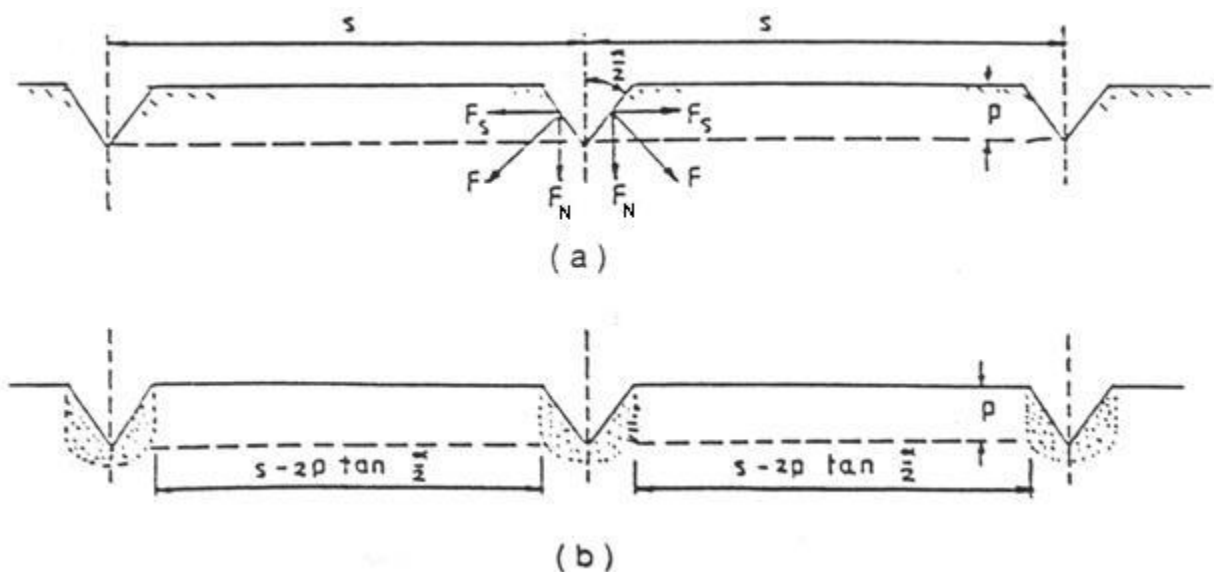
$$F_S = \tau_s \cdot A_S \quad (3.14)$$

Όπου τ_s : διατμητική αντοχή πετρώματος

A_S : επιφάνεια διατμητικής αστοχίας

Από τα σχήματα (3.5) και (3.6):

$$A_S = 1 \cdot \left(s - 2 \cdot p \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) = r \cdot \varphi \cdot \left(s - 2 \cdot p \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3.15)$$



Σχήμα 3.6. Διάγραμμα δυνάμεων για τον υπολογισμό της δύναμης ώσης κατά τη θεωρία Ozdemir et al. (Αναγνώστου 2006).

Αντικαθιστώντας την (3.15) στην (3.14) είναι:

$$F_S = \tau_s \cdot r \cdot \varphi \cdot \left(s - 2 \cdot p \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3.16)$$

και

$$F_2 = 2 \cdot F_S \cdot \tan \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot \tau_s \cdot r \cdot \varphi \cdot \left(s - 2 \cdot p \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.17)$$

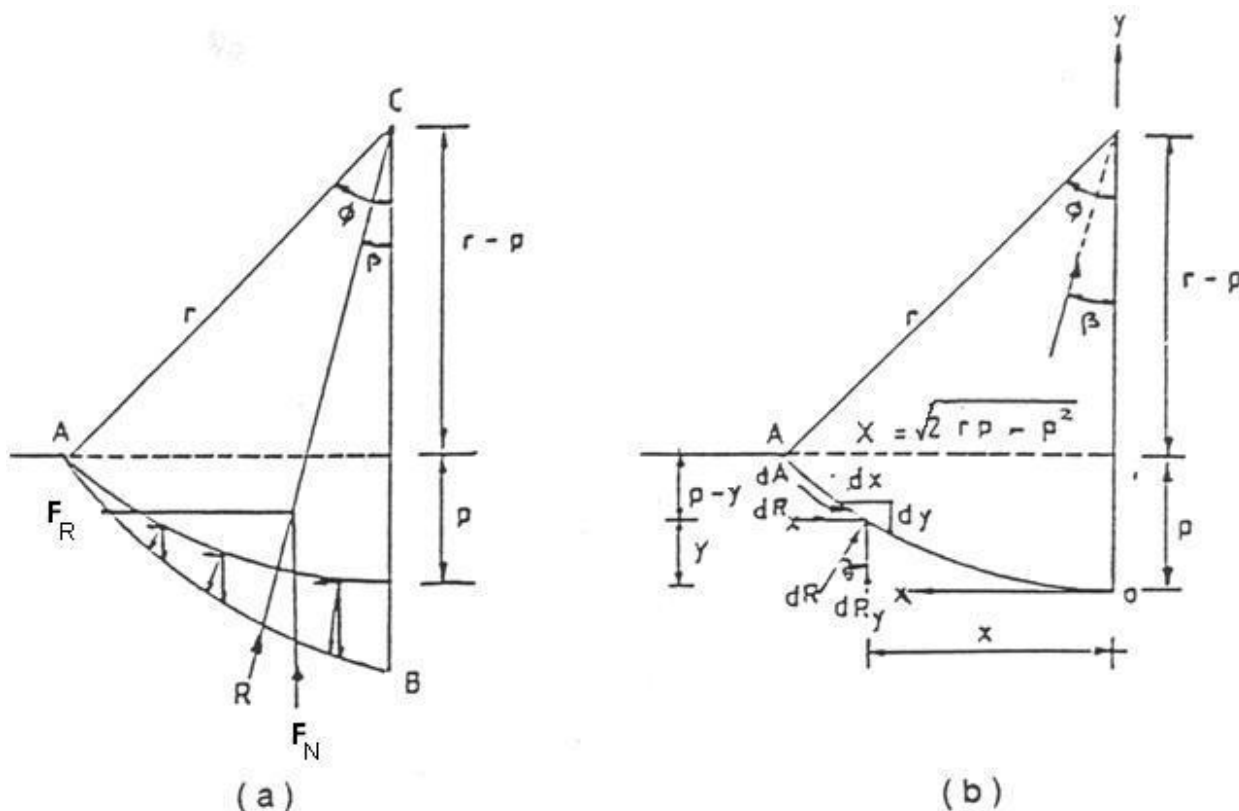
Τελικά αντικαθιστώντας την (3.13) και την (3.17) στη (3.12) προκύπτει:

$$F_N = \left[\sigma_c \cdot r^2 \cdot (\varphi - \sin\varphi \cdot \cos\varphi) + 2 \cdot \tau_s \cdot r \cdot \varphi \left(s - 2 \cdot p \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right) \right] \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.18)$$

• Υπολογισμός της δύναμης κύλισης F_R .

Η διεύθυνση της συνισταμένης δύναμης R στο δίσκο θεωρείται ότι έχει κλίση β από την κατακόρυφο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Η δύναμη κύλισης F_R δίνεται τότε από τη σχέση:

$$F_R = F_N \cdot \tan\beta \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.7. Διάγραμμα δυνάμεων για τον υπολογισμό της δύναμης κύλισης κατά τη θεωρία Ozdemir et al. (Αναγνώστου 2006).

Θεωρώντας ότι η τάση σε κάθε σημείο της αιχμής είναι ανάλογη του βάθους διείδυσης του δίσκου και εφαρμόζοντας ισορροπία είναι δυνατόν να υπολογιστεί η γωνία β :

Έστω dR_x και dR_y οι στοιχειώδεις δυνάμεις που ασκούνται σε στοιχειώδη επιφάνεια dA κατά μήκος της αιχμής του δίσκου και οι συντεταγμένες αυτής σε σύστημα αξόνων Oxy είναι (x,y) .

Από τη γεωμετρία του σχήματος 3.7 είναι:

$$x^2 + (r - y)^2 = r^2 \Rightarrow y = r - \sqrt{r^2 - x^2} \quad (3.20)$$

Βάσει της θεώρησης ότι η δύναμη είναι ανάλογη του βάθους διείσδυσης, η συνισταμένη στοιχειώδης δύναμη dR θεωρείται ότι είναι:

$$dR = k \cdot (p - y) \cdot dA \quad (3.21)$$

Όπου k : σταθερά αναλογίας

$$\begin{aligned} \text{και οι συνιστώσες της:} \quad dR_x &= k \cdot (p - y) \cdot dA \cdot \sin\theta \\ dR_y &= k \cdot (p - y) \cdot dA \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\text{Υποθέτοντας μοναδιαίο πλάτος αιχμής:} \quad dA \cdot \sin\theta = dy \quad (3.23)$$

$$dA \cdot \cos\theta = dx \quad (3.24)$$

$$\text{Άρα:} \quad dR_x = k \cdot (p - y) \cdot dy \quad (3.25)$$

$$dR_y = k \cdot (p - y) \cdot dx \quad (3.26)$$

Ολοκληρώνοντας την (3.25) από 0 έως A λαμβάνεται η δύναμη κύλισης F_R :

$$F_R = \int_0^A dR_x = \int_0^p k \cdot (p - y) dy = \frac{k \cdot p^2}{2} \quad (3.27)$$

Ολοκληρώνοντας την (3.26) από 0 έως A και χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.20) λαμβάνεται η δύναμη ώσης F_N :

$$F_N = \int_0^A dR_y = \int_0^x k \cdot (p - y) dx = k \cdot \int_0^x (p - r + \sqrt{r^2 - x^2}) dx \Rightarrow \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow F_N = k \cdot \left[(p - r) \cdot x + \frac{1}{2} \left(x \cdot \sqrt{r^2 - x^2} + r^2 \cdot \sin^{-1} \frac{x}{r} \right) \right] \quad (3.29)$$

Από το σχήμα 3.7 (b) είναι:

$$r - p = \sqrt{r^2 - x^2} = r \cdot \cos\varphi \quad (3.30)$$

$$x = r \cdot \sin\varphi \quad (3.31)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.30) και (3.31) στην (3.29) προκύπτει:

$$F_N = \frac{1}{2} \cdot k \cdot r^2 \cdot (\varphi - \sin\varphi \cdot \cos\varphi) \quad (3.32)$$

$$\text{Η (3.19) βάσει των (3.27) και (3.32):} \quad \tan\beta = \frac{F_R}{F_N} = \frac{p^2}{r^2 (\varphi - \sin\varphi \cdot \cos\varphi)} \quad (3.33)$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τις τιμές των F_N από την (3.18) και $\tan\beta$ από την (3.33) στην (3.19) προκύπτει η δύναμη κύλισης F_R :

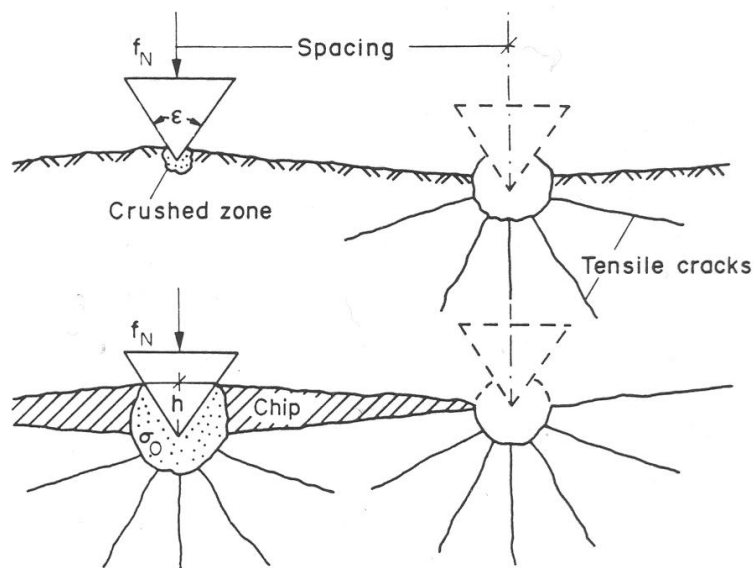
$$F_R = \left[\sigma_c \cdot p^2 + \frac{2 \cdot \tau_s \cdot \varphi \cdot p^2 \cdot \left(s - \tan \frac{\alpha}{2} \right)}{r \cdot (\varphi - \sin\varphi \cdot \cos\varphi)} \right] \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3.34)$$

3.3. Θεωρία Sanio (1985)

Σε αντίθεση με τις θεωρίες των Roxborough και Phillips, και Ozdemir et al. οι οποίες θεωρούν την αποσύνθεση του πετρώματος λόγω υπέρβασης της θλιπτικής ή/και διατμητικής του αντοχής αντίστοιχα, η θεωρία κοπής του Sanio βασίζεται στη θεώρηση εφελκυστικής αστοχίας του πετρώματος. Αυτή η ουσιώδης θεώρηση ενισχύεται από παρατηρήσεις των θραυσμάτων κοπής, τα οποία παρουσιάζουν στις επιφάνειες τους σαφή εφελκυστική αστοχία και επίσης από το γεγονός ότι τα πειραματικά αποτελέσματα κοπής συσχετίζονται πολύ καλά με την εφελκυστική αντοχή. Επίσης, η θεωρία Sanio λαμβάνει υπόψη και την ανισοτροπία του πετρώματος.

Μηχανισμός

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται ο μηχανισμός διείδυσης σφήνας απειροστού πλάτους και δημιουργίας θραυσμάτων. Σε πρώτη φάση, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή αιχμής της σφήνας, δημιουργείται εκεί μια ζώνη σύνθλιψης στην οποία θεωρείται ότι αναπτύσσεται υδροστατικό πεδίο τάσεων. Από τα όρια του υδροστατικού πεδίου τάσεων αναπτύσσονται, εφαπτομενικά προς το άρρηκτο πέτρωμα, εφελκυστικές τάσεις οι οποίες όταν φθάσουν την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος δημιουργούν ακτινικές εφελκυστικές ρωγμές με κέντρο την αιχμή του δίσκου. Όταν μία τέτοια ρωγμή φθάσει στην επιφάνεια σχηματίζεται θραύσμα.



Σχήμα 3.8. Μηχανισμός διείδυσης σφήνας και δημιουργίας θραυσμάτων κατά τη θεωρία Sanio (1985).

Υπολογισμοί

Για τους υπολογισμούς, η ζώνη σύνθλιψης θεωρείται ότι είναι κυκλική και η ακτίνα της σταθερός λόγος q του βάθους διείσδυσης h :

$$r = q \cdot h \quad (3.35)$$

Η κρίσιμη υδροστατική πίεση μέσα στη ζώνη σύνθλιψης θεωρείται χαρακτηριστική ιδιότητα του πετρώματος, δηλαδή δεν εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίσκου. Πολλαπλασιάζοντας την πίεση αυτή με την προβολή στην οριζόντιο της επιφάνειας επαφής αιχμής-πετρώματος, λαμβάνουμε τη δύναμη ώσης f_N .

$$f_N = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \sigma_o \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα πλάτους αιχμής}) \quad (3.36)$$

Όπου h : βάθος διείσδυσης

ε : γωνία αιχμής

σ_o : υδροστατική πίεση στη ζώνη σύνθλιψης

Για την εύρεση της σ_o προτείνεται η ακόλουθη σχέση, η οποία συσχετίζει την σ_o με το μήκος των ρωγμών c και την ακτίνα r της ζώνης σύνθλιψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9:

$$2 \cdot \sigma_o \cdot r = k \cdot c^{0.5} \quad (3.37)$$

Όπου k : συντελεστής κατανομής τάσεων, εξαρτώμενος από το πέτρωμα και τον αριθμό των ρωγμών.

Αντικαθιστώντας την (3.35) και (3.37) στην (3.36) προκύπτει:

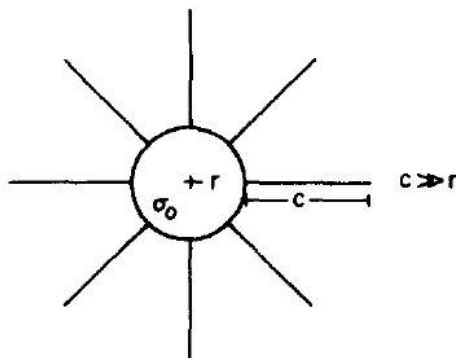
$$f_N = \frac{k}{q} \cdot \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot c^{0.5} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα πλάτους αιχμής}) \quad (3.38)$$

Η δύναμη ώσης F_N μπορεί να υπολογιστεί ως άθροισμα των στοιχειωδών δυνάμεων f_N που αντιστοιχούν σε στοιχειώδη πλάτη αιχμής dx όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10.

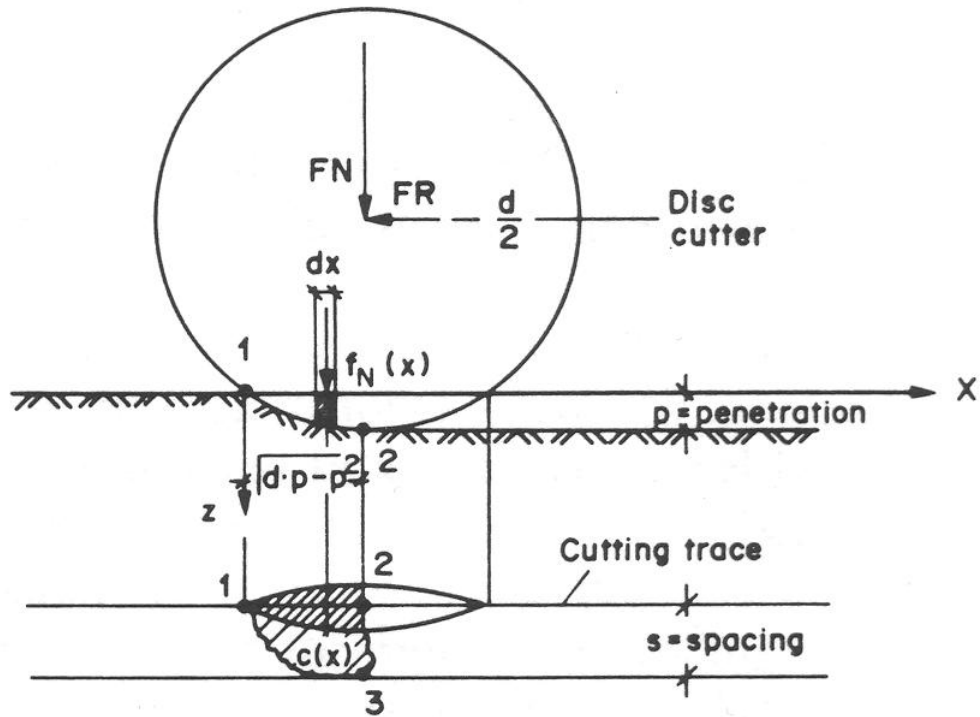
$$\text{Επομένως: } F_N = \int_0^{(d-p-p^2)^{0.5}} f_N(x) dx \Rightarrow F_N = \frac{k}{q} \cdot \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot \int_0^{(d-p-p^2)^{0.5}} c(x)^{0.5} dx \quad (3.39)$$

Όπου p : βάθος κοπής

d : διάμετρος δίσκου



Σχήμα 3.9. Ανάπτυξη ακτινικών εφελκυστικών ρωγμών από το όρια της ζώνης σύνθλιψης προς το άρρηκτο πέτρωμα, κατά τη θεωρία Sanio (1985).



Σχήμα 3.10. Υπολογισμός δύναμης ώσης κατά τη θεωρία Sanio (1985).

Αιχμή στοιχειώδους πλάτους ξεκινά τη διείδυση της στο σημείο 1, όπου το μήκος της ρωγμής είναι 0 (δηλ. $c(0)=0$). Στο σημείο 2 το μήκος της ρωγμής είναι ίσο με το διάστημα s μεταξύ γειτονικών κοπών, ώστε να έχουμε συνεχή απομάκρυνση πετρώματος μεταξύ γειτονικών κοπών (δηλ. $c(\sqrt{d \cdot p - p^2}) = s$). Αν θεωρηθεί ότι το μήκος των ρωγμών αυξάνεται γραμμικά

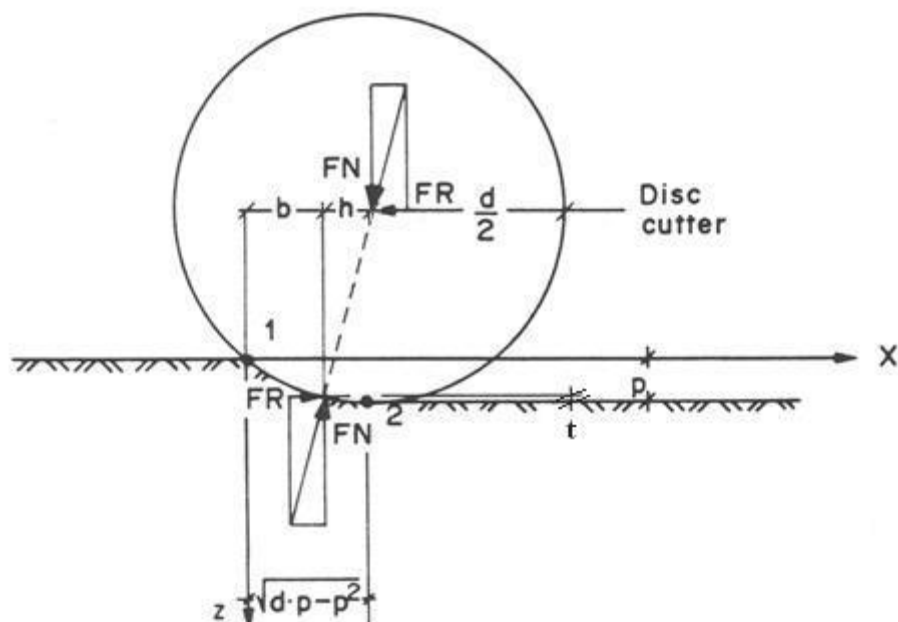
συναρτήσει του x τότε ισχύει:

$$c(x) = \frac{s}{(d \cdot p - p^2)^{0.5}} \cdot x \quad (3.40)$$

Αντικαθιστώντας την (3.40) στην (3.39) και υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα λαμβάνεται:

$$FN = \frac{2k}{3q} \cdot \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \cdot (d \cdot p - p^2)^{0.5} \cdot s^{0.5} \quad (3.41)$$

Η δύναμη κύλισης FR μπορεί να υπολογιστεί από τη συνθήκη ισοροπίας του σχήματος 3.11. Δεδομένου ότι ο δίσκος περιστρέφεται ελεύθερα στηριζόμενος σε σύστημα τριβέων και αν θεωρηθούν αμελητέες οι τριβές στο σύστημα των τριβέων, τότε η συνισταμένη των FN και FR θα πρέπει να περνάει από το κέντρο του δίσκου.



Σχήμα 3.11. Υπολογισμός δύναμης κύλισης κατά τη θεωρία Sanio (1985).

Επομένως στο κέντρο του δίσκου θα πρέπει να υπάρχει ισοροπία ροπών:

$$FN \cdot h - FR \cdot \left(\frac{d}{2} - t \right) = 0, \quad \text{όπου } h = (d \cdot p - p^2)^{0.5} - b$$

Άρα:

$$FR = \frac{\left[(d \cdot p - p^2)^{0.5} - b \right] \cdot FN}{\left(\frac{d}{2} - t \right)} \quad (3.42)$$

Το σημείο εφαρμογής της FN είναι:

$$b = \frac{1}{FN} \cdot \int_0^{(d \cdot p - p^2)^{0.5}} f_N(x) \cdot x dx = \frac{3}{5} \cdot (d \cdot p - p^2)^{0.5} \quad (3.43)$$

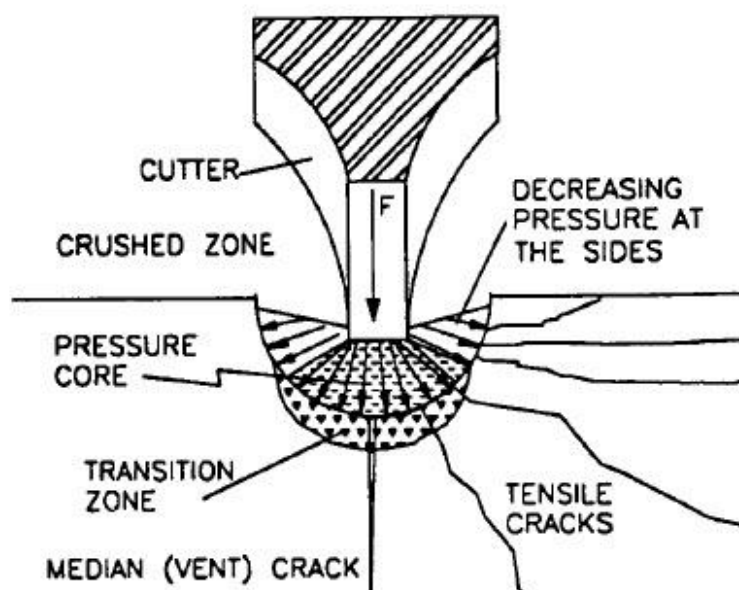
Αντικαθιστώντας την (3.43) στην (3.42) προκύπτει:

$$FR = \frac{2}{5} \cdot \frac{(d \cdot p - p^2)^{0.5}}{\left(\frac{d}{2} - t \right)} \cdot FN \quad (3.44)$$

3.4. Θεωρία Rostami (1993)

Βασικές υποθέσεις

Όπως συμβαίνει με κάθε θεωρία κοπής, εφαρμόζονται ορισμένες υποθέσεις. Οι παρατηρήσεις σχεδόν όλων των ερευνητών έχουν επιβεβαιώσει την ύπαρξη μιας ζώνης σύνθλιψης κάτω από τον κοπτικό δίσκο καθώς αυτός διεισδύει στο πέτρωμα. Αυτή η ζώνη αποτελεί το μέσο για τη μεταφορά των τάσεων στη βραχομάζα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Το ακριβές σχήμα της ζώνης σύνθλιψης δεν είναι γνωστό, αλλά για λόγους απλοποίησης, θεωρείται ότι είναι κυκλικό. Αποτελείται από καλά θραυσμένο πέτρωμα και αναπτύσσεται λόγω της συγκέντρωσης υψηλών τάσεων στην περιοχή ακριβώς κάτω από το κοπτικό. Το μέγεθος των θραυσμάτων αυξάνεται από το κέντρο προς τη βραχομάζα που περιβάλλει τη ζώνη σύνθλιψης. Η επέκταση της ζώνης είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της αιχμής του κοπτικού και των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος. Ο περιορισμός του μεγέθους της ζώνης είναι θεμιτός για διάφορους λόγους, όπως η μείωση της παραγόμενης σκόνης, η αύξηση της αποδοτικότητας της κοπής και η ελάττωση της ειδικής ενέργειας κοπής (μικρότερα θραύσματα απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια κοπής).

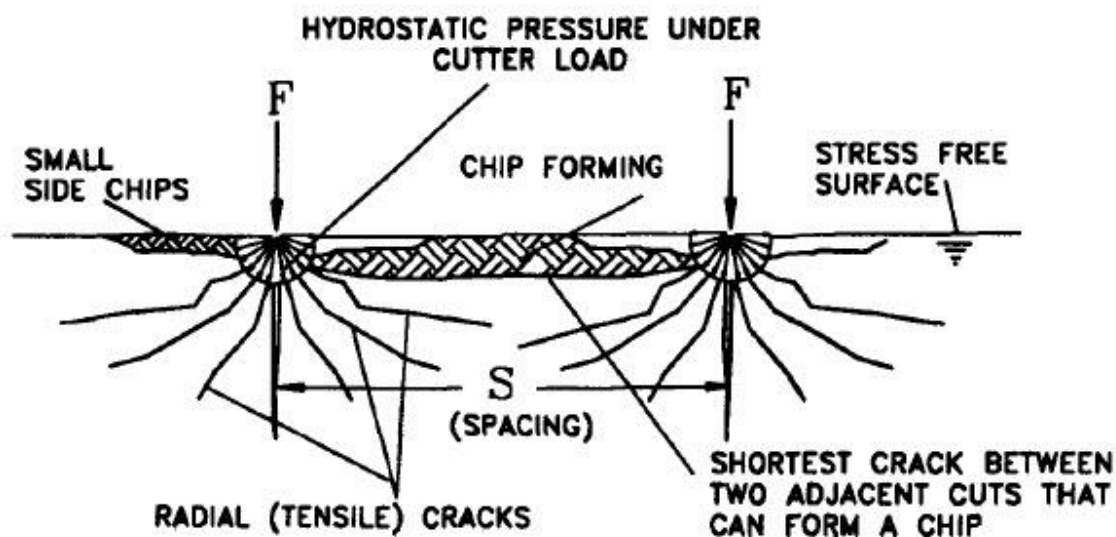


Σχήμα 3.12. Ζώνη σύνθλιψης κάτω από κοπτικό δίσκο (Rostami and Ozdemir 1993).

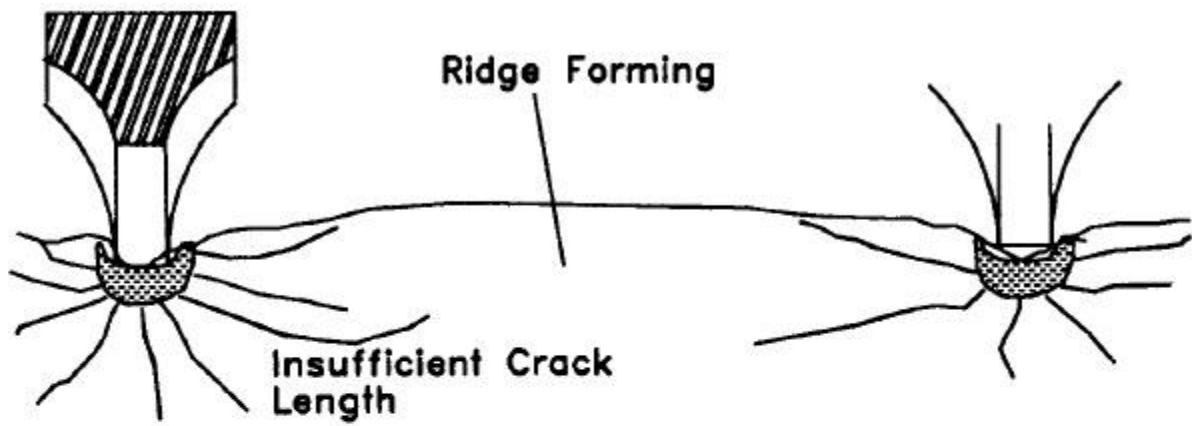
Η ακριβής κατανομή των τάσεων στη ζώνη αυτή (σε διατομή κάθετη στην κοπή) δεν είναι γνωστή. Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών, θεωρείται ότι υπάρχει ομοιόμορφο υδροστατικό πεδίο τάσεων στη ζώνη σύνθλιψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.

Ακτινικές ρωγμές δημιουργούνται λόγω των τάσεων στη ζώνη αυτή. Οι ρωγμές αυτές είναι οι κύριες επιφάνειες ασυνεχειών που δημιουργούνται γύρω από τη ζώνη σύνθλιψης. Άρα, η δημιουργία και η διάδοση εφελκυστικών ρωγμών θεωρείται ότι είναι ο κύριος τρόπος δημιουργίας θραυσμάτων και ο κύριος τύπος αστοχίας. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι ρωγμές που αναπτύσσονται γύρω από τη ζώνη σύνθλιψης (ειδικά εκείνες που επεκτείνονται στην ελεύθερη επιφάνεια) υπόκεινται επίσης σε σημαντικές διατμητικές τάσεις. Συνεπώς, ο συνδυασμός των δύο τύπων αστοχίας (λόγω εφελκυσμού και λόγω διάτμησης) για τη δημιουργία θραυσμάτων είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ρωγμών από δύο γειτονικές κοπές «καθοδηγεί» τη θραύση του πετρώματος. Όταν μία ή περισσότερες ρωγμές από γειτονικές κοπές φτάσουν η μία την άλλη ή όταν φτάσουν την ελεύθερη επιφάνεια,

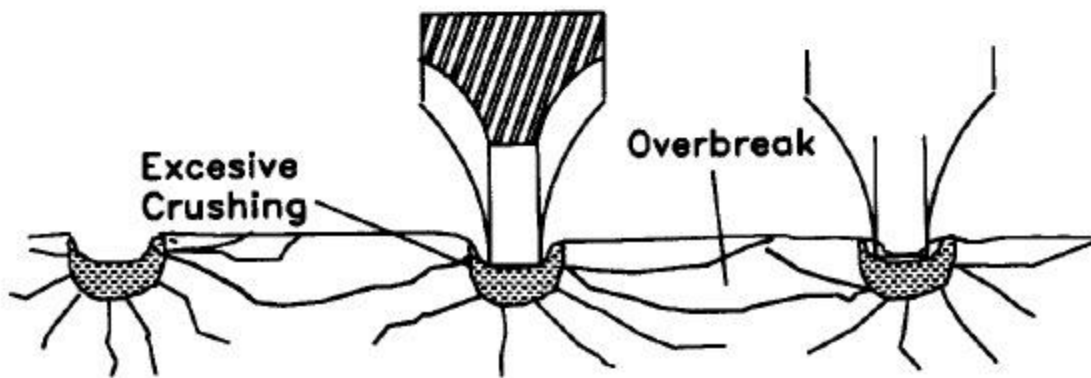
δημιουργούνται θραύσματα. Το μήκος των ρωγμών είναι συνάρτηση της πίεσης στη ζώνη σύνθλιψης, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση της δύναμης ώσης που ασκείται στο κοπτικό. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών εξαρτάται από τη μεταξύ τους απόσταση, τη γωνία και τη διάδοση των ρωγμών ανάμεσα στις γειτονικές κοπές. Σύμφωνα με τις αρχές της θραυστομηχανικής, μία ρωγμή μπορεί να διαδοθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση προσφέρει την ελάχιστη ενέργεια και μέχρις ότου η συγκέντρωση τάσης είναι υψηλότερη από τον κρίσιμο συντελεστή συγκέντρωσης τάσης του πετρώματος. Η διάδοση αυτή μπορεί να συνεχιστεί μέχρις ότου η τάση πέσει κάτω από την οριακή τιμή ή η ρωγμή συναντήσει μία ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να δημιουργηθούν θραύσματα από ρωγμές υπό οποιαδήποτε γωνία. Κατά συνέπεια, μπορούν να εξηγηθούν τα φαινόμενα του σχηματισμού «γέφυρας» άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των αυλακών κοπής (ridge formation) και του υπερβολικού θρυμματισμού του πετρώματος (overbreak) υπό την επίδραση διαφορετικών φορτίων. Στην περίπτωση του σχηματισμού «γέφυρας», οι ρωγμές επεκτείνονται μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια και σχηματίζουν μικρά τριγωνικά θραύσματα. Αυτό προκαλεί πτώση της πίεσης στη ζώνη σύνθλιψης και εμποδίζει την περαιτέρω διάδοση των ρωγμών προς τις γειτονικές κοπές, αφήνοντας το πέτρωμα μεταξύ τους σχεδόν ανέπαφο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14 (α). Η διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί μέχρις ότου στις επόμενες κοπές, με μεγαλύτερα φορτία, δύο από τις ρωγμές μπορέσουν να αλληλεπιδράσουν και να σχηματίσουν θραύσμα. Αν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι πολύ υψηλό, μπορούν να αναπτυχθούν μεγαλύτερες ρωγμές και να συναντηθούν υπό γωνία, δημιουργώντας υπερβολικό θρυμματισμό του πετρώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14 (β). Για τη βέλτιστη απόσταση μεταξύ γειτονικών κοπών (optimum spacing), οι ρωγμές επεκτείνονται ιδανικά προς τις γειτονικές κοπές πάνω σε ευθεία γραμμή, η οποία είναι η μικρότερη απόσταση για τη δημιουργία θραύσματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14 (c) (Rostami and Ozdemir 1993).



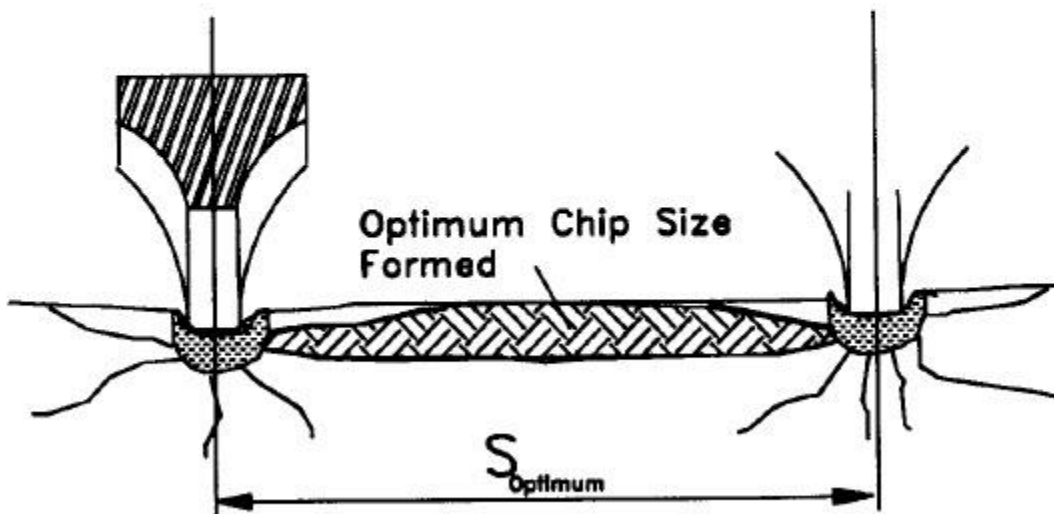
Σχήμα 3.13. Απλοποιημένο πεδίο τάσεων (υδροστατικό) της ζώνης σύνθλιψης και δημιουργία θραυσμάτων (Rostami and Ozdemir 1993).



a. Ridge formation due to lack of pressure and length of cracks



b. Over break due to excessive loading and longer cracks.



c. Normal cutting with optimum crack length and direction.

Σχήμα 3.14. Δημιουργία θραυσμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες (Rostami and Ozdemir 1993).

Υπολογισμοί

Αφού θεωρείται ότι υπάρχει ομοιόμορφο πεδίο τάσεων στη ζώνη σύνθλιψης γύρω από την κοπτική αιχμή, οι πλάγιες δυνάμεις μπορούν να παραλειφθούν, καθώς οι πιέσεις στις δύο πλευρές του κοπτικού τείνουν να αλληλοαναιρευθούν. Η κατανομή των πιέσεων κατά μήκος της περιφέρειας του κοπτικού δίσκου (στη διεπιφάνεια κοπτικού-πετρώματος) θεωρείται ότι είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15 (α). Η περιοχή της αλληλεπίδρασης μπορεί να καθοριστεί από τη γωνία φ , η οποία υπολογίζεται από τη διάμετρο D του δίσκου και το βάθος κοπής ως εξής:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{R-p}{p} \right) \quad (3.45)$$

Όπου R : ακτίνα του δίσκου ($=D/2$)
 p : βάθος κοπής

Το μέγεθος της πίεσης, P , σε οποιοδήποτε σημείο είναι συνάρτηση της γωνίας θ και της μέγιστης πίεσης P' , βάσει της σχέσης:

$$P = P' \left(1 - \frac{\theta}{\varphi} \right)^\psi \quad (3.46)$$

Όπου P' : μέγιστη πίεση
 θ : γωνία από την κάθετη στο σημείο, η οποία κυμαίνεται από 0 έως φ

Η σχέση (3.46) δίνει διαφορετικές κατανομές πιέσεων καθώς το ψ αλλάζει. Για γραμμική κατανομή, με ελάχιστη τιμή το 0 μπροστά από το δίσκο και μέγιστη την P' κάτω από αυτόν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15 (α), λαμβάνεται $\psi=1$. Η μείωση της τιμής του ψ αυξάνει το λόγο των δυνάμεων κύλισης προς τις δυνάμεις ώσης, ο οποίος ορίζεται ως συντελεστής κοπής (Cutting Coefficient-CC). Οι δυνάμεις ώσης και κοπής, F_n και F_r , είναι οι συνιστώσες της συνισταμένης δύναμης F_t στους άξονες X και Y , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15. Η γωνία που σχηματίζει η συνισταμένη δύναμη με τον άξονα Y , β , μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του συντελεστή κοπής ως εξής:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F_r}{F_n} \right) = \tan^{-1}(CC) \quad (3.47)$$

Οι τιμές των F_n και F_r για γραμμική κατανομή πιέσεων, με $\psi=1$, μπορούν να υπολογιστούν, με βάση το σχήμα 3.15 (α), ως εξής:

$$dF = TPRd\theta = TRP' \left(1 - \frac{\theta}{\varphi} \right) d\theta \quad (3.48)$$

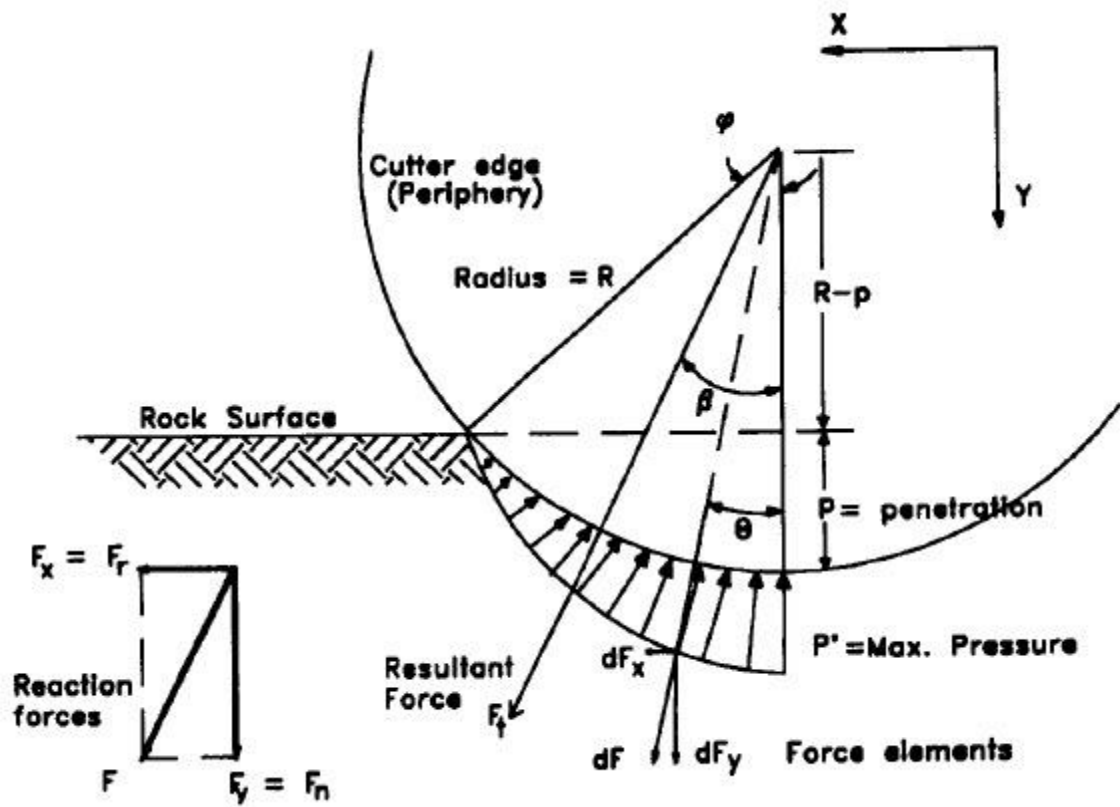
$$F_n = F_y = \int_0^\varphi dF_y = \int_0^\varphi dF \cos\theta = \frac{TRP'}{\varphi} (1 - \cos\varphi) \quad (3.49)$$

$$F_r = F_x = \int_0^\varphi dF_x = \int_0^\varphi dF \sin\theta = \frac{TRP'}{\varphi} (\varphi - \sin\varphi) \quad (3.50)$$

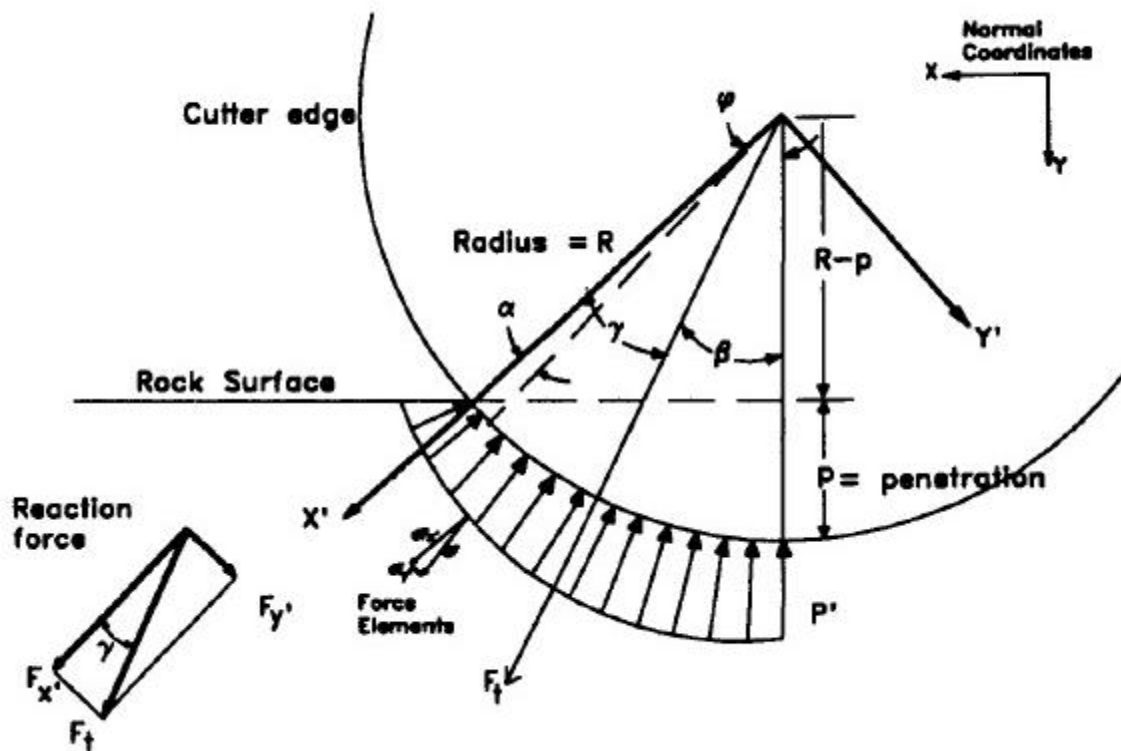
Όπου T : πλάτος αιχμής του κοπτικού

Άρα, ο συντελεστής κοπής για γραμμική κατανομή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$CC = \frac{\varphi - \sin\varphi}{1 - \cos\varphi} \quad (3.51)$$



α. Γραμμική κατανομή πιέσεων ($\psi=1$).



β. Γενική μορφή της κατανομής πιέσεων ($\psi \neq 1$).

Σχήμα 3.15. Κατανομή πιέσεων κατά μήκος της περιφέρειας κοπτικού δίσκου (Rostami and Ozdemir 1993).

Προκειμένου να οριστούν οι δυνάμεις κοπής και ο CC στη γενική περίπτωση όπου $\psi \neq 1$, χρησιμοποιείται νέο σύστημα συντεταγμένων για την απλοποίηση των υπολογισμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15 (β). Χρησιμοποιώντας τη νέα γωνία α , η σχέση 3.46 μεταβάλλεται σε:

$$P = P' \left(\frac{\alpha}{\varphi} \right)^\psi \quad (3.52)$$

Συνεπώς οι συνιστώσες δυνάμεις στο νέο σύστημα υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$dF = TPR \cdot d\alpha = TRP' \left(\frac{\alpha}{\varphi} \right)^\psi d\alpha = \frac{TRP'}{\varphi} t^\psi dt \quad (3.53)$$

Όπου t : μεταβλητή που αντικαθιστά το λόγο $\frac{\alpha}{\varphi}$

$$F_{y'} = \int_0^\varphi dF_{y'} = \int_0^\varphi dF \sin \alpha \quad (3.54)$$

$$F_{x'} = \int_0^\varphi dF_{x'} = \int_0^\varphi dF \cos \alpha \quad (3.55)$$

Τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης είναι:

$$F_{x'} = \sum_1^n (-1)^{i-1} \frac{\varphi^{2i-1+\psi}}{(2i-1+\psi)(2i-2)!} \quad (3.56)$$

$$F_{y'} = \sum_0^n (-1)^{i-1} \frac{\varphi^{2i-1+\psi}}{(2i-1+\psi)(2i-2)!} \quad (3.57)$$

Η γωνία της συνισταμένης δύναμης, γ , είναι: $\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{F_{y'}}{F_{x'}} \right) \quad (3.58)$

Η γωνία αυτή σχετίζεται με την β και τον CC ως εξής:

$$CC = \tan \beta = \tan(\varphi - \gamma) \quad (3.59)$$

Οι τιμές του συντελεστή κοπής εξαρτώνται από τη γωνία φ και την κατανομή πιέσεων και έχουν μετρηθεί από δοκιμές κοπής σε διαφορετικού τύπου πετρώματα και με διαφορετικά κοπτικά. Τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να συγκριθούν με τις μετρούμενες τιμές, για την επικύρωση του τύπου της κατανομής πιέσεων που επιλέγεται κάθε φορά. Στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως η γραμμική κατανομή, αλλά με βάση τα δεδομένα των δοκιμών, η ομοιόμορφη κατανομή είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Γενικά η τιμή του ψ εξαρτάται από το σχήμα της αιχμής του κοπτικού δίσκου. Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηδενική τιμή του ψ ($\psi=0$), για χρήση κοπτικού δίσκου με αιχμή πλάτους περίπου 12.5mm (0.5 in). Έτσι, για $\psi=0$ λαμβάνεται:

$$\beta = \frac{\varphi}{2} \quad \text{και} \quad CC = \tan \frac{\varphi}{2} \quad (3.60)$$

Οι δυνάμεις κοπής F_n και F_r σε lbs προσδιορίζονται με χρήση της συνολικής δύναμης F_t και του CC ή β , ως εξής:

$$F_t = \frac{P'RT\phi}{\psi + 1} \quad (3.61)$$

$$F_n = F_t \cdot \cos\beta \quad (3.62)$$

$$F_r = F_t \cdot \sin\beta \quad (3.63)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις, όλες οι μεταβλητές είναι γνωστές εκτός από την P' , η οποία είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της κοπής και των ιδιοτήτων του πετρώματος. Η συσχέτιση των μετρούμενων δυνάμεων κοπής με τις παραμέτρους κοπής χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πίεσης P' . Για το σκοπό αυτό εκτελούνται εργαστηριακές δοκιμές κοπής, σε διαφορετικά πετρώματα και με διαφορετικές γεωμετρίες κοπής και χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων η οποία προκύπτει. Αυτή η βάση δεδομένων περιλαμβάνει την εκτιμώμενη πίεση P' (από τις μετρούμενες δυνάμεις), την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κοπών και το βάθος κοπής, τη διάμετρο του δίσκου και το πλάτος της αιχμής του και τις αντοχές του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και εφελκυσμό. Με παλινδρόμηση των δεδομένων προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για την εκτίμηση της P' σε psi.

$$P' = -32628 + 521\sigma_c^{0.5} \quad (R^2 = 52.5\%) \quad (3.64)$$

$$P' = 103400 + 4200S - 7.37\sigma_i + 2.48\sigma_c - 1260p - 21030T - 11740R \quad (R^2 = 78\%) \quad (3.65)$$

$$P' = 100500 + 12170S + 7.88\sigma_c - 28830\sigma_i^{0.1} - 192S^3 - 0.000147\sigma_c^2 - 29450T - 13000R \quad (R^2 = 86.5\%) \quad (3.66)$$

Όπου σ_c : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος (psi)

σ_i : αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος (psi)

S: απόσταση μεταξύ των κοπών (in)

T: πλάτος αιχμής του δίσκου (in)

R: ακτίνα του δίσκου (in)

p: βάθος κοπής (in)

(R^2 : συντελεστής προσαρμογής της κάθε σχέσης)

Οι ανωτέρω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλόγως με τον αριθμό των διαθέσιμων παραμέτρων και τον επιθυμητό βαθμό ακριβείας. Το εύρος εφαρμογής των σχέσεων εξαρτάται από το εύρος τιμών των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση. Έτσι, το εύρος εφαρμογής για τις διάφορες μεταβλητές είναι:

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη: 70-200 MPa

Αντοχή σε εφελκυσμό: 4-18 MPa

Ακτίνα του δίσκου: 39-45 cm (15-18 in)

Απόσταση μεταξύ των κοπών: 5-15 cm

Βάθη κοπής: 0.25-3 cm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ TBM

Τα τελευταία 40 χρόνια, έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες και έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για την εκτίμηση της επίδοσης των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machines-TBM). Γενικά, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, εμπειρικά και ημιεμπειρικά μοντέλα. Τα πρώτα βασίζονται κατά κύριο λόγο στην επίδοση που επιτυγχάνει ένα TBM στο πεδίο, ως ενιαίο σύστημα, ενώ τα δεύτερα στην εκτίμηση των δυνάμεων κοπής που ασκούνται ξεχωριστά σε κάθε κοπτικό δίσκο. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της και ελαφρώς διαφορετικό πεδίο εφαρμογής. (Rostami et al. 1996)

4.1. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης της επίδοσης των TBM βασίζονται σε υπάρχουσες καταγραφές της επίδοσης τους στο πεδίο, σε διάφορους τύπους πετρωμάτων. Τα μοντέλα είναι ένα σύνολο εμπειρικών γραφημάτων και εξισώσεων, που λαμβάνονται με παλινδρόμηση και συσχέτιση μεταξύ των ιδιοτήτων του πετρώματος, των γεωλογικών συνθηκών, των παραμέτρων του μηχανήματος και του ρυθμού προχώρησης (Advance Rate-AR). Η σπουδαιότητα των μεθόδων αυτών έγκειται στο γεγονός ότι αντιμετωπίζει τις γεωλογικές συνθήκες και το σύστημα εξόρυξης ως ενιαίο σύνολο, παρά την πολυπλοκότητά τους. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι επιπτώσεις των ιδιοτήτων του πετρώματος, των γεωλογικών συνθηκών, των παραμέτρων του μηχανήματος και των λειτουργικών και πρακτικών περιορισμών έχουν ήδη ληφθεί υπόψη. Οι εκτιμήσεις των εμπειρικών μεθόδων είναι ευρέως αποδεκτές και για την παρούσα τεχνολογία είναι πολύ αξιόπιστες. Όμως το γεγονός ότι βασίζονται στα ήδη υπάρχοντα στοιχεία περιορίζει την ικανότητα των προβλέψεων, στο βαθμό που τα νέα συστήματα εξόρυξης διαφέρουν από τα παλαιότερα. Με άλλα λόγια, με την ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας των μηχανημάτων, περιορίζεται η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων αυτών (Rostami et al. 1996).

Μερικές από τις πιο διαδεδομένες εμπειρικές μεθόδους είναι η νορβηγική μέθοδος (Norwegian method-NTH) (Listrud 1988, NTH 1995, Bruland et al.1994), η μέθοδος ολικής σκληρότητας (Total Hardness) (Tarkoy 1975) και η μέθοδος Nelson (Nelson et al. 1985). Από τις προαναφερθείσες μεθόδους, η NTH είναι η ευρύτερα αποδεκτή και αξιόπιστη και χρησιμοποιείται από την κατασκευαστική βιομηχανία, ειδικά στην Ευρώπη. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε το 1975 και ενημερώνεται συνεχώς, καθώς περισσότερα έργα ολοκληρώνονται. Δεδομένα από 33 έργα της Νορβηγίας και 230 km σηράγγων συνολικά έχουν ήδη καταγραφεί. Σε αυτά έχουν προστεθεί δεδομένα από έργα σε άλλες χώρες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο NTH (1994).

4.1.1. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΝΤΗ

Στην εμπειρική μέθοδο ΝΤΗ ο στιγμιαίος ρυθμός κοπής (Instantaneous Cutting Rate ή Net Cutting Rate – ICR) του TBM εξαρτάται από τις ιδιότητες της βραχομάζας και τις παραμέτρους του μηχανήματος, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Παράμετροι της βραχομάζας και του μηχανήματος (ΝΤΗ 1994).

Παράμετροι της βραχομάζας	Παράμετροι του μηχανήματος
- Ασυνέχειες	- Ωση (thrust)
- Δείκτης ρυθμού διάτρησης (Drilling Rate Index - DRI)	- Ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής (rpm)
- Αποξεστικότητα (Cutter Life Index-CLI)	- Απόσταση μεταξύ των κοπτικών (spacing)
- Πορώδες (porosity)	- Μέγεθος και σχήμα των κοπτικών
	- Εγκατεστημένη Ισχύς (power)

ι) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

α) Βαθμός ρωγμάτωσης (Degree of fracturing)

Ο βαθμός ρωγμάτωσης της βραχομάζας είναι η πιο σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό του βάθους κοπής, στη διάνοιξη σήραγγων. Εδώ, με τον όρο «βαθμός ρωγμάτωσης» εννοούνται οι ασυνέχειες με εμμόνη, οι διακλάσεις χωρίς εμμόνη, με μικρή ή χωρίς διατμητική αντοχή κατά μήκος των επιπέδων ασυνέχειας και τα επίπεδα στρώσης. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίπτωση στο βάθος κοπής και άρα και στο στιγμιαίο ρυθμό κοπής.

Ο βαθμός ρωγμάτωσης της βραχομάζας χαρακτηρίζεται από τον τύπο και την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών και τη γωνία που σχηματίζει ο άξονας της σήραγγας με τα επίπεδα ασυνέχειας.

Ασυνέχειες (Joints) (S_p): Περιλαμβάνονται οι ασυνέχειες με εμμόνη που συναντώνται καθ' όλο το μήκος της σήραγγας. Μπορούν να είναι ανοιχτές ή πληρωμένες με άργιλο ή μικρής αντοχής ορυκτά, όπως ο ασβεστίτης και ο χλωρίτης.

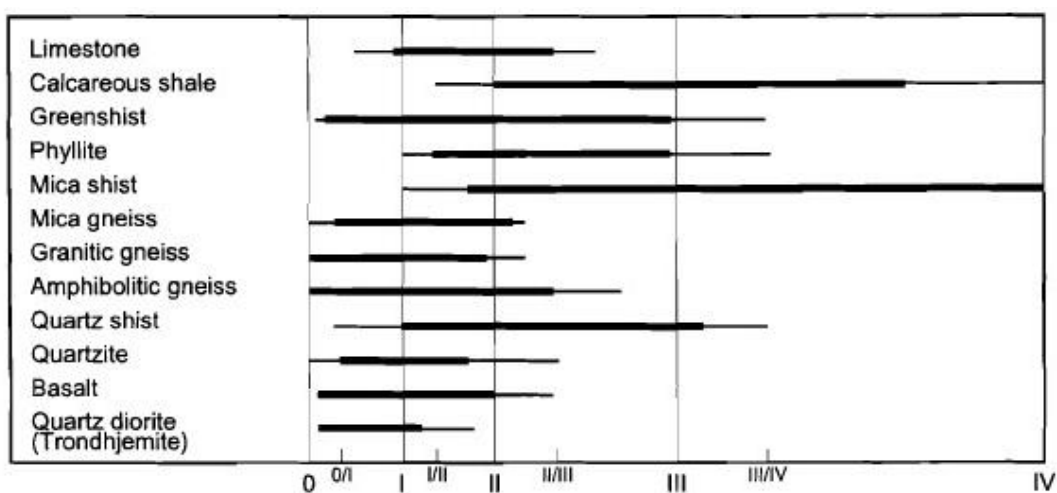
Διακλάσεις (Fissures) (S_f): Περιλαμβάνονται οι διακλάσεις χωρίς εμμόνη (συναντώνται τμηματικά κατά μήκος της σήραγγας), οι πληρωμένες διακλάσεις με χαμηλή διατμητική αντοχή και τα επίπεδα στρώσης.

Ομογενής βραχομάζα (κατηγορία 0): Περιλαμβάνει συμπαγή βράχο χωρίς ασυνέχειες. Βραχομάζα με πληρωμένες ασυνέχειες με υψηλή διατμητική αντοχή (π.χ. ασυνέχειες πληρωμένες με χαλαζία ή επίδοτο) μπορεί να ταξινομηθεί σε αυτήν την κατηγορία.

Οι κατηγορίες της ρωγμάτωσης, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, βασίζονται στον τύπο και την απόσταση μεταξύ των επιπέδων ασυνέχειας. Το σχήμα 4.1 απεικονίζει τους καταγεγραμμένους βαθμούς ρωγμάτωσης για διάφορα πετρώματα.

Πίνακας 4.2. Κατηγορίες της ρωγμάτωσης και οι αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ των επιπέδων ασυνέχειας (NTH 1994).

Κατηγορίες της ρωγμάτωσης (joints S_p / fissures S_f)	Απόσταση μεταξύ των επιπέδων ασυνέχειας (cm)
0	-
0-I	160
I-	80
I	40
II	20
III	10
IV	5



Σχήμα 4.1. Βαθμοί ρωγμάτωσης για διάφορα πετρώματα (NTH 1994).

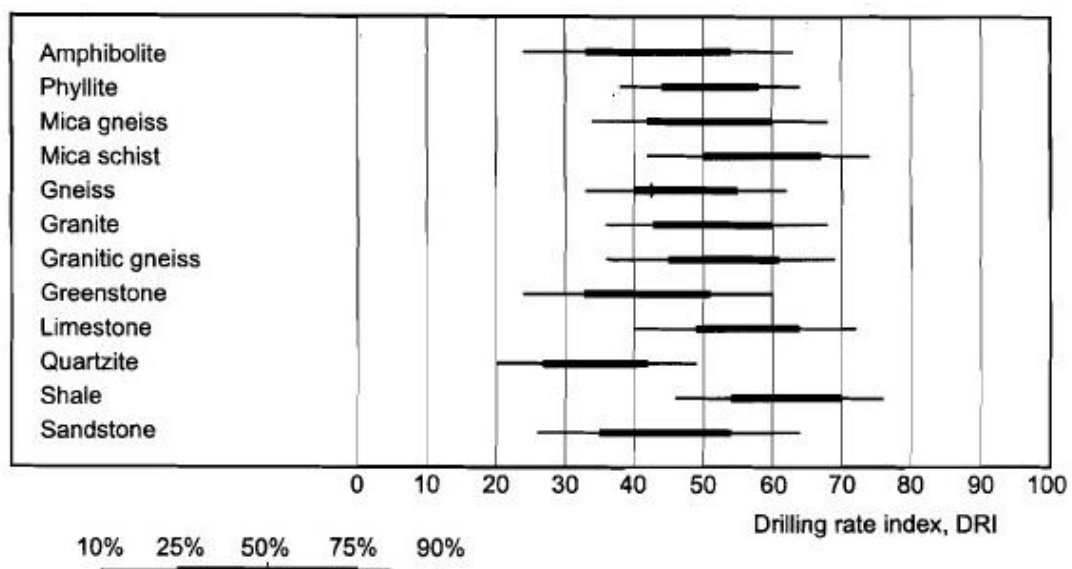
β) Βαθμός ευκολίας διάτρησης του πετρώματος (Rock Drillability)

Οι βασικές δοκιμές της μεθόδου NTH είναι οι εξής:

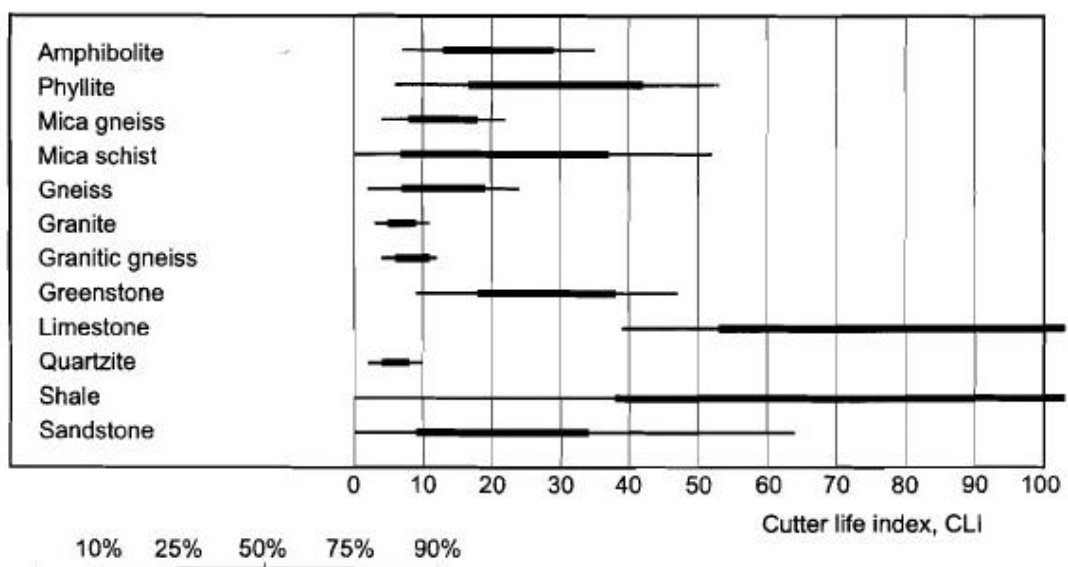
- Δοκιμή ψαθυρότητας “S₂₀”.
- Πρότυπη δοκιμή διάτρησης κατά Sievers “S_j”.
- Δοκιμή αποξεστικότητας “AV”.

Από τους δείκτες που προκύπτουν από τις ανωτέρω δοκιμές και με χρήση των αντίστοιχων γραφημάτων προκύπτουν ο δείκτης ρυθμού διάτρησης (Drilling Rate Index–DRI), ο δείκτης διάρκειας χρήσης ή χρόνου αντικατάστασης κοπτικού (Cutter Life Index-CLI) και ο δείκτης φθοράς κοπτικού άκρου (Bit Wear Index-BWI).

Ο βαθμός ευκολίας διάτρησης του πετρώματος εκτιμάται βάσει των δεικτών DRI και CLI. Η διακύμανση των δεικτών DRI και CLI για διάφορα πετρώματα φαίνεται στα σχήματα 4.2 και 4.3 αντίστοιχα (τα δεδομένα είναι από σήραγγες της Νορβηγίας).



Σχήμα 4.2. Διακύμανση του δείκτη DRI για διάφορα πετρώματα (NTH 1994).

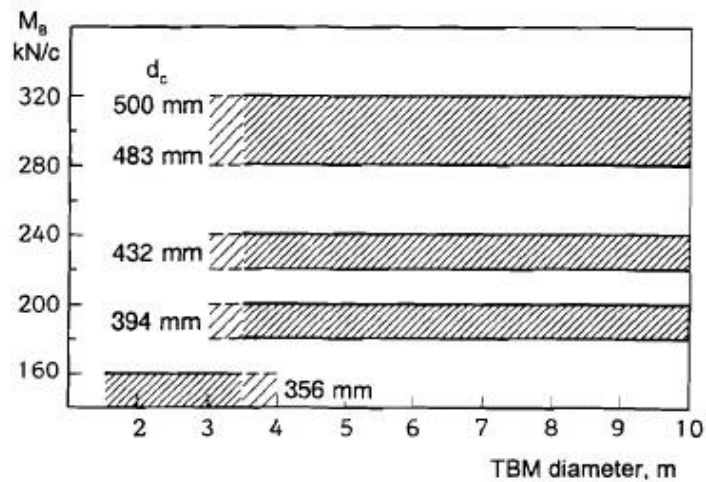


Σχήμα 4.3. Διακύμανση του δείκτη CLI για διάφορα πετρώματα (NTH 1994).

ii) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ

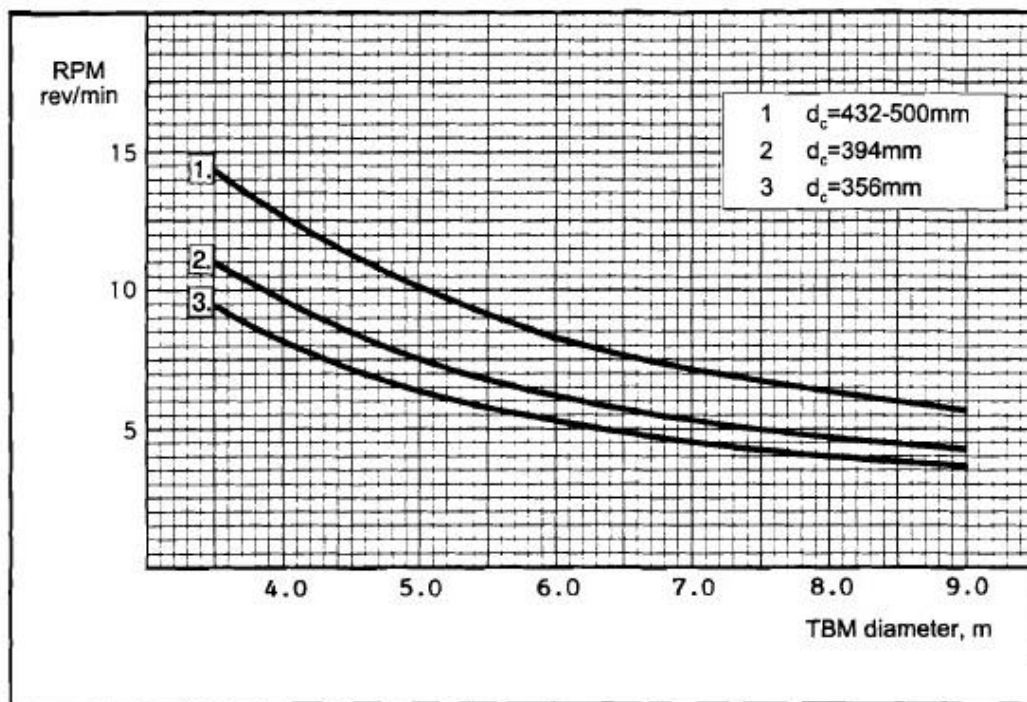
Για την εκτίμηση του ρυθμού προχώρησης απαιτούνται οι παράμετροι του μηχανήματος. Σε πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού, οι παράμετροι πρέπει να εκτιμηθούν κατά προσέγγιση.

Το σχήμα 4.4 δίνει μια γενική προσέγγιση της μέγιστης μέσης ώσης ανά κοπτικό δίσκο (M_B), συναρτήσει της διαμέτρου του δίσκου (d_c) και του TBM.



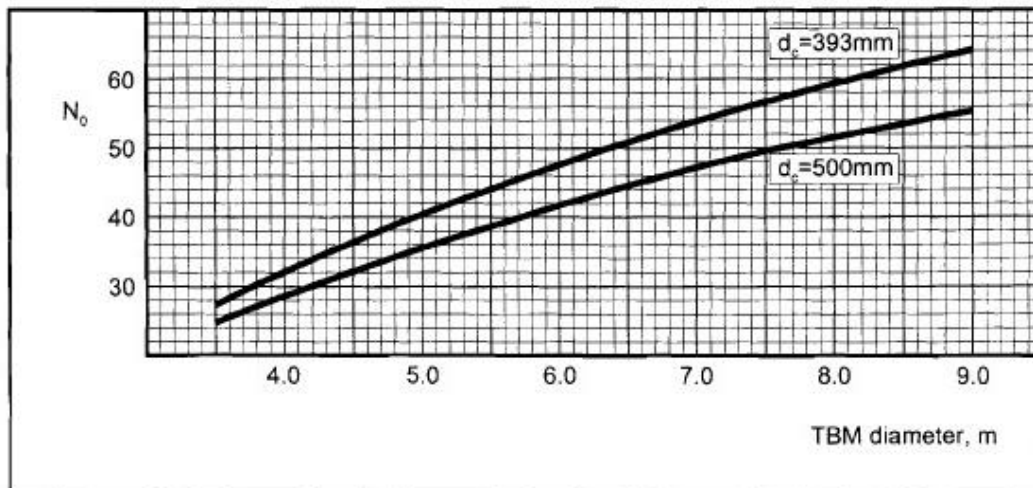
Σχήμα 4.4. Συνιστώμενη μέγιστη μέση ώση ανά κοπτικό δίσκο (NTH 1994).

Η ταχύτητα περιστροφής (rpm) της κοπτικής κεφαλής είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του TBM. Το σχήμα 4.5 δείχνει την ταχύτητα περιστροφής (rpm) της κεφαλής, συναρτήσει της διαμέτρου του TBM και της διαμέτρου των δίσκων (d_c).



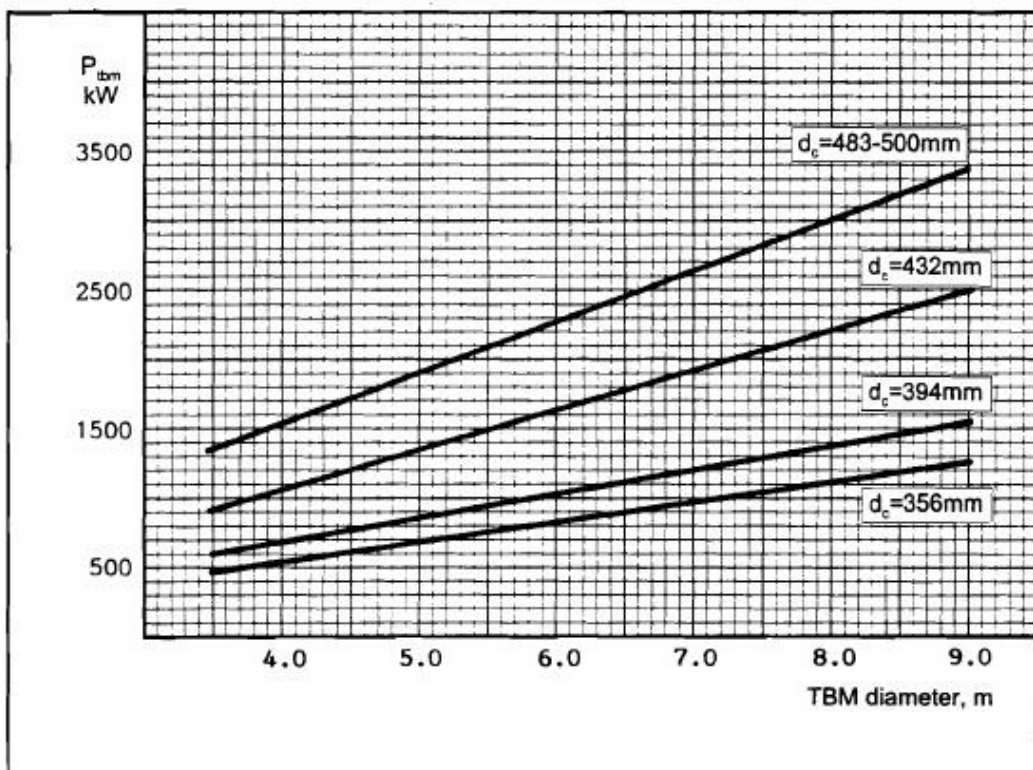
Σχήμα 4.5. Ταχύτητα περιστροφής (rpm) της κοπτικής κεφαλής (NTH 1994).

Το σχήμα 4.6 δείχνει τον αριθμό των κοπτικών δίσκων (N_c) της κεφαλής, συναρτήσει της διαμέτρου των δίσκων (d_c) και του TBM.



Σχήμα 4.6. Αριθμός των κοπτικών δίσκων της κοπτικής κεφαλής (NTH 1994).

Το σχήμα 4.7 δείχνει την εγκατεστημένη ισχύ της κεφαλής, συναρτήσει της διαμέτρου των δίσκων (d_c) και του TBM.



Σχήμα 4.7. Εγκατεστημένη ισχύς της κοπτικής κεφαλής (NTH 1994).

iii) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

α) Βαθμός ρωγμάτωσης

Ο βαθμός ρωγμάτωσης εκφράζεται από το συντελεστή ρωγμάτωσης k_s , ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο, την απόσταση των ασυνεχειών, καθώς και τη γωνία που σχηματίζει ο άξονας της σήραγγας με τα επίπεδα των ασυνεχειών, α .

Ο προσανατολισμός των επιφανειών ασυνέχειας (α) καθορίζεται από τις μετρήσεις της διεύθυνσης κλίσης (α_s) και της γωνίας κλίσης (α_f) ως εξής:

$$\alpha = \arcsin [\sin \alpha_f \cdot \sin(\alpha_t - \alpha_s)] \quad (^\circ) \quad (4.1)$$

Όπου α_s : διεύθυνση κλίσης

α_f : γωνία κλίσης

α_t : διεύθυνση του άξονα της σήραγγας

Ο συντελεστής ρωγμάτωσης (k_s), συναρτήσει της κατηγορίας ρωγμάτωσης και της γωνίας μεταξύ του άξονα της σήραγγας και των επιπέδων ασυνέχειας, φαίνεται στο σχήμα 4.8.

Για περισσότερες από μία οικογένειες ασυνεχειών ο συνολικός συντελεστής ρωγμάτωσης (k_{s-tot}) είναι:

$$k_{s-tot} = \sum_{i=1}^n k_{si} - (n-1) \cdot 0.36 \quad (4.2)$$

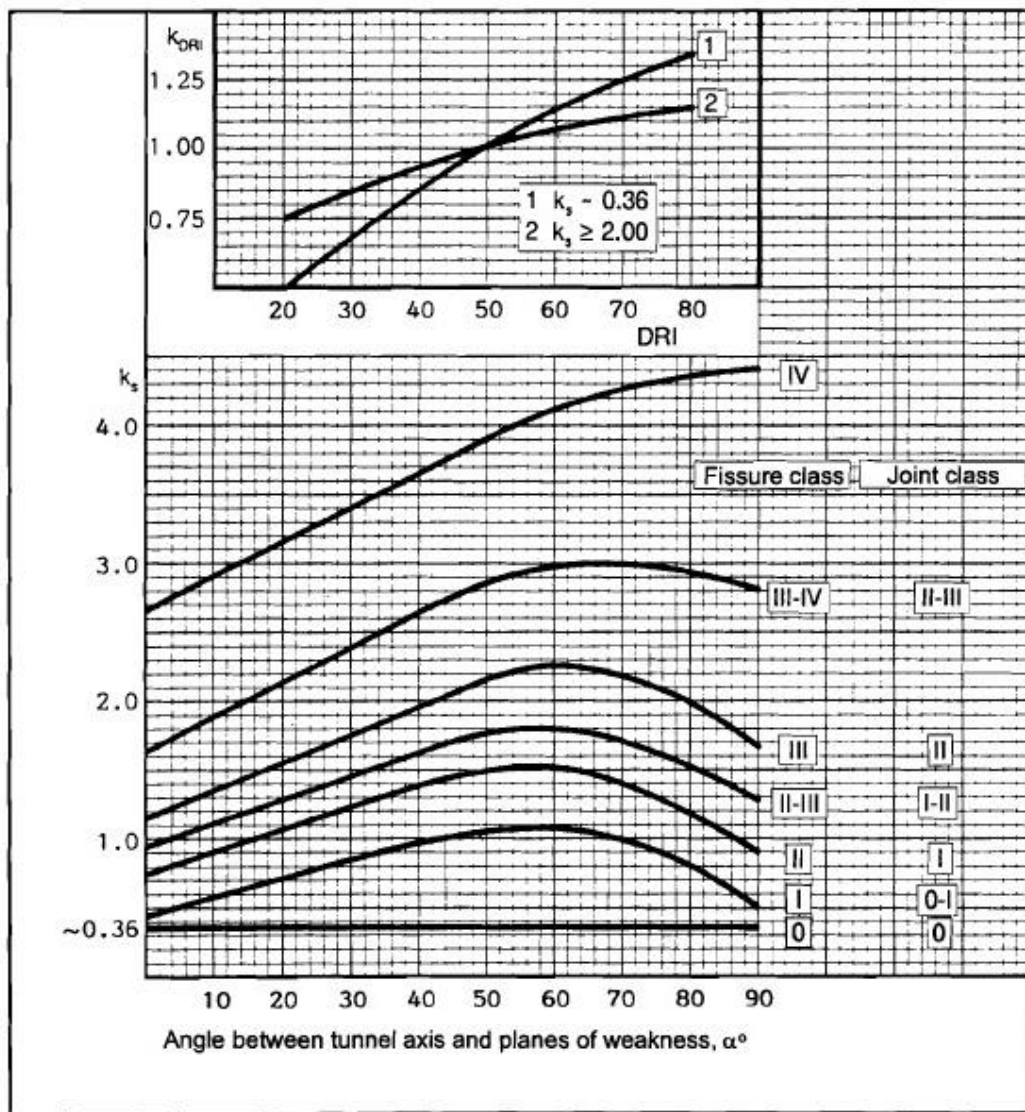
Όπου k_{si} : συντελεστής ρωγμάτωσης για την οικογένεια ασυνεχειών i

n : πλήθος των οικογενειών ασυνέχειας

Οι ιδιότητες της βραχομάζας εκφράζονται από τον ισοδύναμο συντελεστή ρωγμάτωσης (k_{ekv}):

$$k_{ekv} = k_{s-tot} \cdot k_{DRI} \quad (4.3)$$

Όπου k_{DRI} : συντελεστής διόρθωσης του DRI όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Συντελεστής ρωγμάτωσης (k_s) και συντελεστής διόρθωσης για $DRI \neq 49$ (NTH 1994).

β) Βάθος κοπής ανά περιστροφή

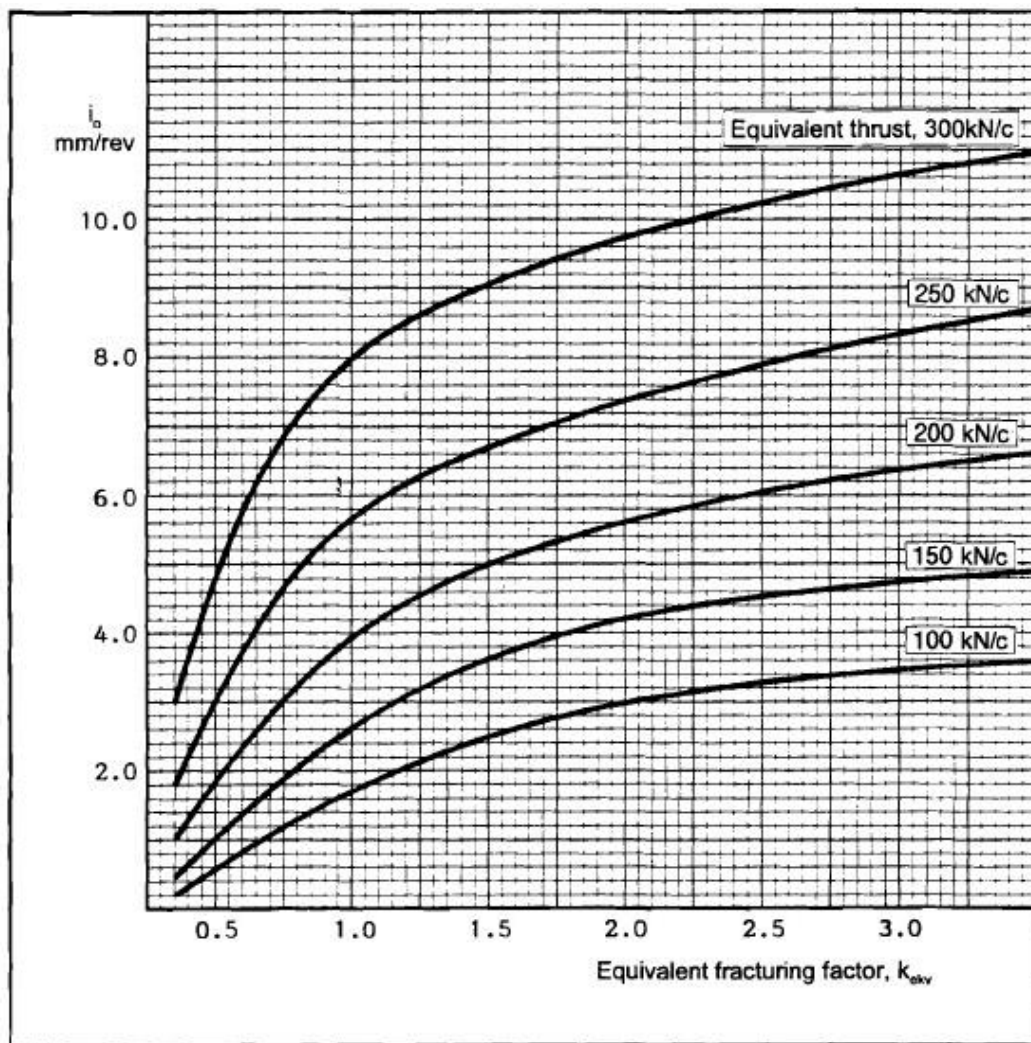
Το βάθος κοπής ανά περιστροφή (i_o) σε mm/rev συναρτήσεται της ισοδύναμης ώσης (equivalent thrust) και του ισοδύναμου συντελεστή ρωγμάτωσης (k_{ekv}) φαίνεται στο σχήμα 4.9. Για διάμετρο κοπτικών και μέση απόσταση μεταξύ των κοπτικών διαφορετική από του σχήματος 4.9, η ισοδύναμη ώση δίνεται από τη σχέση:

$$M_{ekv} = M_B \cdot k_d \cdot k_a \quad (\text{kN/cutter}) \quad (4.4)$$

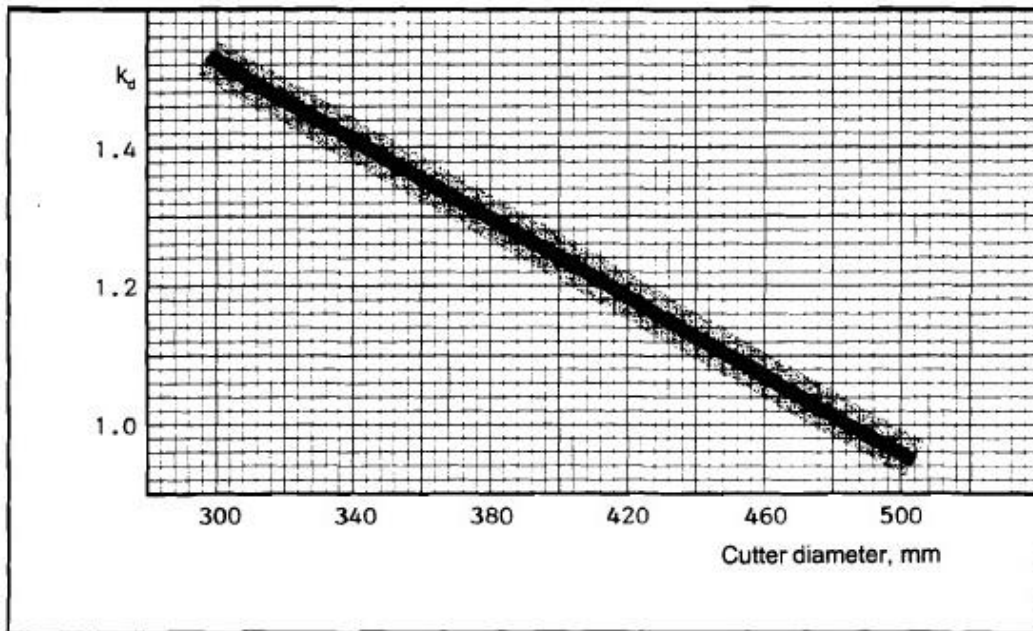
Όπου M_B : ώση ανά κοπτικό δίσκο

k_d : συντελεστής διόρθωσης της διαμέτρου του κοπτικού (δίνεται από το σχήμα 4.10)

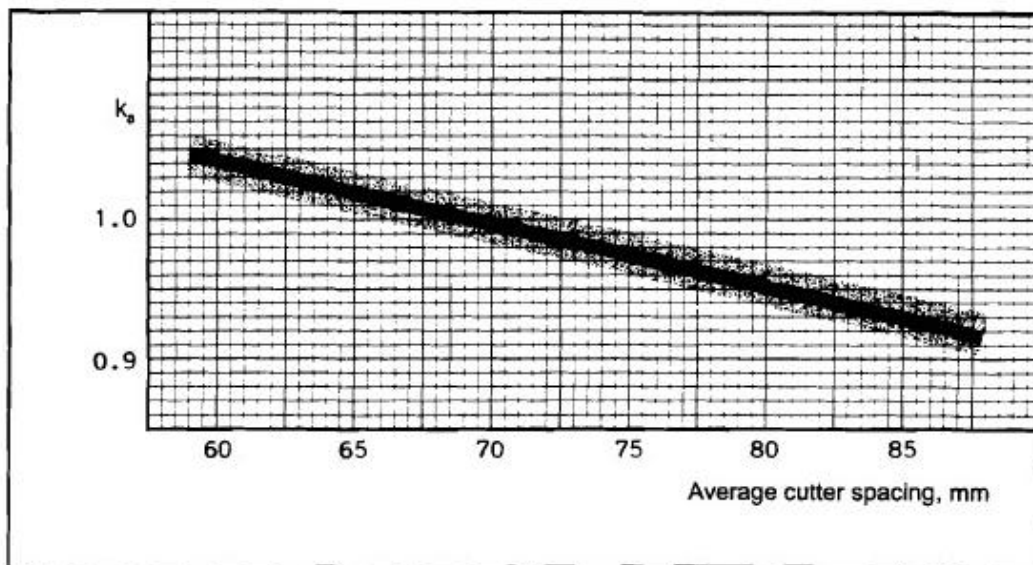
k_a : συντελεστής διόρθωσης της απόστασης μεταξύ των κοπτικών (δίνεται από το σχήμα 4.11)



Σχήμα 4.9. Βάθος κοπής ανά περιστροφή. $d_c=483\text{mm}$ και $a_c=70\text{mm}$ (NTH 1994).



Σχήμα 4.10. Συντελεστής διόρθωσης της διαμέτρου του κοπτικού για $d_c \neq 483\text{mm}$ (NTH 1994).



Σχήμα 4.11. Συντελεστής διόρθωσης της απόστασης μεταξύ των κοπτικών για $a_c \neq 70\text{mm}$ (NTH 1994).

γ) Στιγμαίος ρυθμός κοπής

Ο στιγμαίος ρυθμός κοπής (ICR) εκφράζεται σε m σήραγγας ανά ώρα και είναι συνάρτηση του βάθους κοπής ανά περιστροφή (i_o) και της ταχύτητας περιστροφής της κεφαλής (RPM).

$$I = i_o \cdot \text{RPM} \cdot \frac{60}{1000} \quad (\text{m/h}) \quad (4.5)$$

δ) Απαιτούμενη ροπή στρέψης (Torque Demand)

Για μεγάλη διείσδυση ή για διάνοιξη σε κατακερματισμένο πέτρωμα, πρέπει να ελέγχεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς της κοπτικής κεφαλής επαρκεί για τη χρησιμοποίηση της δύναμης ώσης. Εάν η εγκατεστημένη ισχύς δεν επαρκεί για την περιστροφή της κοπτικής κεφαλής σε δεδομένη διείσδυση, η μηχανή εξόρυξης περιορίζεται από τη ροπή στρέψης (torque limited). Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η ώση πρέπει να περιορίζεται μέχρι εκείνο το σημείο που η απαιτούμενη ροπή στρέψης είναι μικρότερη ή ίση της διαθέσιμης ροπής στρέψης.

Η απαιτούμενη ροπή στρέψης (T) δίνεται από τη σχέση:

$$T_n = 0.59 \cdot r_{\text{TBM}} \cdot N_{\text{TBM}} \cdot M_B \cdot k_c \quad (\text{kNm}) \quad (4.6)$$

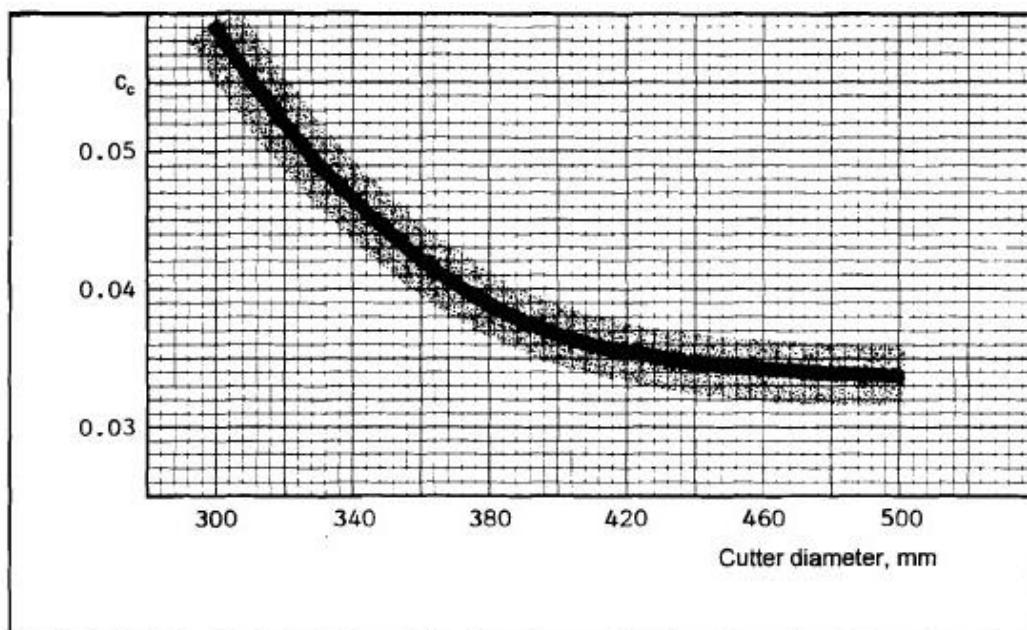
Όπου r_{TBM} : ακτίνα της κεφαλής του TBM

N_{TBM} : αριθμός των κοπτικών της κεφαλής

k_c : συντελεστής του δίσκου (αντίστασης στη κύλιση), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$k_c = c_c \cdot \sqrt{i_o} \quad (4.7)$$

Η σταθερά c_c συναρτήσει της διαμέτρου του δίσκου δίνεται από το σχήμα 4.12



Σχήμα 4.12. Σταθερά c_c (NTH 1994).

Η απαιτούμενη ισχύς (P_n) δίνεται από τη σχέση:

$$P_n = \frac{T_n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{RPM}}{60} \quad (\text{kW}) \quad (4.8)$$

4.2. ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η φιλοσοφία αυτών των μεθόδων είναι η εκτίμηση των δυνάμεων κοπής που ασκούνται ξεχωριστά σε κάθε κοπτικό δίσκο και στη συνέχεια, είτε ο καθορισμός της απαιτούμενης συνολικής ώσης, ροπής στρέψης και ισχύος της κοπτικής κεφαλής, είτε για δεδομένο μηχάνημα η εκτίμηση του μέγιστου δυνατού βάθους κοπής.

Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει μοντέλα για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής. Αν οι δυνάμεις κοπής μπορούν να προβλεφθούν για δεδομένες παραμέτρους κοπής (απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπτικών, βάθος κοπής, διάμετρος κοπτικών, πλάτος αιχμής κοπτικών) και τύπο πετρώματος, τότε είναι ασφαλής και η πρόβλεψη του ρυθμού προχώρησης και της απαιτούμενης ενέργειας κοπής. Κατά κανόνα ο ερευνητής, μετά την παραδοχή κάποιου μηχανισμού αστοχίας και γεωμετρίας κοπής, αναπτύσσει το μοντέλο πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής, το οποίο προκύπτει από το μηχανισμό αυτόν. Οι δυνάμεις κοπής μπορούν να προκαλούνται από την πίεση κάτω από το κοπτικό που απαιτείται για την πρόκληση αστοχίας σε εφελκυσμό (Sanio 1985, Rostami and Ozdemir 1993), από τις δυνάμεις που απαιτούνται για την δημιουργία θραύσματος λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του πετρώματος (Ozdemir and Miller 1976), ή από την αντίσταση του πετρώματος σε διείδυση που καθορίζεται από την αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη και τη διεπιφάνεια κοπτικού-πετρώματος (Roxborough and Phillips 1975). (Gertsch 2007)

Σύνοψη μερικών από τα μοντέλα για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής, από διάφορους ερευνητές, παρατίθεται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Μοντέλα πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής (Gertsch 2007).

Μοντέλο	Βάση πρόβλεψης της δύναμης ώσης Thrust force predictive basis	Απόσταση μεταξύ των κοπτικών και δύναμη κύλισης Spacing and Rolling force
Rostami and Ozdemir 1993 Μοντέλο πίεσης Pressure model	Κατανομή της πίεσης κάτω από το κοπτικό και διεπιφάνεια κοπτικού-πετρώματος.	Η απόσταση μεταξύ των κοπτικών λαμβάνεται υπόψη έμμεσα. Η δύναμη κοπής προβλέπεται από το συντελεστή κοπής και τη δύναμη ώσης.
Sanio 1985 Μοντέλο αστοχίας σε εφελκυσμό και πίεση Tensile failure-cutting pressure model	Η δύναμη ώσης πρέπει να δημιουργήσει μια ζώνη σύνθλιψης ικανή να δημιουργήσει ρωγμή, η οποία θα σχηματίσει θραύσμα	Η απόσταση είναι συνάρτηση του μήκους της ρωγμής που δημιουργεί θραύσμα. Η δύναμη κοπής είναι συνάρτηση της δύναμης ώσης, όταν η συνισταμένη δύναμη προκαλεί μηδενική ροπή στο κοπτικό.*
Ozdemir and Miller 1976 Μοντέλο αστοχίας σε διάτμηση Shear failure model	Η δύναμη ώσης δημιουργεί θραύσμα, λόγω αστοχίας σε διάτμηση.	Η απόσταση ελέγχει το πλάτος του θραύσματος και τη διατμητική δύναμη. Η δύναμη κοπής είναι συνάρτηση της δύναμης ώσης.
Roxborough and Phillips 1975 Μοντέλο αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη Compressive strength failure model	Η δύναμη ώσης είναι συνάρτηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και της διεπιφάνειας κοπτικού-πετρώματος.	Η απόσταση δε λαμβάνεται υπόψη Η δύναμη κοπής είναι συνάρτηση της δύναμης ώσης, όταν η συνισταμένη δύναμη προκαλεί μηδενική ροπή στο κοπτικό.*
* Θεωρείται ότι ο κοπτικός δίσκος περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από το κέντρο του και οι τριβές είναι αμελητέες, δηλαδή ότι η αντίσταση κύλισης είναι μηδενική.		

4.2.1. Η ΜΕΘΟΔΟΣ CSM

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο Colorado School of Mines από τον Rostami (1991, 1993) έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα έργα με μεγάλη επιτυχία.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της συνολικής δύναμης F_t και των δυνάμεων ώσης (F_n) και κύλισης (F_t), παρατίθενται στην παράγραφο 3.4, όπου παρουσιάζεται αναλυτικά η ανάπτυξη του μοντέλου.

Για την πρόβλεψη της επίδοσης TBM με τη μέθοδο CSM ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Υπολογισμός της συνολικά απαιτούμενης ώσης: $T_h^* = \sum_1^N F_n \approx N \cdot F_n$
2. Υπολογισμός της ροπής στρέψης: $T_q^* = \sum_1^N F_{ti} \cdot R_i \approx 0.3 \cdot D \cdot N \cdot F_t$
3. Υπολογισμός της ταχύτητας περιστροφής της κεφαλής: $RPM = \frac{V}{\pi \cdot D}$
4. Υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος της κεφαλής: $HP^* = \frac{T_q^* \cdot RPM}{5250}$
5. Υπολογισμός της εγκατεστημένης ώσης και ισχύος με χρήση του συντελεστή απόδοσης (δηλαδή $T_h = \frac{T_h^*}{n}$ και $HP = \frac{HP^*}{n}$).
6. Υπολογισμός του ρυθμού προχώρησης (Advance Rate-AR): $AR = RPM \cdot p \cdot f_u$

Όπου N : συνολικός αριθμός των κοπτικών

R_i : απόσταση του κοπτικού από το κέντρο της κεφαλής (ακτίνα του κύκλου πάνω στον οποίο κινείται το κοπτικό)

D : διάμετρος του TBM

V : μέγιστη γραμμική ταχύτητα των κοπτικών (π.χ. 150m/min για κοπτικά διαμέτρου 17')

n : συντελεστής απόδοσης του TBM

f_u : συντελεστής λειτουργίας του TBM

Όλες οι ανωτέρω παράμετροι υπολογίζονται βάσει των προβλεπόμενων δυνάμεων που δρουν στα κοπτικά, για δεδομένες παραμέτρους κοπής και ιδιότητες πετρώματος. Έτσι, με όλες τις παραμέτρους καθορισμένες και χρησιμοποιώντας συγκεκριμένο μηχάνημα, το βάθος κοπής (penetration rate) είναι η μόνη μεταβλητή η οποία μπορεί να αυξηθεί μέχρι να «φτάσει» ένα από τα όρια του μηχανήματος (ώση ή ροπή στρέψης/ισχύ). Για τον υπολογισμό του μέγιστου δυνατού βάθους κοπής του μηχανήματος έχει αναπτυχθεί ένα υπολογιστικό μοντέλο με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

5.1. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΟΡΘΟΓΝΕΥΣΙΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΟ ΤΥΠΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

Η εργαστηριακή δοκιμή κοπής των πετρωμάτων με κοπτικό τύπου δίσκου εκτελείται για τον προσδιορισμό:

- α) των δυνάμεων που δρουν επί του κοπτικού δίσκου. Οι δυνάμεις αυτές είναι οι δυνάμεις κύλισης (rolling), οι δυνάμεις ώσης (thrust) και οι πλευρικές (sideways) δυνάμεις.
- β) της ειδικής ενέργειας κοπής τους (Specific Energy). Ως ειδική ενέργεια κοπής ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη μονάδας συμπαγούς όγκου πετρώματος. Στο σύστημα SI οι μονάδες της είναι J/m^3 .
- γ) του βέλτιστου λόγου s/p (απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών/βάθος κοπής), για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι δυνάμεις κοπής χρησιμοποιούνται για το βέλτιστο σχεδιασμό της κοπτικής κεφαλής του TBM και γενικά του μηχανήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι κάθετες δυνάμεις παρέχουν την απαιτούμενη ώση, ώστε τα κοπτικά δίσκου του μηχανήματος να παραμένουν στο επιθυμητό βάθος κοπής και οι δυνάμεις κύλισης καθορίζουν την απαιτούμενη ροπή στρέψης και ισχύ του μηχανήματος ώστε να περιστρέφεται η κοπτική κεφαλή διατηρώντας τα κοπτικά της στο ορισμένο βάθος κοπής. Οι πλευρικές δυνάμεις είναι συνήθως τυχαίες. Εξαιρέση στον κανόνα αυτό αποτελούν τα περιφερειακά κοπτικά της κεφαλής (τα οποία εγκαθίστανται υπό γωνία), στα οποία οι πλευρικές δυνάμεις δρουν προς την περιφέρεια της σήραγγας. Τα κοπτικά αυτά συχνά υφίστανται σημαντικά πλευρικά φορτία λόγω της τοποθέτησής τους υπό γωνία (Cigla 2006).

5.1.1. Εργαστηριακός εξοπλισμός

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός της δοκιμής κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. περιλαμβάνει:

1) Μηχανή δοκιμής κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 5.1 και απαρτίζεται από:

α) Κυψέλη μέτρησης φορτίου (δυναμόμετρο) (Load cell). Είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο, αποτελεί τη διάταξη έδρασης του κοπτικού δίσκου και παρεμβάλλεται μεταξύ αυτού και του πλαισίου της μηχανής. Αποτελείται από 4 σκέλη (legs), σε κάθε ένα από τα οποία είναι προσαρμοσμένη μια πλήρης γέφυρα Wheatstone, αποτελούμενη από 4 strain gages, με την οποία καταγράφεται συνεχώς η παραμόρφωση κάθε σκέλους υπό την επίδραση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων. Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βαθμονόμηση (calibration) του δυναμόμετρου περιγράφεται στην παράγραφο 5.1.2.

β) Τράπεζα τοποθέτησης δοκιμίου. Με τη βοήθεια δύο χειροτροχών και μέσω υδραυλικού εμβόλου είναι δυνατή η εντός ορίων γραμμική μετακίνηση της τράπεζας κατά την κατακόρυφο και κατά την οριζόντιο, κάθετα στη διεύθυνση κοπής. Έτσι είναι δυνατή η ρύθμιση της θέσης της τράπεζας ώστε η κοπή να γίνεται στο επιθυμητό βάθος (p) και στην επιθυμητή οριζόντια απόσταση (s) από την προηγούμενη κοπή.

γ) Κοπτικό δίσκο διαμέτρου 12cm.

2) Σύστημα συλλογής και καταγραφής των μετρήσεων (Data Acquisition System (DAQ)) του οίκου HBM, στο οποίο γίνεται η κατάλληλη προσαρμογή του σήματος της μέτρησης (excitation-signal conditioning).

3) Ηλεκτρονικό Υπολογιστή και λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων (CATMAN του οίκου HBM) το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του συστήματος συλλογής και καταγραφής των μετρήσεων.



Σχήμα 5.1. Μηχανή δοκιμής κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.

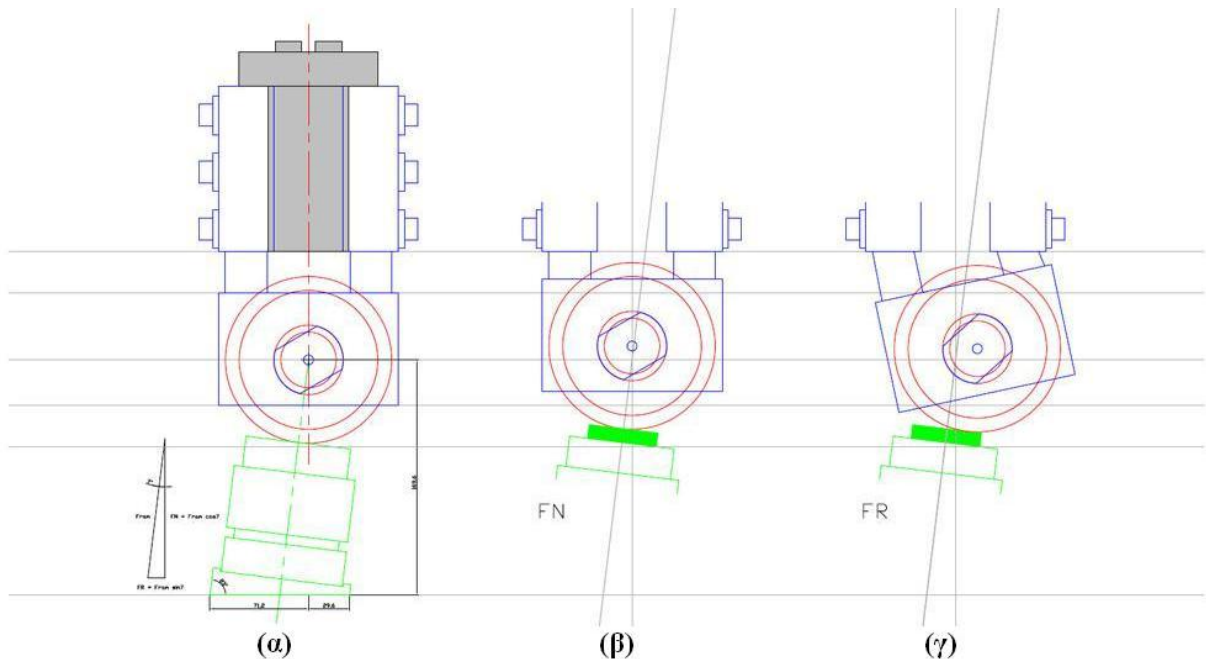
5.1.2. Βαθμονόμηση του δυναμόμετρου

Για τη βαθμονόμηση του δυναμόμετρου χρησιμοποιείται υδραυλική αντλία, έμβολο και μανόμετρο (Ekerman) του σχήματος 5.2 με δυναμικότητα φόρτισης 1000 bar (=100MPa). Το μανόμετρο που χρησιμοποιείται είναι βαθμονομημένο και πιστοποιημένο.

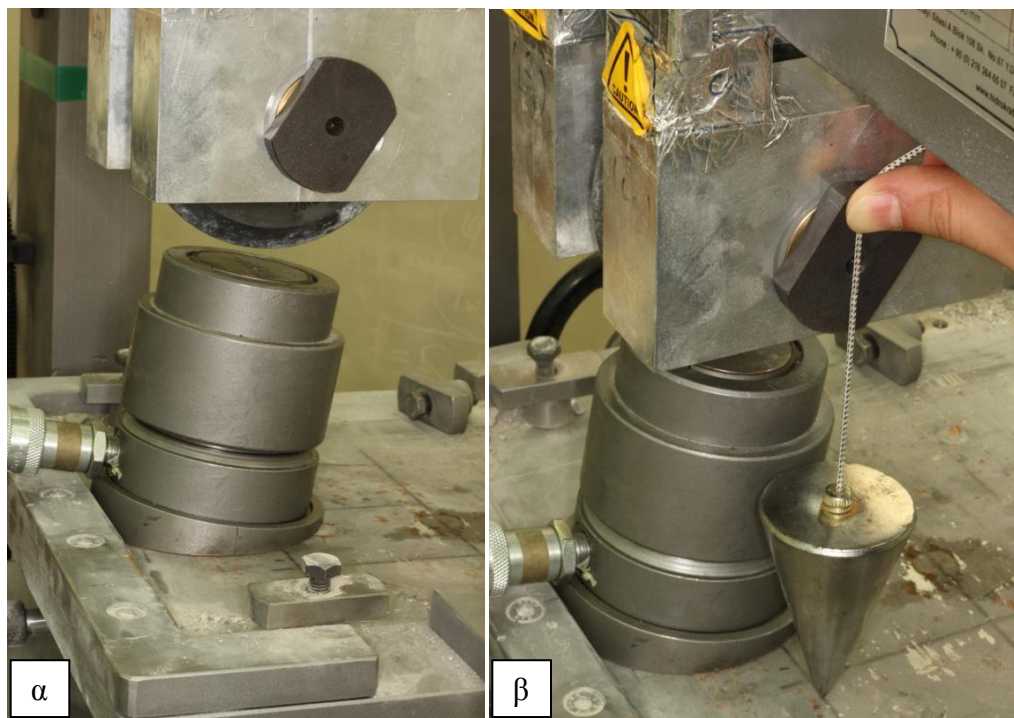


Σχήμα 5.2. Μανόμετρο (Ekerman) που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του δυναμόμετρου.

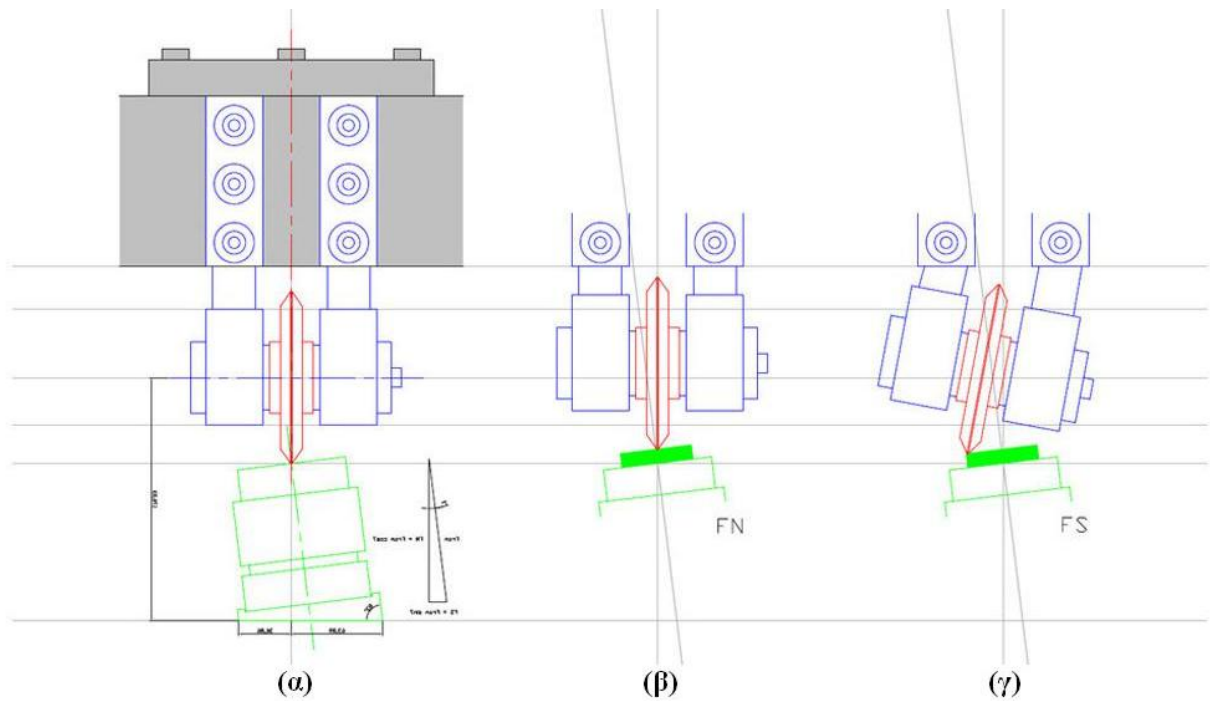
Για τη βαθμονόμηση της δύναμης ώσης F_N και της δύναμης κύλισης F_R , το έμβολο τοποθετείται όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3 (α) και 5.4 (α), ενώ για τη βαθμονόμηση της δύναμης ώσης F_N και της πλάγιας δύναμης F_S , τοποθετείται όπως φαίνεται στα σχήματα 5.5 (α) και 5.6. Και στις δύο περιπτώσεις η τοποθέτηση του εμβόλου γίνεται έτσι, ώστε η δύναμη να ασκείται στη διεύθυνση που διέρχεται από το κέντρο του κοπτικού δίσκου. Ο έλεγχος της σωστής τοποθέτησης του εμβόλου γίνεται με χρήση νήματος της στάθμης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 (β).



Σχήμα 5.3. Βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_R του δυναμόμετρου (Μιχαλακόπουλος).



Σχήμα 5.4. α) Τοποθέτηση του εμβόλου για τη βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_R . β) Έλεγχος της σωστής τοποθέτησης του εμβόλου με χρήση νήματος της στάθμης.



Σχήμα 5.5. Βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_S του δυναμόμετρου (Μιχαλακόπουλος).

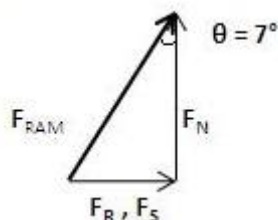


Σχήμα 5.6. Τοποθέτηση του εμβόλου για τη βαθμονόμηση (calibration) των δυνάμεων F_N και F_S .

Με γνωστή τη διάμετρο (50mm) και άρα την επιφάνεια του εμβόλου, είναι δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικά ασκούμενης δύναμης F_{RAM} στο κοπτικό. Η διεύθυνση στην οποία κινείται το έμβολο και άρα ασκείται η δύναμη F_{RAM} σχηματίζει γωνία 7° με την κατακόρυφο.

Επομένως, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7, η δύναμη F_{RAM} μπορεί να αναλυθεί σε:

- κάθετη δύναμη F_N και
- δύναμη κύλισης F_R ή πλάγια δύναμη F_S , ανάλογα με τη θέση του εμβόλου.



Σχήμα 5.7. Ανάλυση της ασκούμενης δύναμης F_{RAM} του εμβόλου.

Για κάθε μέτρηση πίεσης καταγράφονται οι ενδείξεις του κάθε σκέλους του δυναμόμετρου. Το άθροισμα των ενδείξεων των τεσσάρων σκελών αντιστοιχεί στη δύναμη ώσης F_N (divisions), όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3 (β) και 5.5 (β).

Η διαφορά των ενδείξεων των σκελών που βραχύνονται, από το άθροισμα των ενδείξεων των σκελών που εφελκύνονται, αντιστοιχεί:

- i) στη δύναμη κύλισης F_R (divisions), στην περίπτωση του σχήματος 5.3 (γ).
- ii) στην πλάγια δύναμη F_S (divisions), στην περίπτωση του σχήματος 5.5 (γ).

Υπολογίζονται οι λόγοι των ασκούμενων δυνάμεων F_N , F_R και F_S σε kN, προς τις αντίστοιχες F_N , F_R και F_S (divisions). Έτσι προκύπτουν οι τιμές $F_{N,cal}$, $F_{R,cal}$ και $F_{S,cal}$, όπως φαίνεται στους πίνακες 5.1 και 5.2.

Εκτελούνται 3 set μετρήσεων για τον υπολογισμό των $F_{N,cal}$ και $F_{R,cal}$, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στον πίνακα 5.3 και 4 set μετρήσεων για τον υπολογισμό των $F_{N,cal}$ και $F_{S,cal}$, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.1. Πρώτο set μετρήσεων για τον υπολογισμό των $F_{N,cal}$ και $F_{R,cal}$.

Pressure reading		True MPa	F_{RAM} kN	F_N kN	F_N divisions	$F_{N,cal}$ kN/divisions	F_R kN	F_R divisions	$F_{R,cal}$ kN/divisions
bar	MPa								
0	0	1.89	3.70	3.68	41.60	0.0884	0.45	8.22	0.0549
50	5	6.85	13.45	13.35	121.64	0.1098	1.64	25.67	0.0639
100	10	11.82	23.20	23.03	210.41	0.1095	2.83	44.96	0.0629
150	15	16.78	32.96	32.71	289.36	0.1130	4.02	62.63	0.0641
200	20	21.75	42.71	42.39	375.58	0.1129	5.20	82.91	0.0628
250	25	26.72	52.46	52.07	456.40	0.1141	6.39	106.89	0.0598
300	30	31.68	62.21	61.74	532.58	0.1159	7.58	146.31	0.0518
350	35	36.65	71.96	71.42	629.43	0.1135	8.77	161.26	0.0544
380	38	39.63	77.81	77.23	680.83	0.1134	9.48	169.06	0.0561
Average values (first data set)						0.1128			0.0595

Πίνακας 5.2. Τέταρτο set μετρήσεων για τον υπολογισμό των $F_{N,cal}$ και $F_{S,cal}$.

Pressure reading		True MPa	F_{RAM} kN	F_N kN	F_N divisions	$F_{N,cal}$ kN/divisions	F_S kN	F_S divisions	$F_{S,cal}$ kN/divisions
bar	MPa								
0	0	1.89	3.70	3.68	37.25	0.0987	0.45	24.55	0.0184
50	5	6.85	13.45	13.35	119.15	0.1121	1.64	52.54	0.0312
100	10	11.82	23.20	23.03	206.21	0.1117	2.83	73.48	0.0385
150	15	16.78	32.96	32.71	295.51	0.1107	4.02	98.33	0.0408
200	20	21.75	42.71	42.39	378.73	0.1119	5.20	127.54	0.0408
250	25	26.72	52.46	52.07	455.35	0.1143	6.39	182.95	0.0349
300	30	31.68	62.21	61.74	543.55	0.1136	7.58	224.30	0.0338
350	35	36.65	71.96	71.42	626.97	0.1139	8.77	254.22	0.0345
380	38	39.63	77.81	77.23	678.65	0.1138	9.48	272.39	0.0348
Average values (fourth data set)						0.1128			0.0362

Πίνακας 5.3. Τιμές των $F_{N,cal}$ και $F_{R,cal}$ των 3 set μετρήσεων.

	$F_{N,cal}$ kN/divisions	$F_{R,cal}$ kN/divisions
Data set 1	0.1128	0.0595
Data set 2	0.1178	0.0728
Data set 3	0.1139	0.0716
Average	0.1148	0.0680

Πίνακας 5.4. Τιμές των $F_{N,cal}$ και $F_{S,cal}$ των 4 set μετρήσεων.

	$F_{N,cal}$ kN/divisions	$F_{S,cal}$ kN/divisions
Data set 1	0.1099	0.0743
Data set 2	0.1091	0.0382
Data set 3	0.1098	0.0364
Data set 4	0.1128	0.0362
Average	0.1104	0.0463

Η τελική τιμή των $F_{N,cal}$, $F_{R,cal}$, και $F_{S,cal}$ λαμβάνεται ως η μέση τιμή των μετρήσεων των συνολικά εκτελεσμένων set για κάθε μία από αυτές (7 για την $F_{N,cal}$, 3 για την $F_{R,cal}$, και 4 για την $F_{S,cal}$) και παρατίθενται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5. Τελικές τιμές των $F_{N,cal}$, $F_{R,cal}$, και $F_{S,cal}$.

	$F_{N,cal}$ kN/divisions	$F_{R,cal}$ kN/divisions	$F_{S,cal}$ kN/divisions
Average	0.1123	0.0680	0.0463

5.1.3. Προετοιμασία των δοκιμίων

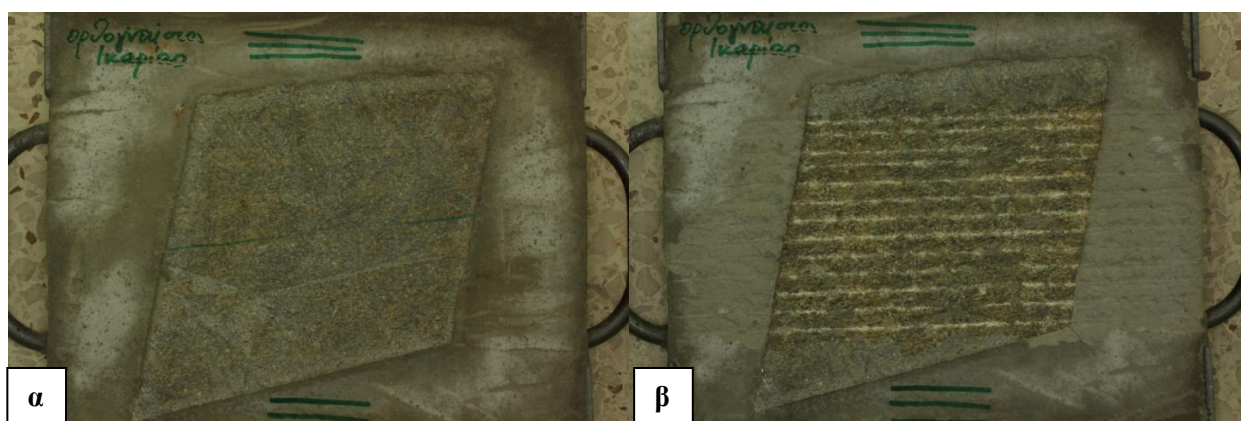
Χρησιμοποιούνται 2 μεταλλότυποι διαστάσεων 30×25×12cm και 2 δοκίμια ορθογώνσιου Α. Τα δοκίμια τοποθετούνται και εγκιβωτίζονται στους μεταλλότυπους με τη χρήση τσιμεντοκονιάματος και αφήνονται για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 28 ημερών, έτσι ώστε να αποκτήσει την αντοχή του το τσιμέντο. Το δοκίμιο (sample) 01 τοποθετείται έτσι ώστε η διεύθυνση κοπής να είναι παράλληλη (//) με τη σχιστότητα του ορθογώνσιου, ενώ το δοκίμιο 02 έτσι ώστε να είναι κάθετη (\perp) προς αυτή.

Πριν την έναρξη των δοκιμών κοπής γίνεται διαμόρφωση (trimming) της λείας επιφάνειας των δοκιμίων με διαδοχικές κοπές βάθους 1 mm και μεταξύ τους απόστασης 10mm.

Στο σχήμα 5.8 φαίνεται το δοκίμιο 01 (//) πριν και μετά τη διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειάς του.

Στο σχήμα 5.9 φαίνονται τα δοκίμια 01 (//) και 02 (\perp) μετά τη διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειάς τους.

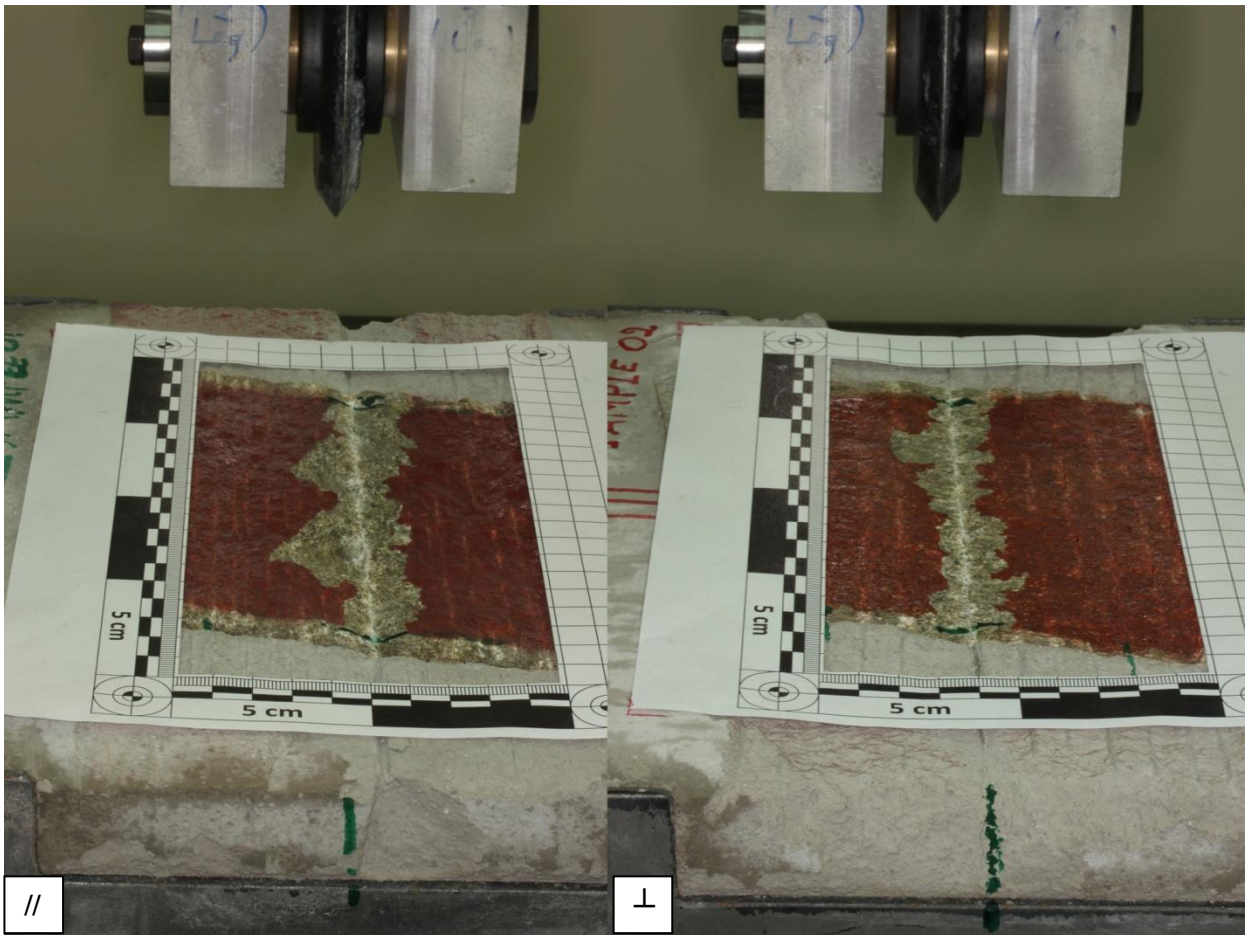
Στη συνέχεια τα δοκίμια βάφονται με κόκκινο χρώμα, ώστε να είναι δυνατή η διάκριση των θρυμμάτων του πετρώματος απ' αυτά του τσιμέντου, κατά την συλλογή τους μετά την εκτέλεση της δοκιμής, αλλά και για να είναι πιο ευδιάκριτη η περιοχή επιρροής εκατέρωθεν της αύλακας κοπής. Στο σχήμα 5.10 φαίνονται τα δοκίμια 01 (//) και 02 (\perp) μετά την εκτέλεση της πρώτης κοπής σε βάθος 3 mm.



Σχήμα 5.8. Το δοκίμιο 01 (//) α) πριν και β) μετά τη διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειάς του.



Σχήμα 5.9. Το δοκίμιο 01 (//) και το δοκίμιο 02 (\perp) μετά τη διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειάς τους.



Σχήμα 5.10. Το δοκίμιο 01 (//) και το δοκίμιο 02 (\perp) μετά την εκτέλεση της πρώτης κοπής σε βάθος 3 mm.

5.1.4. Πειραματική διαδικασία

Μόλις ολοκληρωθεί η προετοιμασία κάθε δοκιμίου όπως περιγράφεται ανωτέρω και αφού γίνει η βαθμονόμηση του δυναμόμετρου της μηχανής, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.1.2, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Το δοκίμιο τοποθετείται και συσφίγγεται στην τράπεζα.
- Ρυθμίζεται το βάθος κοπής στο επιθυμητό, με τη βοήθεια του χειροτροχού που επιτρέπει την κατακόρυφη μετακίνηση της τράπεζας. Ρυθμίζεται επίσης και η οριζόντια θέση του δοκιμίου στην επιθυμητή, με τη βοήθεια του δεύτερου χειροτροχού.
- Μετακινείται η τράπεζα στην αρχική θέση της διαδρομής.
- Στον ηλεκτρονικό υπολογιστή τίθεται σε λειτουργία το λογισμικό καταγραφής των μετρήσεων και γίνονται οι επιθυμητές ρυθμίσεις ώστε να είναι έτοιμο για καταγραφή. Π.χ. γίνεται μηδενισμός (zeroing) του σήματος της μέτρησης των τεσσάρων σκελών του δυναμόμετρου και επιλέγεται ο ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate) να είναι 1200 Hz.
- Τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας της μηχανής.
- Ξεκινά η καταγραφή των μετρήσεων μέσω του λογισμικού.
- Εκτελείται η δοκιμή κοπής με συνεχή καταγραφή των μετρήσεων.
- Ολοκληρώνεται η δοκιμή, με το δοκίμιο στην τελική θέση της διαδρομής.
- Σταματά η καταγραφή των μετρήσεων μέσω του λογισμικού.
- Σημειώνεται και μετράται το μήκος κοπής του πετρώματος. Για την αποφυγή των μεταβατικών φαινομένων στις επαφές πετρώματος – τσιμέντου, επιλέγεται το μήκος κοπής να απέχει τουλάχιστον 10mm από αυτές εκατέρωθεν.
- Συγκεντρώνονται σχολαστικά τα θρύμματα (chips) του πετρώματος που αντιστοιχούν στο μήκος κοπής, όπως αυτό σημειώθηκε προηγουμένως. Στη συνέχεια συλλέγονται σε διαφανές σακουλάκι γνωστής μάζας και μετράται η μάζα τους με ζυγαριά ακριβείας.
- Μετακινείται το δοκίμιο στην αρχική θέση της διαδρομής και καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα.
- Μετακινείται το δοκίμιο οριζόντια (κάθετα στη διεύθυνση κοπής), ώστε η οριζόντια απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κοπών να είναι η επιθυμητή.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή για τη νέα κοπή.

Σημειώνεται ότι οι δοκιμές που εκτελούνται στο ίδιο επίπεδο (level) έχουν το ίδιο βάθος κοπής.

Μόλις ολοκληρωθούν οι κοπές σε κάθε επίπεδο, επαναλαμβάνεται:

α) η διαμόρφωση (trimming) της επιφάνειας του δοκιμίου, με διαδοχικές κοπές στο ίδιο βάθος με αυτό των κοπών του κάθε επιπέδου και σε απόσταση το πολύ 10mm.

β) το βάψιμο της νέας, διαμορφωμένης επιφάνειας.

5.1.5. Σχεδιασμός του πειράματος

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές της δοκιμής κοπής είναι: η διεύθυνση της σχιστότητας του ορθογνεύσιου σε σχέση με τη διεύθυνση της κοπής (παράλληλη ή κάθετη), το βάθος (penetration) της κοπής και η απόσταση (spacing) μεταξύ των κοπών.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι οι μέσες και οι μέγιστες δυνάμεις κοπής (δύναμη κύλισης, ώσης και πλάγια δύναμη), ο εξορυγμένος όγκος πετρώματος ανά μονάδα μήκους κοπής (m^3/km) και οι τιμές της ειδικής ενέργειας κοπής.

Οι σταθερές της δοκιμής είναι ο τύπος του κοπτικού δίσκου (διαμέτρου 120 mm και με πλάτος αιχμής 1 mm), η ταχύτητα κοπής (5.8cm/s) και ο ρυθμός δειγματοληψίας (1200 Hz).

Κάθε κοπή επαναλαμβάνεται τουλάχιστον 2 φορές. Καταγράφονται οι μέσες και οι μέγιστες δυνάμεις (δυνάμεις κύλισης (F_R), ώσης (F_N) και πλάγιες (F_S) δυνάμεις) και η εξορυγμένη μάζα πετρώματος. Διαιρώντας την εξορυγμένη μάζα με την πυκνότητα του δοκιμίου υπολογίζεται ο όγκος που εξορύχτηκε. Διαιρώντας τον εξορυγμένο όγκο με το μήκος της κοπής υπολογίζεται ο εξορυγμένος όγκος πετρώματος ανά μονάδα μήκους κοπής (yield) (m^3/km).

Η ειδική ενέργεια κοπής (Specific Energy) υπολογίζεται από τη σχέση (5.1):

$$SE = \frac{F_{R.av}}{Q} \quad (5.1)$$

όπου SE: η ειδική ενέργεια κοπής (MJ/m^3)

$F_{R.av}$: η μέση δύναμη κοπής (ή κύλισης) (kN)

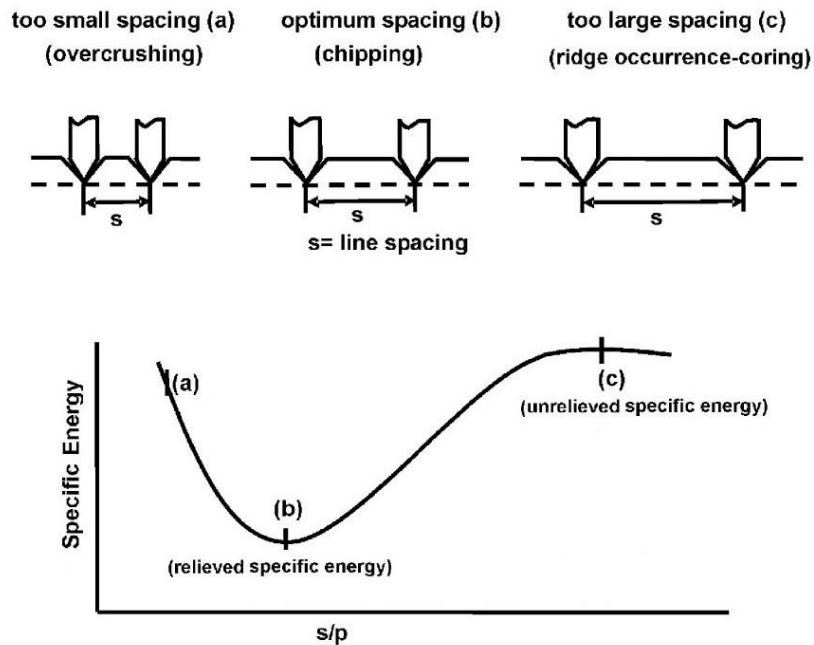
Q: ο εξορυγμένος όγκος πετρώματος ανά μονάδα μήκους κοπής (m^3/km).

Στα δοκίμια 01 (//) και 02 (\perp) ορθογνεύσιου Α εκτελούνται κοπές χωρίς αλληλεπίδραση (unrelieved) και με αλληλεπίδραση (relieved) μεταξύ των διαδοχικών κοπών. Τα βάθη κοπής p, οι αποστάσεις s μεταξύ διαδοχικών κοπών και οι λόγοι s/p των δοκιμών που εκτελούνται, είναι κοινά για τα δύο δοκίμια και φαίνονται στον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6. Βάθη κοπής p, αποστάσεις s μεταξύ διαδοχικών κοπών και λόγοι s/p των εκτελεσμένων δοκιμών.

p (mm)	s (mm)	s/p	Τύπος κοπής
2	30	15	Unrelieved
	10	5	Relieved
	8	4	Relieved
	6	3	Relieved
3	40	13.3	Unrelieved
	20	6.7	Relieved
	10	3.3	Relieved
5	60	12	Unrelieved
	20	4	Relieved
	10	2	Relieved

Η επίδραση της απόστασης μεταξύ διαδοχικών κοπών και του βάθους κοπής στην αποδοτικότητα / ειδική ενέργεια κοπής εξηγείται στο σχήμα 5.11. Αν η απόσταση μεταξύ των κοπών είναι πολύ μικρή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11 (a), η κοπή δεν είναι αποδοτική λόγω του υπερβολικού θρυμματισμού (overcrushing) του πετρώματος. Αν η απόσταση είναι πολύ μεγάλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11 (c), η κοπή δεν είναι αποδοτική, καθώς οι εφελκυστικές ρωγμές των γειτονικών κοπών δεν μπορούν να φτάσουν η μία την άλλη ώστε να σχηματίσουν θραύσμα (chip) και έτσι παραμένει/σχηματίζεται μια «γέφυρα» άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των αυλακών κοπής. Η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής λαμβάνεται για ένα βέλτιστο λόγο απόστασης προς βάθος κοπής (s/p), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11 (b).



Σχήμα 5.11. Επίδραση της απόστασης (s) μεταξύ διαδοχικών κοπών στην ειδική ενέργεια κοπής. (Balci and Bilgin 2007)

Στα σχήματα 5.12 έως 5.17 απεικονίζονται οι κοπές χωρίς αλληλεπίδραση (unrelieved) για κάθε δοκίμιο και βάθος κοπής (p) και στα σχήματα 5.18 και 5.19 απεικονίζονται οι κοπές με αλληλεπίδραση (relieved), στο βάθος των 2mm για κάθε δοκίμιο.

Σχήμα 5.12. Δοκίμιο 01 (//) – $\rho=2\text{mm}$



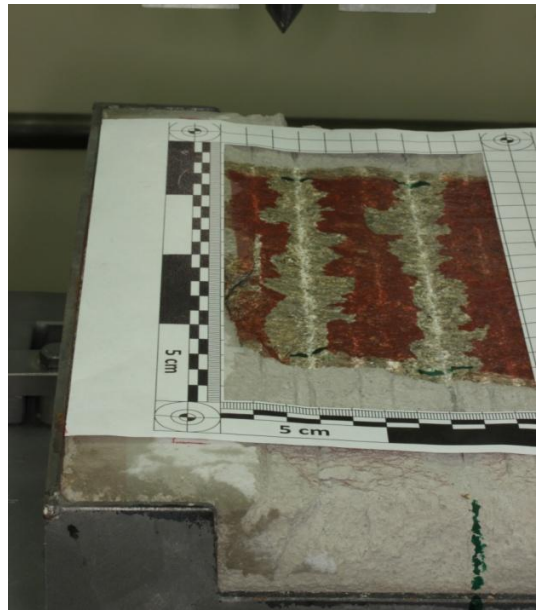
Σχήμα 5.13. Δοκίμιο 02 (\perp) – $\rho=2\text{mm}$



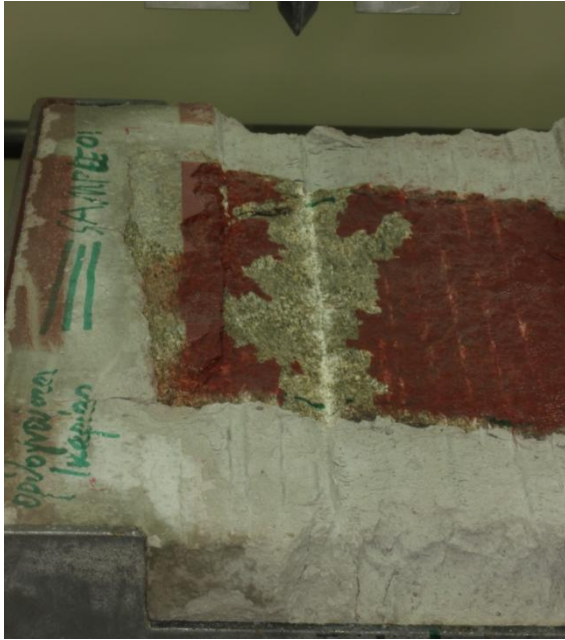
Σχήμα 5.14. Δοκίμιο 01 (//) – $\rho=3\text{mm}$



Σχήμα 5.15. Δοκίμιο 02 (\perp) – $\rho=3\text{mm}$



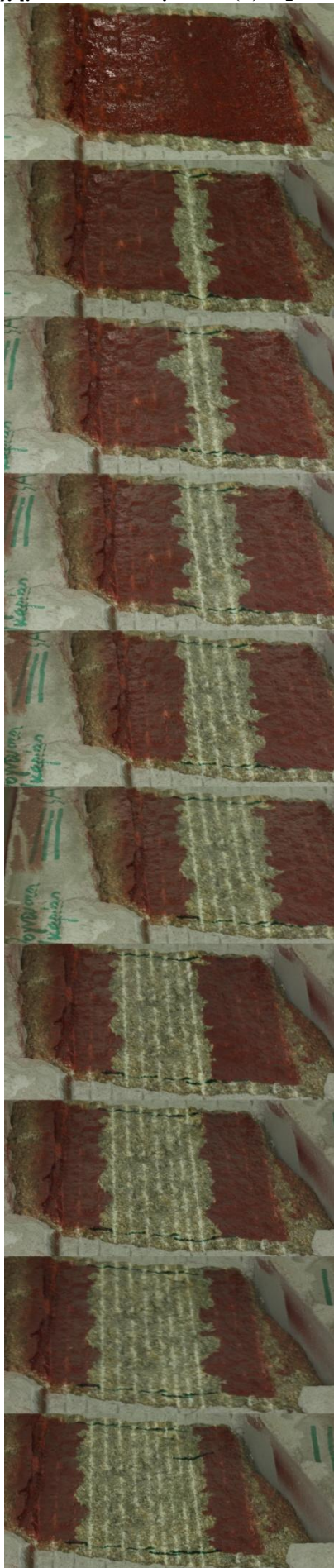
Σχήμα 5.16. Δοκίμιο 01 (//) – $\rho=5\text{mm}$



Σχήμα 5.17. Δοκίμιο 02 (\perp) – $\rho=5\text{mm}$



Σχήμα 5.18. Δοκίμιο 01 (//) – $p=2\text{mm}$

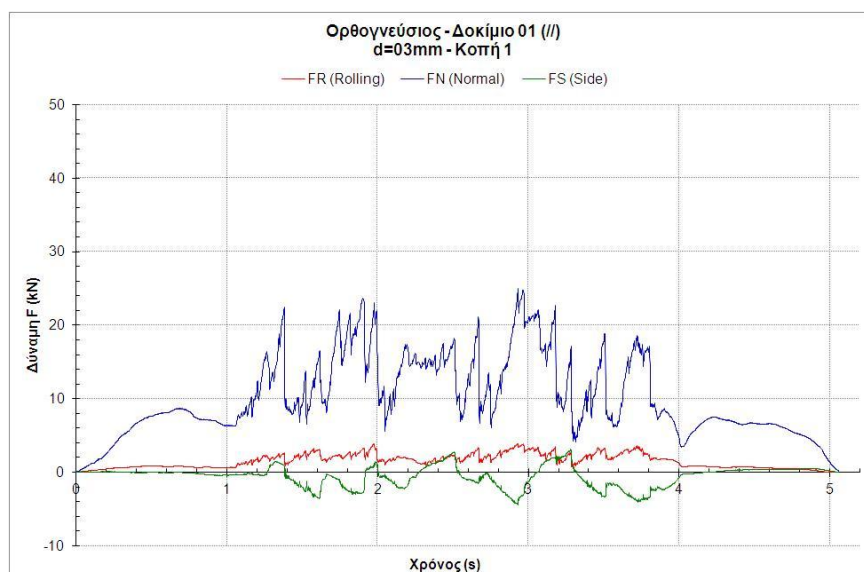


Σχήμα 5.19. Δοκίμιο 02 (\perp) – $p=2\text{mm}$



5.1.6. Πειραματικά αποτελέσματα

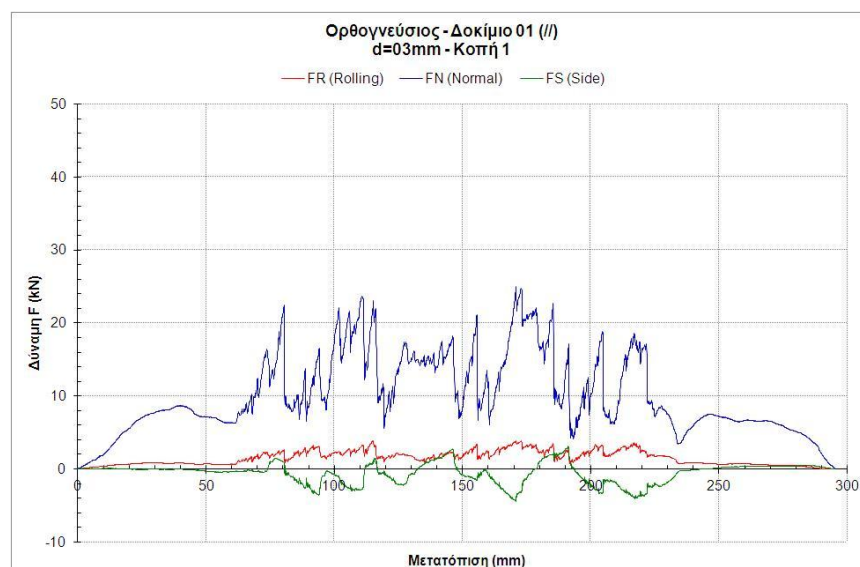
Σε κάθε δοκιμή καταγράφονται οι μετρήσεις των τεσσάρων σκελών του δυναμόμετρου και με βάση τη βαθμονόμηση του, λαμβάνονται οι δυνάμεις κοπής F_R , F_N , και F_S σε kN και συνεπώς το διάγραμμα δυνάμεων κοπής συναρτήσει του χρόνου, όπως αυτό του σχήματος 5.20.



Σχήμα 5.20. Διάγραμμα δυνάμεων κοπής (F_R , F_N , και F_S) συναρτήσει του χρόνου.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate) επιλέγεται να είναι 1200 Hz, δηλαδή το δυναμόμετρο της διάταξης καταγράφει 1200 τιμές ανά δευτερόλεπτο για κάθε σκέλος. Στην πεπερασμένη μεταβολή του χρόνου ($\delta t = 1/1200s$) αντιστοιχεί μετατόπιση του κοπτικού κατά δλ. Θεωρώντας ότι η ταχύτητα του κοπτικού είναι σταθερή κατά την κοπή (58.3 mm/s) και γνωρίζοντας το συνολικό χρόνο κοπής (από το διάγραμμα δυνάμεων-χρόνου) και το μήκος του δοκιμίου (300mm), υπολογίζεται η ταχύτητα κοπής: $v_{\text{κοπής}} = \frac{\text{μήκος δοκιμίου}}{\text{χρόνος κοπής}}$.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα κοπής, υπολογίζεται η μετατόπιση δλ που αντιστοιχεί σε χρόνο δt : $\delta l = v_{\text{κοπής}} \cdot \delta t$. Βάσει της παραπάνω διαδικασίας το διάγραμμα δυνάμεων-χρόνου μετατρέπεται σε διάγραμμα δυνάμεων-μετατόπισης, όπως φαίνεται το σχήμα 5.21.

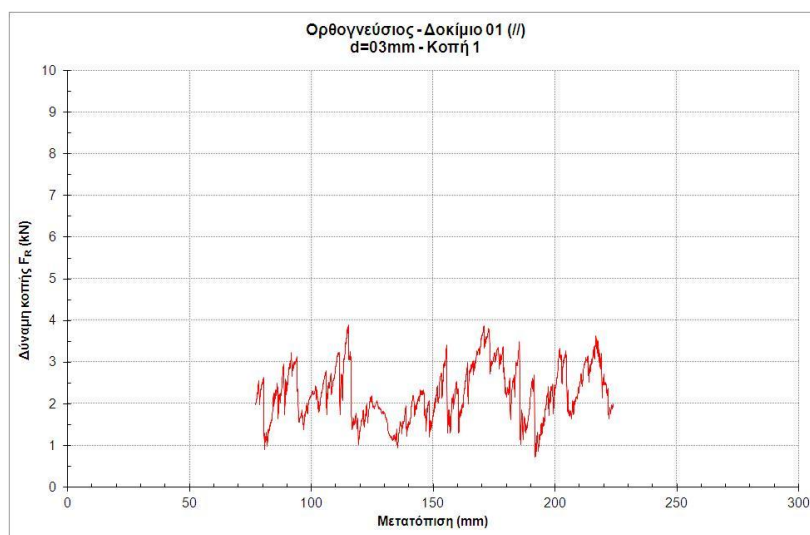


Σχήμα 5.21. Διάγραμμα δυνάμεων κοπής (F_R , F_N , και F_S) συναρτήσει της μετατόπισης.

Για τον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας κοπής απαιτείται να είναι γνωστό το έργο των δυνάμεων κατά την κοπή. Οι δυνάμεις F_N και F_S 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 κύλισης F_R , η οποία μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής της κατά τη διεύθυνση της.

Για τον υπολογισμό της μέσης δύναμης κύλισης $F_{R,av}$, από το συνολικό διάγραμμα δύναμης κύλισης-μετατόπισης, λαμβάνεται το τμήμα του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο μήκος κοπής του πετρώματος, όπως αυτό σημειώθηκε και μετρήθηκε μετά την εκτέλεση της δοκιμής.

Το διάγραμμα δύναμης κύλισης-μετατόπισης που αντιστοιχεί στο μήκος κοπής του πετρώματος του σχήματος 5.10 (1^η κοπή του δοκιμίου 01 (//) σε βάθος 3mm), φαίνεται στο σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.22. Διάγραμμα δύναμης κύλισης F_R – μετατόπισης, που αντιστοιχεί στο μήκος κοπής του πετρώματος.

Τα διαγράμματα δυνάμεων κοπής-μετατόπισης και δύναμης κύλισης-μετατόπισης όλων των δοκιμών παρατίθενται στο Παράρτημα 1. Σημειώνεται ότι η κλίμακα του άξονα των δυνάμεων των δύο διαγραμμάτων είναι διαφορετική για να είναι ευδιάκριτη η διακύμανση της δύναμης κύλισης F_R .

Για κάθε κοπή υπολογίζεται η ειδική ενέργεια κοπής (SE), όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.1.5, καθώς και ο συντελεστής κοπής (%) (Cutting Coefficient) από τη σχέση (5.2):

$$CC (\%) = \frac{F_{R,av}}{F_{N,av}} \times 100 \quad (5.2)$$

όπου $CC (\%)$: ο συντελεστής κοπής (%)

$F_{R,av}$: η μέση δύναμη κοπής (ή κύλισης) (kN)

$F_{N,av}$: η μέση δύναμη ώσης (kN)

Τα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου παρατίθενται στον πίνακα 5.7 για το δοκίμιο 01 (//) και στον πίνακα 5.8 για το δοκίμιο 02 (\perp).

Πίνακας 5.7. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του δοκιμίου 01 (//).

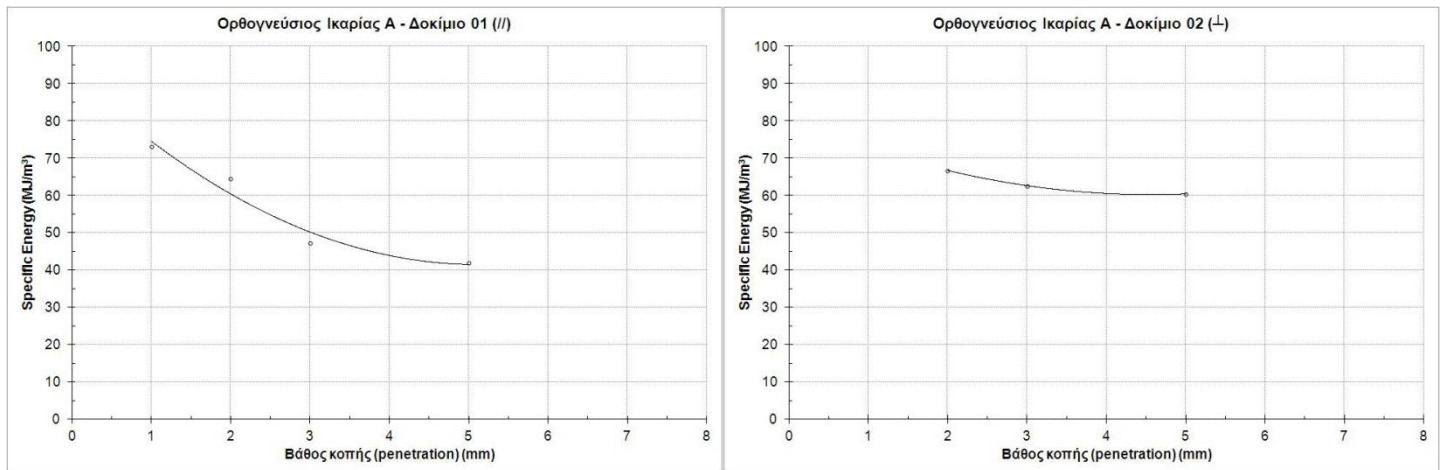
p (mm)	s (mm)	s/p	A/A Κοπής	F _{R,av} (kN)	F _{N,av} (kN)	F _{Rmax} (kN)	F _{Nmax} (kN)	l (m)	m (g)	Q (10 ⁻³ m ³ /km)	SE (MJ/m ³)	Average SE (MJ/m ³)	CC (%)	Average CC (%)
1	20	20	1	0.575	5.666	1.059	11.446	0.145	3.0	7.87	73.049	73.049	10.15	10.15
2	30	15	1	1.176	9.952	2.004	18.954	0.144	6.8	17.97	65.460	64.385	11.82	13.51
			2	1.240	8.810	2.891	19.544	0.144	8.2	21.67	57.205		14.07	
			3	1.248	11.143	2.178	23.237	0.140	6.0	16.31	76.515		11.20	
			4	1.265	11.802	2.793	22.221	0.144	8.2	21.67	58.358		10.71	
	10	5	1	1.304	7.841	2.697	14.312	0.143	7.5	19.96	65.354	51.026	16.63	
			2	0.637	5.492	1.537	11.846	0.140	7.1	19.30	33.007		11.60	
			3	1.239	7.512	2.236	17.870	0.142	6.6	17.69	70.071		16.50	
			4	0.597	5.051	1.605	13.920	0.141	6.2	16.73	35.672		11.82	
	8	4	1	1.093	7.221	2.702	16.999	0.140	4.4	11.96	91.407	85.009	15.14	
			2	1.421	7.441	3.435	18.880	0.145	5.4	14.17	100.253		19.09	
			3	1.228	7.014	2.820	17.042	0.144	6.1	16.12	76.173		17.50	
			4	0.845	6.852	2.443	14.284	0.143	4.4	11.71	72.204		12.34	
	6	3	1	0.795	6.990	1.946	14.739	0.145	2.5	6.56	121.118	78.261	11.37	
			2	0.966	7.664	2.147	16.323	0.146	5.7	14.86	65.023		12.60	
			3	0.700	6.008	1.545	12.799	0.142	6.2	16.61	42.116		11.65	
			4	0.807	6.616	1.713	16.063	0.104	2.6	9.51	84.786		12.19	
3	40	13.3	1	2.252	13.935	3.899	24.952	0.147	18.7	48.41	46.527	47.196	16.16	14.81
			2	2.031	13.715	4.107	24.324	0.145	23.5	61.67	32.927		14.81	
			3	2.105	14.482	3.939	26.535	0.146	14.3	37.27	56.473		14.53	
			4	2.299	15.925	5.175	35.146	0.147	16.8	43.49	52.855		14.43	
	20	6.7	1	1.562	10.434	3.321	26.420	0.149	12.8	32.69	47.774	48.353	14.97	
			2	1.504	11.012	2.937	23.451	0.154	14.4	35.58	42.271		13.66	
			3	1.874	10.774	3.667	21.468	0.143	12.8	34.06	55.013		17.39	
	10	3.3	1	1.467	10.243	2.853	18.434	0.148	9.7	24.94	58.827	52.839	14.32	
			2	1.447	9.569	3.437	18.106	0.143	10.5	27.94	51.774		15.12	
			3	1.176	8.882	2.933	18.454	0.140	7.2	19.57	60.080		13.24	
			4	1.186	8.280	2.727	17.795	0.141	10.8	29.15	40.677		14.32	
	5	60	12	1	4.644	25.516	8.243	46.916	0.140	35.5	96.49	48.133	41.953	
2				4.680	26.694	9.154	44.479	0.146	50.2	130.84	35.772	17.53		
20		4	1	2.988	14.489	6.016	25.210	0.106	9.7	34.82	85.807	64.318	20.62	
			2	3.048	15.339	5.252	31.251	0.149	30.6	78.15	39.002		19.87	
			3	2.801	14.699	6.268	33.184	0.132	13.2	38.05	73.604		19.05	
			4	3.459	15.387	6.040	31.647	0.147	22.7	58.76	58.859		22.48	
10		2	1	2.442	11.584	6.079	23.730	0.144	11.5	30.39	80.345	80.047	21.08	
			2	2.642	11.500	5.517	26.395	0.147	12.8	33.13	79.749		22.98	

Πίνακας 5.8. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου του δοκιμίου 02 (\perp).

p (mm)	s (mm)	s/p	A/A Κοπής	F _{R,av} (kN)	F _{N,av} (kN)	F _{R,max} (kN)	F _{N,max} (kN)	l (m)	m (g)	Q (10 ⁻³ m ³ /km)	SE (MJ/m ³)	Average SE (MJ/m ³)	CC (%)	Average CC (%)
2	30	15	1	0.613	7.294	1.374	12.634	0.144	3.5	9.25	66.326	66.682	8.41	10.92
			2	0.601	8.412	1.222	13.378	0.138	3.6	9.93	60.545		7.14	
			3	0.729	7.775	1.320	16.129	0.149	4.2	10.73	67.941		9.37	
			4	1.050	9.718	2.101	18.240	0.146	5.6	14.60	71.917		10.80	
	10	5	1	0.613	7.051	1.371	13.551	0.148	3.2	8.23	74.470	70.613	8.69	
			2	0.283	4.501	0.709	10.910	0.144	2.4	6.34	44.640		6.29	
			3	0.574	5.910	1.178	11.333	0.140	3.6	9.78	58.660		9.71	
			4	0.413	5.206	1.067	10.674	0.135	1.4	3.95	104.683		7.93	
	8	4	1	0.992	6.166	2.496	13.021	0.141	2.6	7.02	141.344	116.217	16.08	
			2	1.146	8.395	2.057	17.937	0.139	3.3	9.03	126.851		13.65	
			3	1.250	9.135	2.764	15.723	0.135	4.6	12.97	96.379		13.68	
			4	1.463	7.757	3.224	14.375	0.133	5.1	14.59	100.295		18.87	
	6	3	1	0.668	5.987	1.823	11.933	0.142	1.9	5.09	131.196	110.335	11.16	
			2	0.857	7.120	1.766	14.274	0.145	3.6	9.45	90.664		12.03	
			3	0.567	6.150	1.177	11.486	0.144	1.7	4.49	126.173		9.22	
			4	0.863	7.351	1.813	12.970	0.144	3.5	9.25	93.308		11.74	
3	40	13.3	1	1.952	16.200	3.509	26.759	0.138	11.5	31.71	61.554	62.600	12.05	13.58
			2	2.115	16.118	4.131	26.378	0.150	13.1	33.23	63.645		13.12	
	20	6.7	1	1.568	11.705	3.173	21.209	0.144	17.5	46.24	33.914	38.368	13.40	
			2	1.641	11.038	3.619	20.867	0.143	14.4	38.32	42.821		14.87	
	10	3.3	1	1.098	7.598	4.556	16.912	0.136	7.8	21.82	50.312	50.312	14.45	
	5	60	12	1	4.029	25.264	6.954	38.105	0.151	24.5	61.74	65.259	60.399	
2				4.619	28.943	7.398	39.152	0.140	30.6	83.17	55.540	15.96		
20		4	1	3.046	18.541	6.348	34.029	0.141	17.0	45.88	66.403	55.811	16.43	
			2	3.829	16.724	6.925	31.254	0.142	31.6	84.68	45.220		16.43	
10		2	1	4.140	17.509	6.954	31.248	0.146	10.4	27.11	152.727	116.040	23.64	
			2	3.089	14.181	5.666	26.258	0.130	13.3	38.93	79.354		21.78	

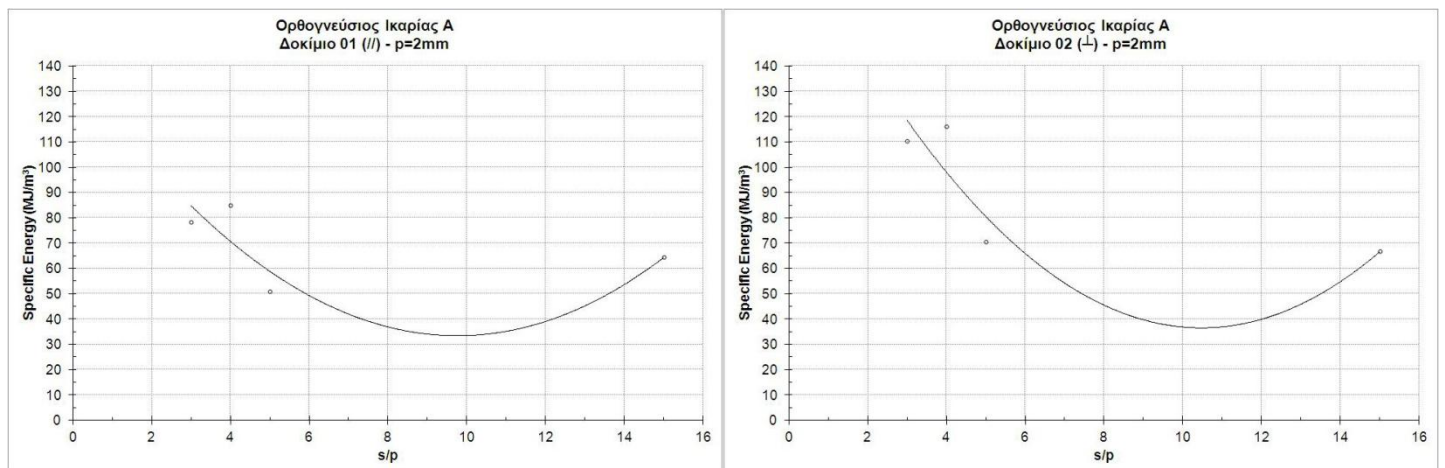
p: (penetration) βάθος κοπής, s/p: (spacing/penetration) απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών/βάθος κοπής, F_{R,av}: μέση δύναμη κύλισης, F_{N,av}: μέση δύναμη ώσης, F_{R,max}: μέγιστη δύναμη κύλισης, F_{N,max}: μέγιστη δύναμη ώσης, l: μήκος κοπής πετρώματος, m: εξορυγμένη μάζα, Q: (yield) εξορυγμένος όγκος ανά μονάδα μήκους κοπής, SE: ειδική ενέργεια κοπής, Average SE: μέση ειδική ενέργεια κοπής για δεδομένο s/p, CC (%): (Cutting Coefficient) συντελεστής κοπής, Average CC (%): μέσος συντελεστής κοπής για δεδομένο βάθος κοπής.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των κοπών χωρίς αλληλεπίδραση (unrelieved cuts) σχεδιάζεται για κάθε δοκίμιο, το διάγραμμα ειδικής ενέργειας κοπής συναρτήσει του βάθους κοπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.23.

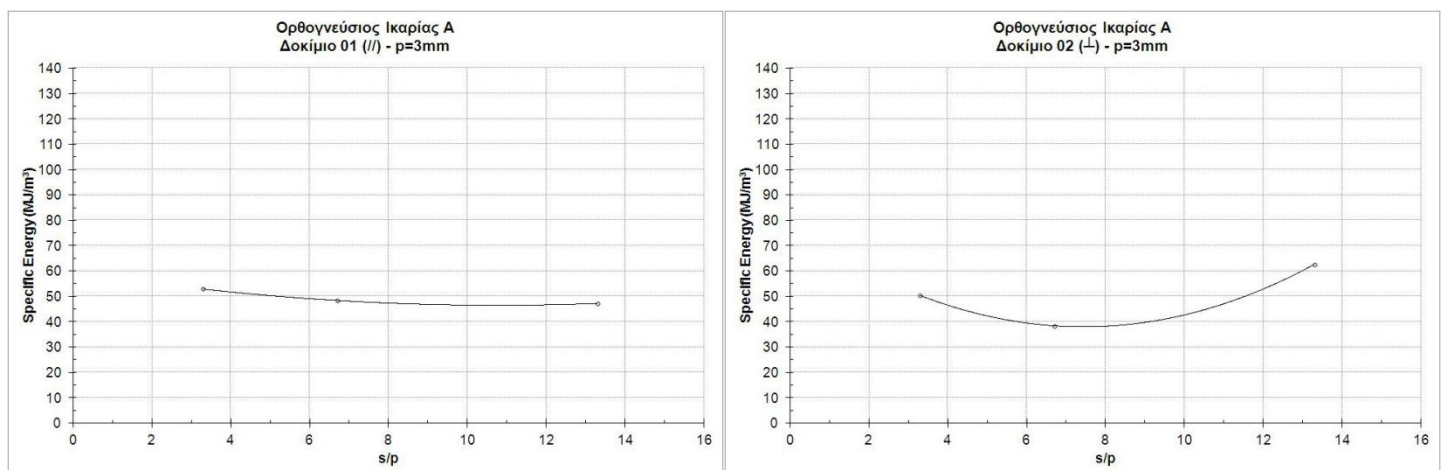


Σχήμα 5.23. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-βάθους κοπής.

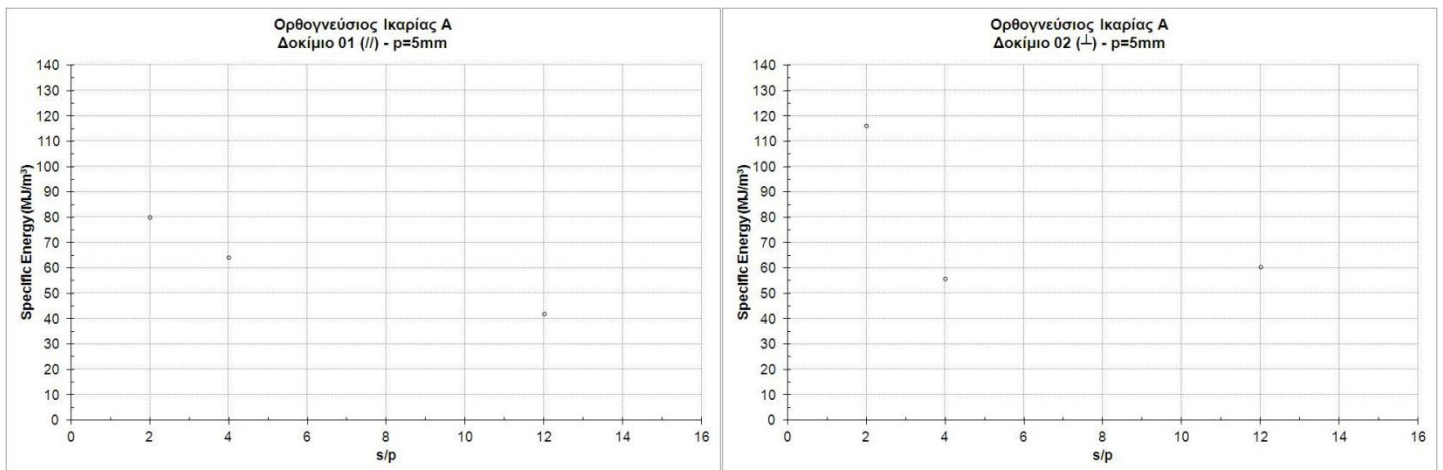
Ακόμη, σχεδιάζεται για κάθε δοκίμιο και βάθος κοπής, το διάγραμμα ειδικής ενέργειας κοπής συναρτήσει του λόγου s/p (απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών/βάθος κοπής), όπως φαίνεται στα σχήματα 5.24 έως 5.26.



Σχήμα 5.24. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-s/p για βάθος κοπής p=2mm.



Σχήμα 5.25. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-s/p για βάθος κοπής p=3mm.



Σχήμα 5.26. Διαγράμματα ειδικής ενέργειας κοπής-s/p για βάθος κοπής $\rho=5\text{mm}$.

Με βάση τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει ότι ο βέλτιστος λόγος s/p , για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής, είναι 10 για το δοκίμιο 01 (//) και 9 για το δοκίμιο 02 (\perp).

Στον πίνακα 5.9 που ακολουθεί παρατίθενται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των δυνάμεων κοπής που καταγράφηκαν για κάθε δοκίμιο, κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου.

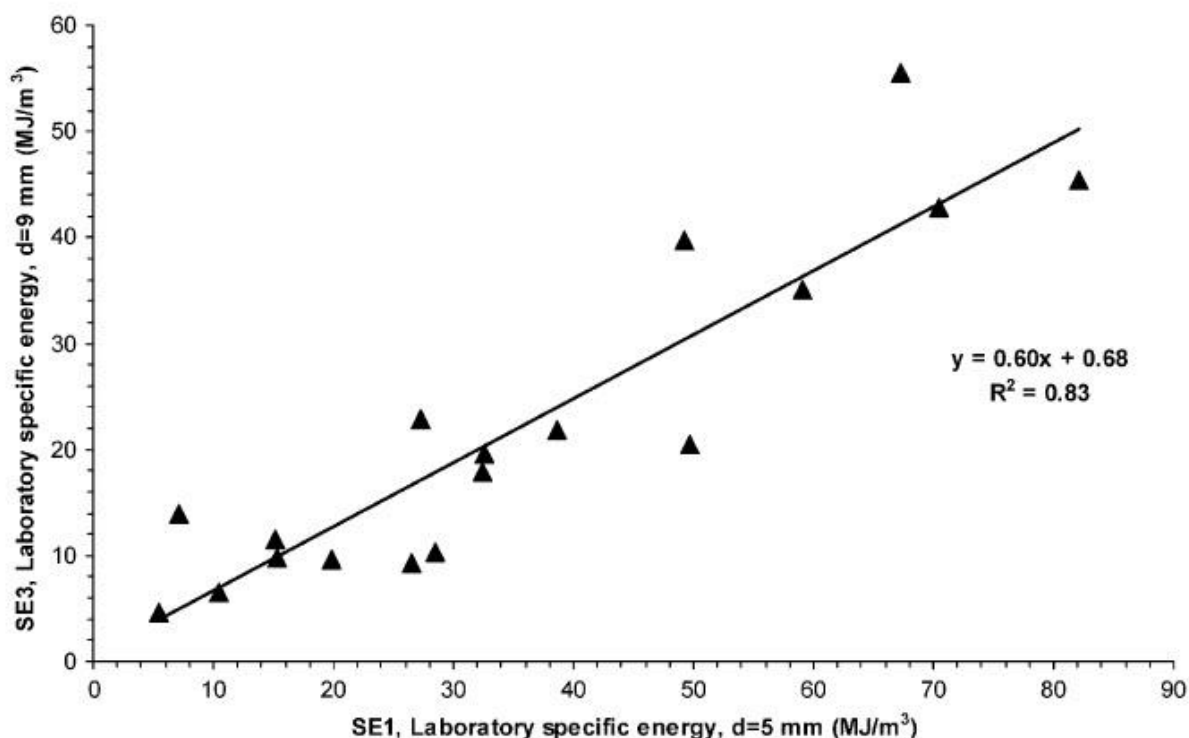
Πίνακας 5.9. Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δυνάμεων κοπής.

Πέτρωμα	F_{Rmax} (kN)		F_{Nmax} (kN)		F_{Smax} (kN)	
	min	max	min	max	min	max
Ορθogneύσιος Ικαρίας Α Δοκίμιο 01 (//)	1.059	9.154	11.446	46.916	1.981	9.072
Ορθogneύσιος Ικαρίας Α Δοκίμιο 02 (\perp)	0.709	7.398	10.674	39.152	10.982	1.143

Οι Balci και Bilgin (2007) συσχέτισαν τις δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας (με κοπτικό συρόμενου τύπου) με τις δοκιμές κοπής πλήρους κλίμακας (με κοπτικό τύπου δίσκου) για την επιλογή μηχανημάτων όρυξης, εκτελώντας δοκιμές σε 18 διαφορετικά πετρώματα, προερχόμενα από διάφορα ορυχεία της Τουρκίας.

Οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ της ειδικής ενέργειας κοπής SE1 που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας, χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών (unrelieved cuts) σε βάθος 5mm, με τη βέλτιστη ειδική ενέργεια κοπής SE3 που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής πλήρους κλίμακας, με αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών (relieved cuts) σε βάθος 9mm, διερευνήθηκαν με παλινδρόμηση βασισμένη στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η ευθεία η οποία ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα φαίνεται στο σχήμα 5.27. Η σχέση η οποία βρέθηκε μεταξύ της ειδικής ενέργειας κοπής SE1 και SE3 είναι η $SE3=0.6 \cdot SE1+0.68$ με συντελεστή προσαρμογής $R^2=0.83$.

Από το αποτέλεσμα της στατιστικής ανάλυσης προκύπτει ότι η βέλτιστη ειδική ενέργεια κοπής SE3 μπορεί να προβλεφθεί αξιόπιστα από την SE1. Επομένως, οι δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας, που είναι χαμηλού κόστους και εύκολες στην εκτέλεσή τους (σε πυρήνες ή ορθογώνια δείγματα πετρώματος), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του στιγμιαίου ρυθμού κοπής (ICR) των μηχανών όρυξης, στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εκτέλεση δοκιμών κοπής πλήρους κλίμακας, είτε λόγω έλλειψης μεγάλων δειγμάτων πετρώματος, είτε λόγω ανεπαρκούς χρόνου για την εκτέλεση των δοκιμών. Με άλλα λόγια, η ειδική ενέργεια κοπής που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός στην εκτίμηση του στιγμιαίου ρυθμού κοπής των μηχανημάτων όρυξης (Balci and Bilgin 2007).



Σχήμα 5.27. Η σχέση μεταξύ της ειδικής ενέργειας κοπής SE1, που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής μικρής κλίμακας (με κοπτικό συρόμενου τύπου), χωρίς αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών (unrelieved cuts) σε βάθος 5mm και της ειδικής ενέργειας κοπής SE3, που λαμβάνεται από δοκιμές κοπής πλήρους κλίμακας (με κοπτικό τύπου δίσκου), με αλληλεπίδραση μεταξύ των κοπών (relieved cuts) σε βάθος 9mm.

5.2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΟΡΘΟΓΝΕΥΣΙΩΝ ΜΕ ΚΟΠΤΙΚΟ ΣΥΡΟΜΕΝΟΥ ΤΥΠΟΥ

5.2.1. Γενικά

Η εργαστηριακή δοκιμή κοπής των πετρωμάτων με κοπτικό συρόμενου τύπου εκτελείται για τον προσδιορισμό της ειδικής ενέργειας κοπής τους (Specific Energy). Η ενέργεια αυτή, εξαρτάται πέρα από τις ιδιότητες του πετρώματος (αντοχή σε θλίψη, απόσταση και διεύθυνση των ασυνεχειών) και από τις συνθήκες κοπής (τύπος και γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, τρόπος προσβολής και βάθος κοπής). Για το λόγο αυτό ένα πέτρωμα παρουσιάζει διάφορες τιμές ειδικής ενέργειας κοπής για διαφορετικές συνθήκες κοπής. Συνεπώς, οι ειδικές ενέργειες κοπής πετρωμάτων που προέρχονται από δοκιμές με διαφορετικές συνθήκες κοπής δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες.

5.2.2. Προδιαγραφές της δοκιμής

Το 1978 ο McFeat-Smith θέτει τις προδιαγραφές της δοκιμής κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου, όπως φαίνονται στο σχήμα 5.28, για τον προσδιορισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας κοπής:

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°

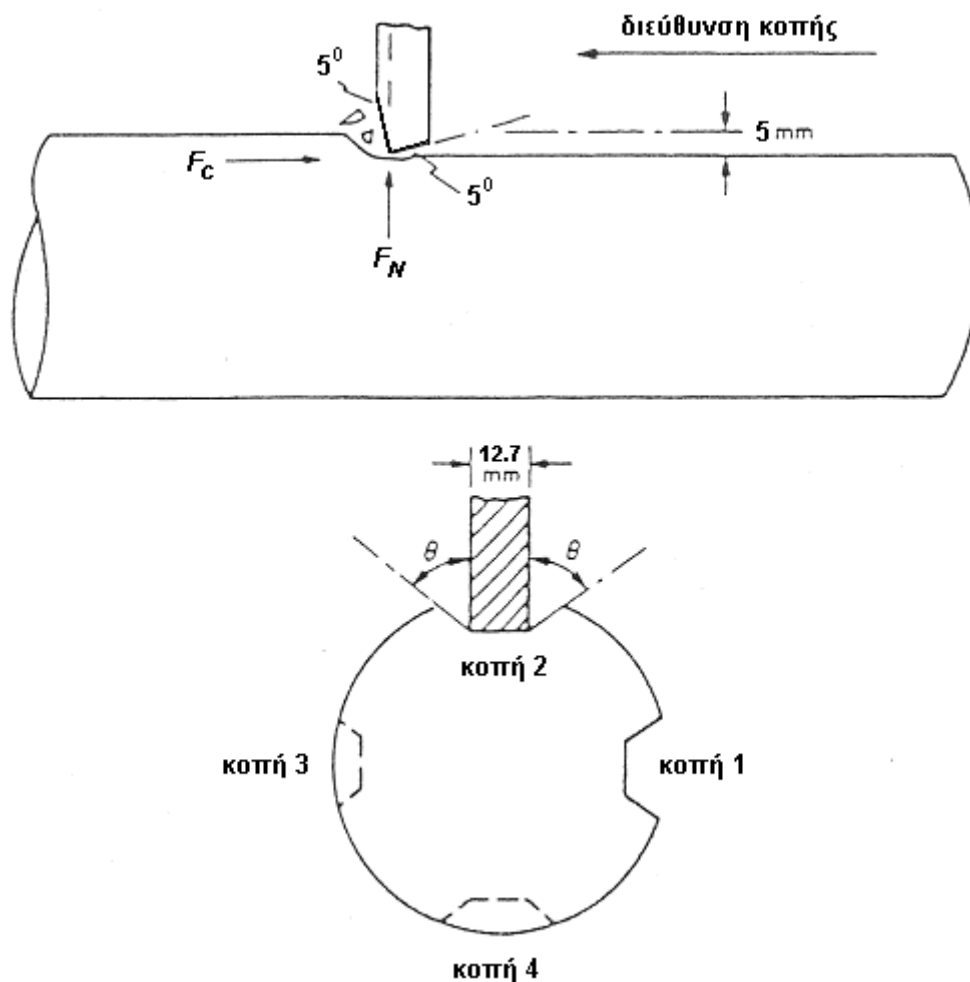
Γωνία οπίσθιας ελευθερίας (β): -5°

Προσβολή

Διεύθυνση κοπής: διαμήκης άξονας του κυλίνδρου (γενέτειρα)

Βάθος κοπής: 5 mm

Ταχύτητα κοπής: 150 mm/sec



Σχήμα 5.28. Προδιαγραφές της εργαστηριακής δοκιμής κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου, για τον υπολογισμό του δείκτη ειδικής ενέργειας κοπής κατά Mc Feat-Smith (Αναγνώστου 2006).

5.2.3. Εργαστηριακή διάταξη

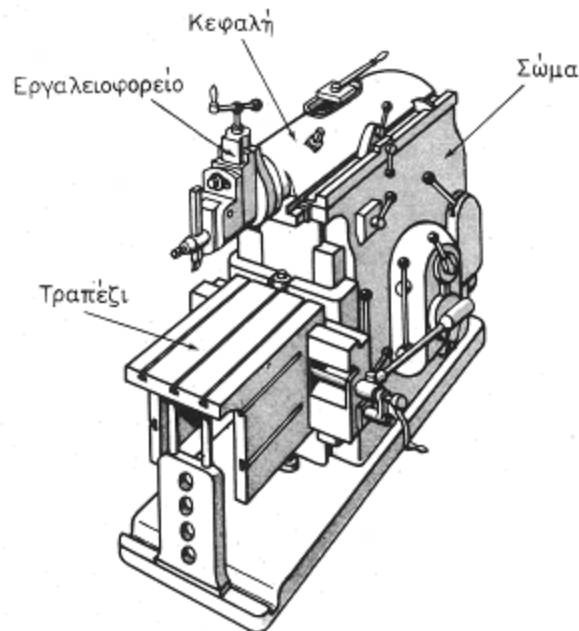
Η διάταξη της δοκιμής κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. περιλαμβάνει:

- 1) Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη.
- 2) Δυναμόμετρο.
- 3) Μονάδα ελέγχου δυναμόμετρου με ενισχυτή σήματος.
- 4) Κάρτα διασύνδεσης με υπολογιστή.
- 5) Ηλεκτρονικό υπολογιστή και λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων.

1. Μηχανική ταχυπλάνη

Η ταχυπλάνη είναι μια σχετικά απλή εργαλειομηχανή, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.29 και 5.30, και αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

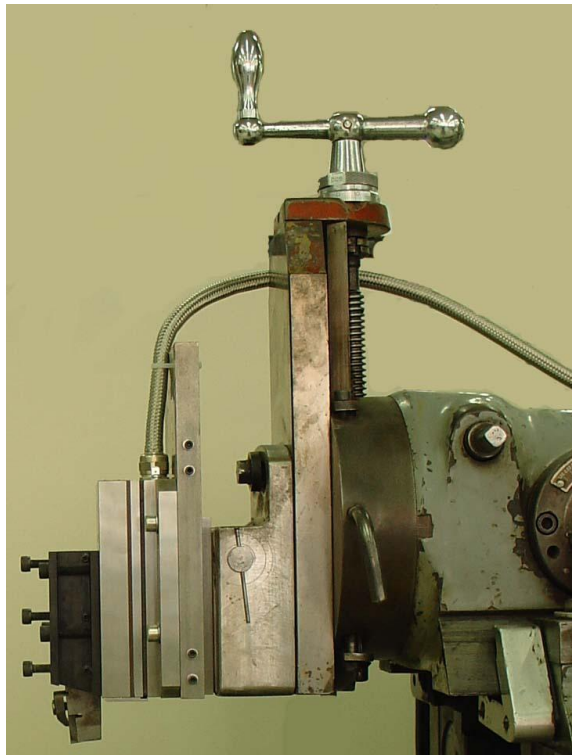
- α) Το σώμα, μέσα στο οποίο βρίσκονται ο μηχανισμός ταχυτήτων της κύρια κίνησης, το σύστημα της μετατροπής της σε ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση, ο μηχανισμός των προώσεων και ένας διπλός συμπλέκτης τριβής.
- β) Το μηχανισμό των ταχυτήτων και προώσεων.
- γ) Το μηχανισμό μετατροπής της κίνησης (μηχανισμός ταλαντωτή) από περιστροφική σε ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση της κεφαλής.
- δ) Την κεφαλή, η οποία φέρει στο εμπρόσθιο μέρος της το εργαλειοφορείο.
- ε) Το τραπέζι.
- στ) Σιαγονωτή μέγγενη ειδικά σχεδιασμένη για τη συγκράτηση κυλινδρικών δοκιμίων, η οποία στερεώνεται στο τραπέζι.
- ζ) Το εργαλειοφορείο, το οποίο φέρει το κοπτικό εργαλείο και το δυναμόμετρο και απεικονίζεται στο σχήμα 5.31.



Σχήμα 5.29. Βασικά μέρη ταχυπλάνης (Αναγνώστου 2006).



Σχήμα 5.30. Οριζόντια μηχανική ταχυπλάνη Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.



Σχήμα 5.31. Εργαλειοφορείο ταχυπλάνης Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων Ε.Μ.Π.

2. Δυναμόμετρο

Το δυναμόμετρο παρεμβάλλεται μεταξύ της πλάκας του εργαλειοφορείου και του εργαλειοδέτη και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των δυνάμεων κατά την κοπή. Είναι του οίκου Kistler τύπου 9257BA, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.32 και έχει ως αρχή λειτουργίας το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά όπως ο χαλαζίας παραμορφώνονται ελάχιστα ακόμα και για υψηλά φορτία. Έτσι, λόγω της μεγάλης του ακαμψίας και της υψηλής φυσικής του συχνότητας είναι κατάλληλος για τη μέτρηση εξαιρετικά γρήγορων μεταβολών δυνάμεων, όπως συμβαίνει κατά την κοπή. Το δυναμόμετρο αποτελείται από 4 αισθητήρες με 3 επίπεδα αισθητήρων: 2 διάτμησης για τη μέτρηση της F_x και της F_y (πλάγια και κάθετη δύναμη αντίστοιχα) και 1 πίεσης για τη μέτρηση της F_z (δύναμη κοπής) ο καθένας. Οι αισθητήρες συνδέονται με τρόπο ώστε το δυναμόμετρο να εξάγει 3 σήματα: F_x , F_y , F_z (δυνάμεις σε σύστημα αξόνων XYZ):



Σχήμα 5.32. Δυναμόμετρο Kistler 9257BA.

3. Μονάδα ελέγχου δυναμόμετρου με ενισχυτή σήματος

Μέσω καλωδίου (Kistler MIL 1419) το δυναμόμετρο συνδέεται με τη μονάδα ελέγχου δυναμόμετρου (Kistler 5233A1). Η μονάδα ελέγχου έχει ως είσοδο τα 3 σήματα F_x , F_y , F_z του δυναμόμετρου και εξόδους που μεταφέρουν τα σήματα στον υπολογιστή. Επίσης με εξόδους στη μονάδα ελέγχου καθορίζεται το εύρος μέτρησης των δυνάμεων στο δυναμόμετρο.

4. Κάρτα εισαγωγής δεδομένων στον υπολογιστή

Από την μονάδα ελέγχου τα 3 σήματα μέσω καλωδίου (Kistler 1500A5) οδηγούνται στην κάρτα εισαγωγής δεδομένων (Data Acquisition Card) τύπου PCIM-DAS1602 στον υπολογιστή.

5. Ηλεκτρονικός υπολογιστής και λογισμικό καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων

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

5.2.4. Πειραματική διαδικασία

Προετοιμασία-Ρυθμίσεις στην πλάνη

Αφού μετρηθούν οι διαστάσεις (διάμετρος, μήκος) και το βάρος του κυλινδρικού δοκιμίου πετρώματος, αυτό σταθεροποιείται στη μέγγενη του τραπεζιού της πλάνης έτσι ώστε το κοπτικό να προσβάλλει συμμετρικά τη γενέτειρα. Ρυθμίζεται το βάθος κοπής στα 5 mm με χρήση του χειρομοχλού 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 μήκους του δοκιμίου και η ταχύτητα κατά την κοπή να είναι περί τα 150mm/sec. (π.χ. για δοκίμιο 200mm επιλέγεται διαδρομή 500mm 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.

Ρυθμίσεις δυναμόμετρου και προγράμματος

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

Εκκίνηση πλάνης - (Θέση πλάνης σε λειτουργία ρελαντί)

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).

Έναρξη παλινδρόμησης κεφαλής - (Έναρξη πειράματος)

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).

Τερματισμός παλινδρόμησης κεφαλής - (Πέρασ πειράματος)

Όταν το κοπτικό φτάσει 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 μάζα του δοκιμίου.

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

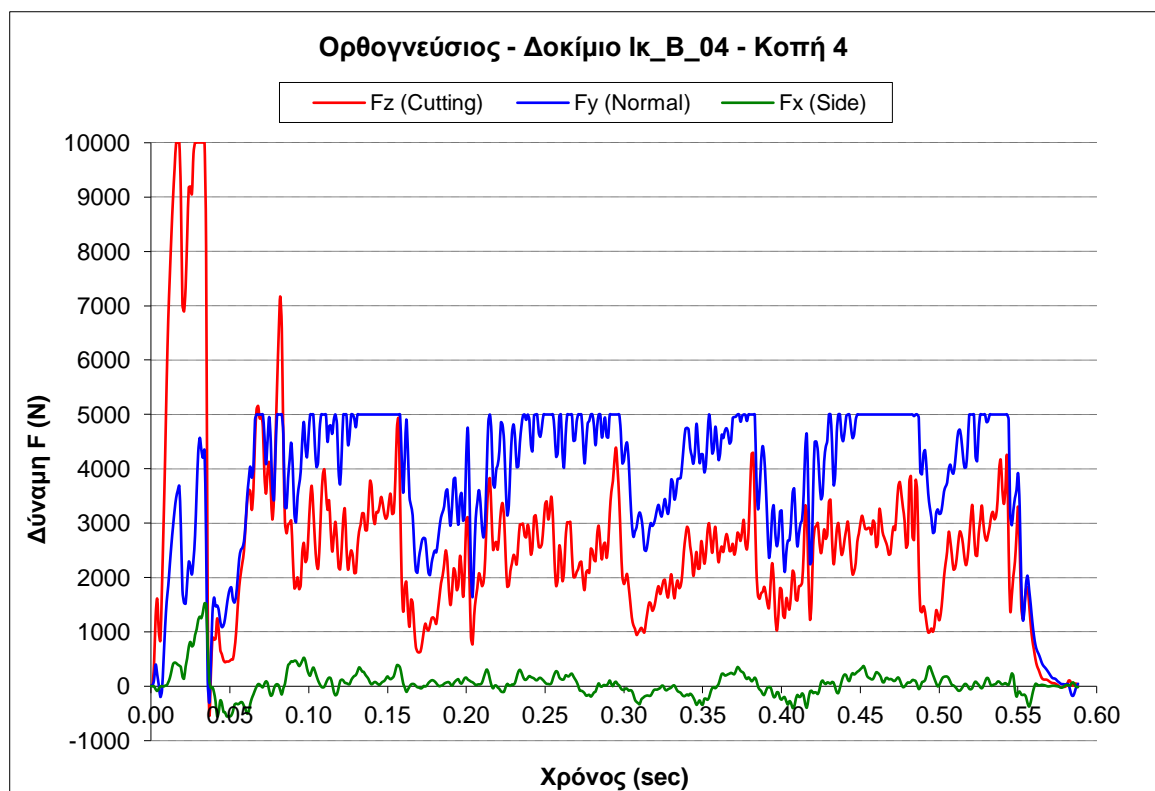
5.2.5. Επεξεργασία και υπολογισμοί των πειραματικών αποτελεσμάτων

Στη δοκιμή της κοπής υποβλήθηκαν 2 δοκίμια ορθογνεύσιου Ικαρίας Α και 2 ορθογνεύσιου Ικαρίας Β. Τα γεωμετρικά στοιχεία, η αρχική μάζα και η πυκνότητα των δοκιμίων δίνονται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10. Διαστάσεις, μάζα και πυκνότητα των δοκιμίων κοπής.

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	Διάμετρος d (mm)	Μήκος L (mm)	Μάζα m (g)	Πυκνότητα ρ (g/cm ³)
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Α	Ik_A_03	55.21	103.19	648.8	2.626
	Ik_A_06	53.92	100.92	607.1	2.635
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Β	Ik_B_01	54.09	122.29	742.4	2.642
	Ik_B_04	54.08	145.71	883.7	2.640

Από τη δοκιμή λαμβάνεται διάγραμμα δυνάμεων συναρτήσει του χρόνου όπως αυτό του σχήματος 5.33.

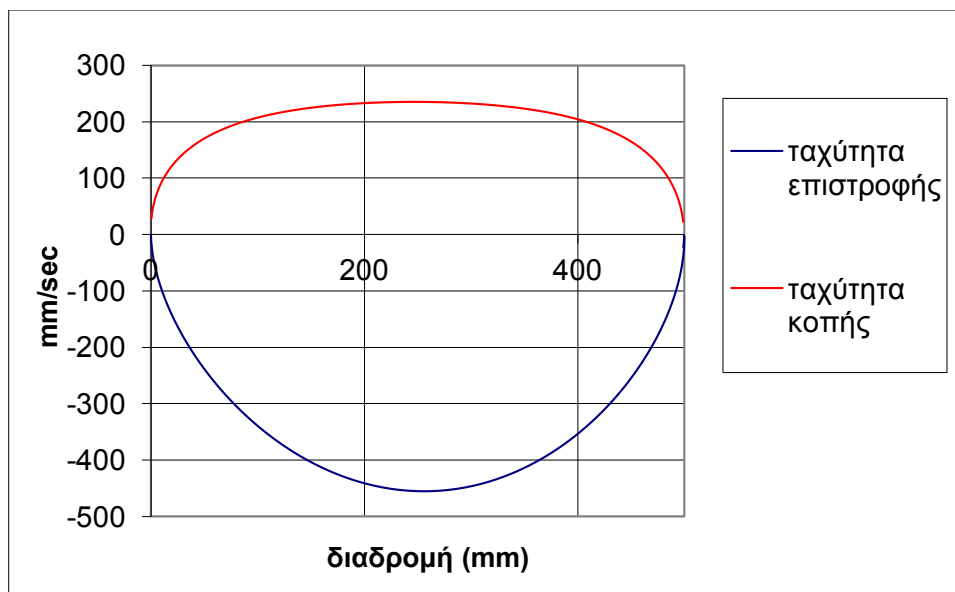


Σχήμα 5.33. Διάγραμμα δυνάμεων κατά την κοπή συναρτήσει του χρόνου.

Για τον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας κοπής 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: $W = \int F_z \cdot dl$, όπου F_z : δύναμη κοπής και dl : στοιχειώδης 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 . Θεωρώντας ότι η ταχύτητα του κοπτικού είναι σταθερή κατά την κοπή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.34 και γνωρίζοντας το συνολικό χρόνο κοπής (από το διάγραμμα δυνάμεων-χρόνου) και το μήκος του δοκιμίου, υπολογίζεται η ταχύτητα κοπής: $v_{\text{κοπής}} = \frac{\text{μήκος δοκιμίου}}{\text{χρόνος κοπής}}$.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα κοπής, υπολογίζεται η μετατόπιση δl που αντιστοιχεί σε χρόνο δt : $\delta l = v_{\text{κοπής}} \cdot \delta t$.



Σχήμα 5.34. Διάγραμμα ταχύτητας κοπτικού κατά την εκτέλεση των δοκιμών κοπής (Αναγνώστου 2006).

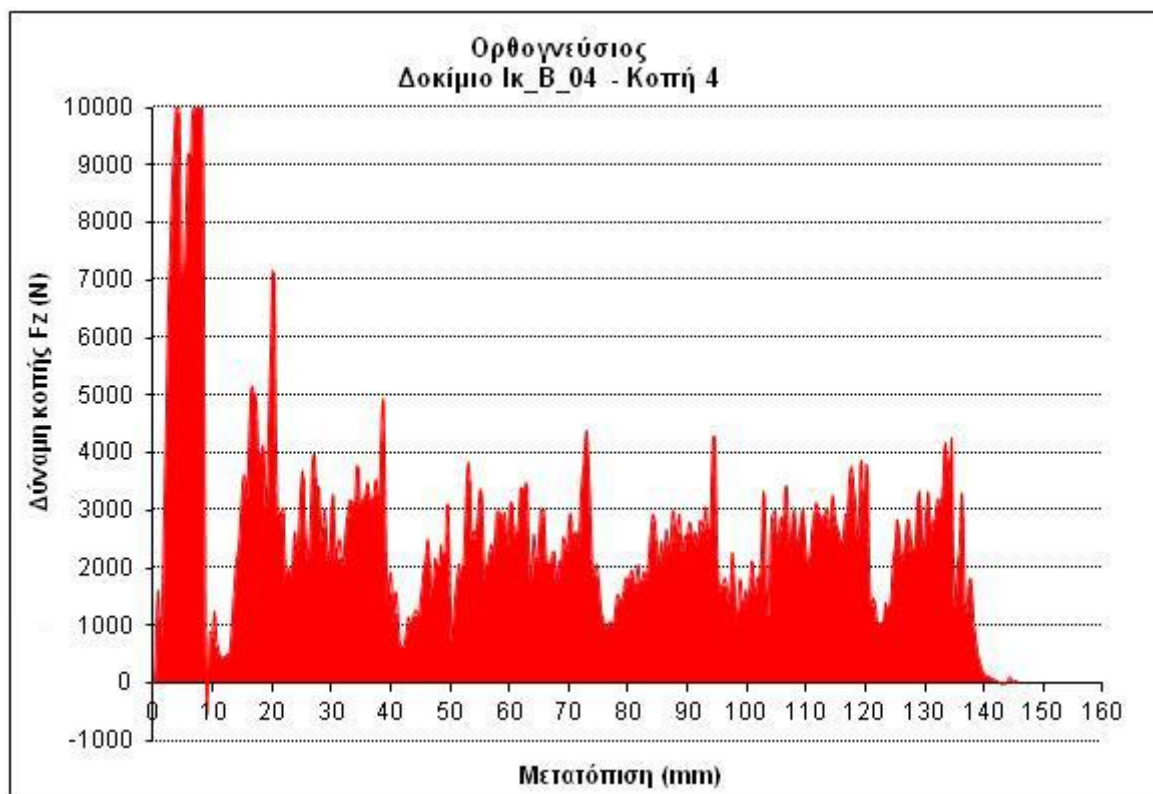
Βάσει της παραπάνω διαδικασίας το διάγραμμα δυνάμεων-χρόνου μετατρέπεται σε διάγραμμα δυνάμεων-μετατόπισης, όπως δείχνει το σχήμα 5.35.

Το έργο της δύναμης κοπής F_z υπολογίζεται ως το γινόμενο της μέσης δύναμης κοπής F_{zav} με τη συνολική μετατόπιση.

Η μάζα του δοκιμίου μετράται πριν και μετά από κάθε κοπή όπως φαίνεται στον πίνακα 5.11. Αυτή η διαφορά της μάζας του δοκιμίου είναι η μάζα η οποία εξορύχτηκε.

Διαιρώντας την εξορυγμένη μάζα με την πυκνότητα του δοκιμίου υπολογίζεται ο όγκος που εξορύχτηκε.

Τέλος το πηλίκο του έργου της δύναμης κοπής F_z με τον εξορυγμένο όγκο είναι ο δείκτης της ειδικής ενέργειας κοπής του πετρώματος.



Σχήμα 5.35. Έργο δύναμης κοπής.

Τα διαγράμματα δυνάμεων-χρόνου και δύναμης κοπής-μετατόπισης των δοκιμών παρατίθενται στο Παράρτημα 2.

Από τα διαγράμματα που λαμβάνονται αφαιρούνται ο πρώτος κύκλος φόρτισης, όπου αναπτύσσονται στιγμιαία πολύ υψηλές δυνάμεις (όπως φαίνεται στο σχήμα 5.35), καθώς και ο τελευταίος, ο οποίος συνοδεύεται από τη δημιουργία μεγάλου μεγέθους θραύσματος (chip).

Στον πίνακα 5.11 δίνονται οι μετρήσεις της μάζας των δοκιμίων πριν και μετά από κάθε κοπή και στους πίνακες 5.12 και 5.13 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου. Ο δείκτης ειδικής ενέργειας κοπής των ορθογνεύσιων Α και Β υπολογίστηκε ως η μέση τιμή των δεικτών των δοκιμίων τους.

Πίνακας 5.11. Μάζα των δοκιμίων πριν και μετά από κάθε κοπή.

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	Μάζα δοκιμίου (g)				
		Αρχική	Κοπή 1	Κοπή 2	Κοπή 3	Κοπή 4
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Α	Ικ_Α_03	641.9*	626.8	595.8	-	-
	Ικ_Α_06	607.1	600.2	-	-	-
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Β	Ικ_Β_01	726.6*	708.4	-	-	-
	Ικ_Β_04	883.7	869.8	859.5	849.8	837.6

* Μάζα των δοκιμίων Ικ_Α_03 και Ικ_Β_01 μετά από την εκτέλεση 1 και 2 κοπών αντίστοιχα, για τις οποίες δεν υπολογίστηκε ο δείκτης ειδικής ενέργειας κοπής, λόγω μικρότερου βάθους κοπής από τα 5 mm που ορίζουν οι προδιαγραφές της δοκιμής.

- Δεν εκτελέστηκαν σε όλα τα δοκίμια τέσσερις κοπές λόγω του ότι μετά την εκτέλεση της τελευταίας κοπής τους, τα δοκίμια θραύονταν (με το επίπεδο θραύσης τους να είναι κάθετο στον άξονα τους) με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εκτέλεση επόμενης κοπής.

Πίνακας 5.12. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου.

ΠΕΤΡΩΜΑ	Δοκίμιο	A/A Κοπής	F _{zmax} (N)	F _{zav} (N)	l (m)	W (J)	m (g)	ρ (g/cm ³)	V (cm ³)	SE (MJ/m ³)	SE δοκιμίου (MJ/m ³)
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Α	Iκ_A_03	1	9979.95	2479.37	0.0760	188.457	15.1	2.626	5.750	32.775	26.823
		2	9979.19	3113.80	0.0791	246.364	31.0	2.626	11.805	20.870	
	Iκ_A_06	1	7081.23	2520.20	0.0716	180.446	6.9	2.635	2.619	68.904	68.904
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Β	Iκ_B_01	1	8299.34	2077.87	0.1035	215.018	18.2	2.642	6.888	31.216	31.216
	Iκ_B_04	1	5363.31	2096.01	0.1275	267.221	13.9	2.640	5.265	50.755	65.627
		2	5175.43	2397.12	0.1211	290.292	10.3	2.640	3.901	74.409	
		3	6008.18	2095.14	0.1240	259.840	9.7	2.640	3.674	70.723	
		4	7147.36	2445.61	0.1259	307.854	12.2	2.640	4.621	66.621	

F_{zmax}: μέγιστη δύναμη κοπής, F_{zav}: μέση δύναμη κοπής, l: μήκος του δοκιμίου, W: έργο της μέσης δύναμης κοπής, m: εξορυγμένη μάζα, ρ: πυκνότητα, V: εξορυγμένος όγκος, SE: ειδική ενέργεια κοπής.

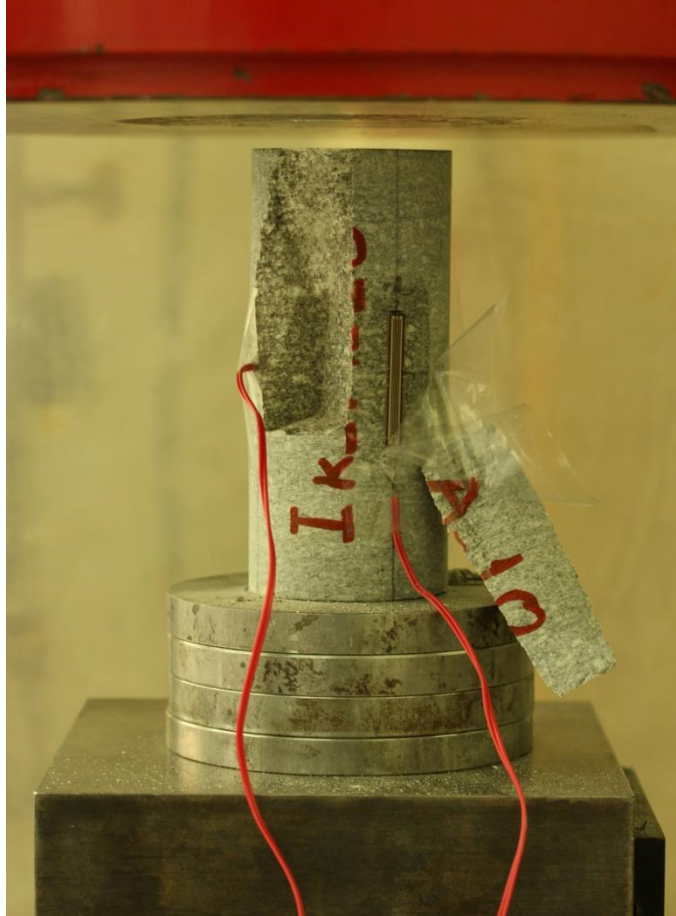
Πίνακας 5.13. Δείκτης ειδικής ενέργειας κοπής SE (MJ/m³) των ορθογνεύσιων Α και Β.

Πέτρωμα	count	min	average ± sd	max
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Α	2	26.823	47.863 ± 29.756	68.904
Ορθογνεύσιος Ικαρίας Β	2	31.216	48.421 ± 24.332	65.627

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

6.1. Δοκιμή μονοαξονικής (ή ανεμπόδιστης) θλίψης



Σχήμα 6.1. Ψαθυρή θραύση πετρώματος κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

1. Σκοπός της δοκιμής

Κατά τη δοκιμή αυτή, κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη με σκοπό να υπολογιστεί η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (Uniaxial Compressive Strength). Επίσης, με βάση το διάγραμμα τάσης-ανηγμένων παραμορφώσεων που λαμβάνεται από τη δοκιμή υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος E (Young's Modulus), καθώς και ο συντελεστής Poisson ν (Poisson's Ratio).

2. Εφαρμοζόμενος κανονισμός προδιαγραφών

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1979), Vol.16, No.2, pp.137-140. "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1."

3. Εργαστηριακός εξοπλισμός

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός απεικονίζεται στο σχήμα 6.2 και περιλαμβάνει:

α) Μηχανή δοκιμών θλίψης TONIPACT 3000, γερμανικής προέλευσης, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δυναμικότητα φόρτισης 3000 kN (300 t).
- Δυνατότητα επιλογής του ρυθμού φόρτισης.
- Καταγραφή της μέγιστης τιμής φορτίου της δοκιμής.
- Ψηφιακή ένδειξη του φορτίου σε kN.
- Δυνατότητα περιστροφής της άνω πλάκας φόρτισης, ώστε να εφάπτεται αυτή με τη βάση του δοκιμίου.

β) Ηλεκτρικοί μετρητές παραμορφώσεων της Kyowa, ιαπωνικής κατασκευής, με δυνατότητα απ' ευθείας καταγραφής των παραμορφώσεων. Αυτοί αποτελούνται από δύο ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα (strain gauges), με μήκος 3 cm.

γ) Ηλεκτρονικός Υπολογιστής.



Σχήμα 6.2. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

4. Περιγραφή του πειράματος

α) Αριθμός δοκιμίων

Χρησιμοποιούνται 2 δοκίμια ορθογνεύσιου Ικαρίας Α και 2 ορθογνεύσιου Ικαρίας Β.

β) Προδιαγραφές δοκιμίων

- Διαστάσεις

Τα δοκίμια έχουν κυλινδρική μορφή, διάμετρο 54.7mm (NX μέγεθος πυρήνα) και λόγο $\frac{H}{D}$ από 2.2 έως 2.6 όπου:

H = το ύψος του δοκιμίου.

D = η διάμετρος του δοκιμίου. (Η διάμετρος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 54 mm και πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το μέγιστο μέγεθος κόκκου του υπό δοκιμή πετρώματος).

- Επιπεδότητα - παραλληλία των βάσεων

Οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να είναι επίπεδες με ανοχή 0.02 mm και κάθετες στο διαμήκη άξονα συμμετρίας του δοκιμίου, με απόκλιση όχι περισσότερο από 0.001 rad.

- Πλευρική επιφάνεια

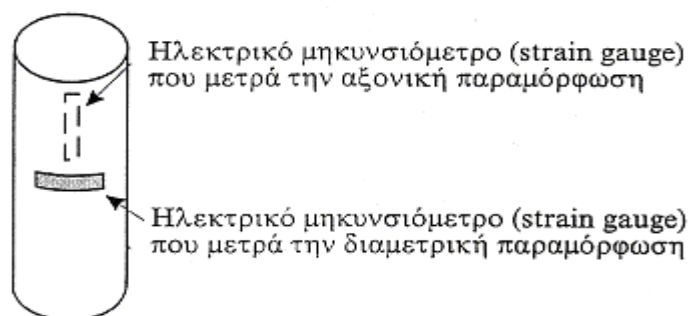
Η πλευρική επιφάνεια πρέπει να είναι λεία, με ανοχή όχι περισσότερο από 0.3 mm.

- Υγρασία

Τα δοκίμια πρέπει να έχουν ληφθεί πριν από 30 ημέρες το πολύ από το μητρικό πέτρωμα, έτσι ώστε να διατηρούν τη φυσική τους υγρασία.

γ) Τοποθέτηση των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης

Η τοποθέτηση των μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) γίνεται με τη χρήση ειδικής κόλλας, σύμφωνα με το σχήμα 6.3. Ο κατακόρυφος μετρητής μετράει την αξονική παραμόρφωση (axial strain) του δοκιμίου και ο οριζόντιος τη διαμετρική παραμόρφωση (lateral strain).



Σχήμα 6.3. Επικόλληση των μετρητών παραμορφώσεων (Τσουτρέλης et al. 2000).

δ) Ρυθμός φόρτισης του δοκιμίου

Η φόρτιση του δοκιμίου πρέπει να είναι συνεχόμενη με σταθερό ρυθμό, έτσι ώστε η θραύση του δοκιμίου να συμβαίνει μέσα σε 5 έως 10 λεπτά.

ε) Καταγραφή του ασκούμενου φορτίου και των παραμορφώσεων

Κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών καταγράφονται οι ενδείξεις φορτίου (load) της θλιπτικής μηχανής (σε kN) και οι ενδείξεις παραμορφώσεων των δύο ενισχυτών σήματος (σε mm/m) ανά second, μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

5. Υπολογισμοί

α) Υπολογισμός της τάσης

Η θλιπτική τάση με την οποία καταπονείται το δοκίμιο δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6.1)$$

όπου P το θλιπτικό φορτίο σε kN και A το εμβαδόν της βάσης του κυλινδρικού δοκιμίου όπως μετρήθηκε πριν από τη δοκιμή. Το πηλίκο αυτό εκφράζεται συνήθως σε MPa.

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS, ορίζεται το πηλίκο του μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου (δηλ. του φορτίου θραύσης P_{max}) που θα ασκηθεί κατά τη δοκιμή, ως προς την αρχική διατομή του δοκιμίου A.

$$UCS = \frac{P_{max}}{A} \quad (6.2)$$

β) Αξονική (axial) ϵ_x και διαμετρική (lateral) ϵ_y παραμόρφωση

Ανηγμένη παραμόρφωση ή απλά παραμόρφωση ϵ ενός σώματος ονομάζεται ο λόγος της μεταβολής του μήκους του Δl , προς το αρχικό μήκος l_0 και δίνεται από τη σχέση:

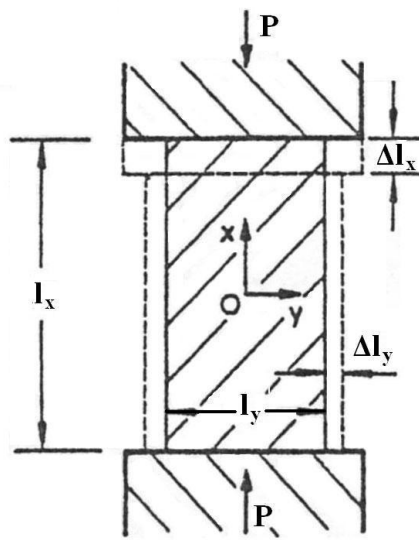
$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6.3)$$

Είναι αδιάστατο μέγεθος και εκφράζεται συνήθως σε mm/m.

Επομένως, η αξονική και διαμετρική παραμόρφωση δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta l_x}{l_x} \quad \text{και} \quad \epsilon_y = \frac{\Delta l_y}{l_y} \quad (6.4)$$

Στο σχήμα 6.4 φαίνεται η παραμόρφωση κυλινδρικού δοκιμίου που υπόκειται σε θλίψη.

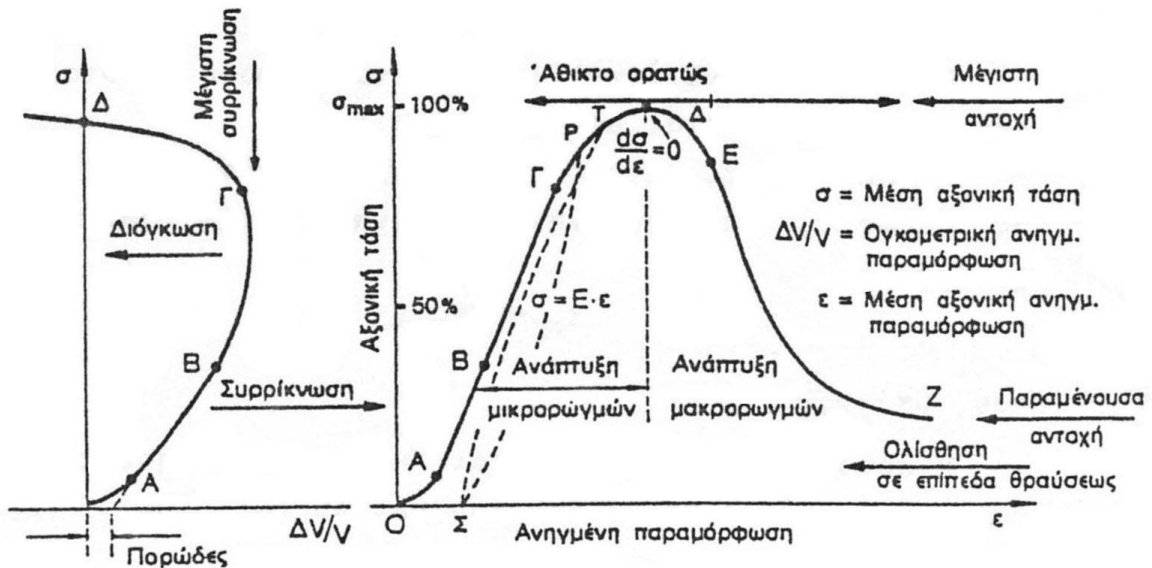


Σχήμα 6.4. Παραμόρφωση κυλινδρικού δοκιμίου σε θλίψη (Τσουτρέλης 1985).

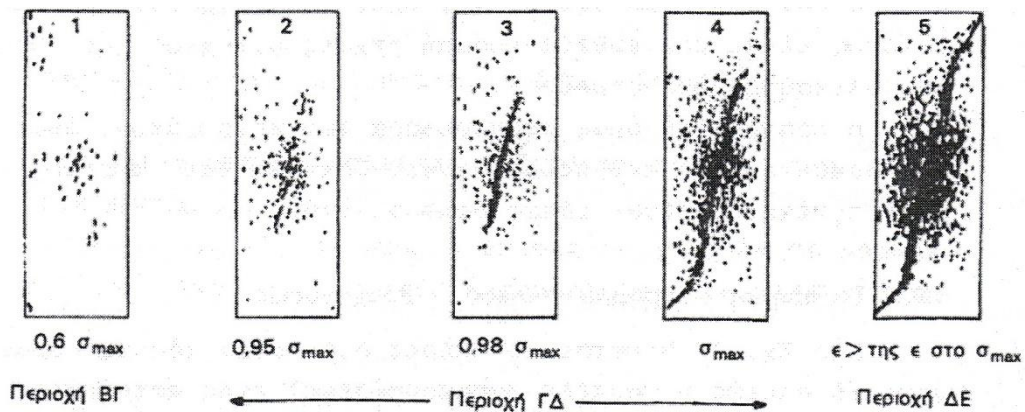
γ) Χάραξη του διαγράμματος τάσης - παραμορφώσεων

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίζοντας δηλαδή την τάση και γνωρίζοντας τη διαμετρική και την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου, μπορούμε να χαράξουμε το διάγραμμα τάσης - παραμορφώσεων.

Στο σχήμα 6.5 δίνεται το πλήρες διάγραμμα τάσης-παραμορφώσεων ενός κρυσταλλικού πετρώματος (χαλαζίτης) και στο σχήμα 6.6 οι σχετικές μεταβολές στη δομή του δοκιμίου καθώς αυτό φορτίζεται.



Σχήμα 6.5. Πλήρες διάγραμμα τάσης-παραμορφώσεων (Τσουτρέλης 1985).



Σχήμα 6.6. Σχετικές μεταβολές στη δομή του δοκιμίου (Τσουτρέλης 1985).

Το διάγραμμα αυτό μπορεί να χωριστεί με βάση τη μορφή του και το μηχανισμό ρωγμάτωσης του πετρώματος σε έξι τμήματα.

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

Στο τμήμα ΑΒ το πέτρωμα παρουσιάζει μία σχεδόν ευθύγραμμη αξονική και πλευρική σχέση μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης, που είναι αναστρέψιμη. Οι πόροι και οι μικρορωγμές θεωρείται ότι έχουν κλείσει στο τμήμα αυτό και μόνο ολίσθηση μεταξύ των απέναντι επιφανειών πιστεύεται ότι συμβαίνει εδώ.

Στο τμήμα ΒΓ, όπου θεωρείται ότι συμβαίνει, με σταθερό ρυθμό, σε όλο το πέτρωμα και κατά ανεξάρτητο μεταξύ τους τρόπο, όπως δείχνει το σχήμα 6.6 (1), επέκταση διαφόρων μικρορωγμών που προϋπήρχαν. Κατά την αποφόρτιση του δοκιμίου είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μικρή υστέρηση, αλλά γενικά μέχρι το σημείο Γ δεν προκαλούνται στο πέτρωμα μόνιμες παραμορφώσεις. Πρακτικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η όλη συμπεριφορά του πετρώματος μέχρι το σημείο Γ είναι γραμμικά ελαστική και επομένως ακολουθεί το νόμο του Hooke.

Στο τμήμα ΓΔ, το οποίο αρχίζει συνήθως σε εντατική κατάσταση της τάξης των 2/3 έως 3/4 της μέγιστης, η κλίση της καμπύλης μειώνεται βαθμιαία μέχρι μηδενισμού της στο σημείο Δ, που δίνει τη μέγιστη ένταση. Το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από ταχεία επιτάχυνση του ρυθμού μικρορωγμάτωσης, όπως δείχνουν τα σχήματα 6.6 (2), (3) και (4). Η ανάπτυξη των μικρορωγμών δεν είναι πλέον τυχαία. Πραγματοποιείται σε περιοχές υψηλών τάσεων και οι μικρορωγμές αρχίζουν να ενώνονται μεταξύ τους και να σχηματίζουν εφελκυστικές ρωγμές ή επίπεδα διάτμησης, ανάλογα με το πέτρωμα και τις συνθήκες δοκιμής. Αλληπάλληλοι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης σχηματίζουν βρόγχους σαν τον ΡΣΤ του σχήματος 6.6 με μόνιμη πλέον παραμόρφωση του πετρώματος. Συνεπώς το πέτρωμα στην περιοχή αυτή συμπεριφέρεται σαν πλαστικό υλικό. Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι στο υπόψη διάγραμμα το σημείο Γ είναι ταυτόχρονα το όριο αναλογίας και το όριο ελαστικότητας του πετρώματος, δηλ. το ανώτατο όριο φόρτισης του μέχρι του οποίου δεν παρατηρούνται μόνιμες παραμορφώσεις.

Στο τμήμα ΔΕ το πέτρωμα πέρασε τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δεχτεί και αρχίζει πλέον να γίνεται διαρκώς ασθενέστερο καθώς αυξάνει η παραμόρφωση του. Η εξωτερική του μορφή φαίνεται ακόμη άθικτη αλλά εσωτερικά η δομή του έχει διαταραχτεί, όπως δείχνει το σχήμα 6.6 (5). Οι μικρορωγμές συγκεντρώνονται και σχηματίζουν πλέον σαφείς μακρορωγμές ή ρήγματα.

Στο τελευταίο τμήμα ΕΖ το πέτρωμα συμπεριφέρεται περισσότερο σαν να αποτελείται από μία σειρά τεμαχίων παρά σαν συνεχές υλικό. Στην αρχή είναι δυνατό να παρατηρηθεί δευτερογενής θραύση κατά μήκος διατμητικών επιπέδων. Στη συνέχεια παρατηρείται ολίσθηση τεμαχίων του ενός προς το άλλο και η δύναμη που αντιδρά στο επιβαλλόμενο φορτίο φτάνει τελικά σε μία σταθερή τιμή, που ισούται με την αντίσταση τριβής σε ολίσθηση των τεμαχίων.

Τα τμήματα ΔΕ και ΕΖ είναι γενικά περιορισμένα σε έκταση στα πετρώματα και με τις συνήθεις μηχανές δοκιμών δε μπορούν να ανιχνευτούν ικανοποιητικά, γιατί επισκιάζονται από την παραμόρφωση της μηχανής. Αυτό συμβαίνει γιατί μία συνηθισμένη μηχανή δοκιμών, κατά την επιβολή του φορτίου στο δοκίμιο του πετρώματος, υφίσταται και η ίδια παραμόρφωση, όλη δε η ενέργεια που συσσωρεύεται σε αυτή, ελευθερώνεται τη στιγμή της έναρξης της αστοχίας του πετρώματος στο σημείο Δ. Η απότομη αυτή έκλυση ενέργειας προκαλεί άμεση θραύση του δοκιμίου, που συνοδεύεται συνήθως από εκτίναξη των θραυσμάτων του, μερικές φορές με βιαιότητα.

δ) Υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας

Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t)

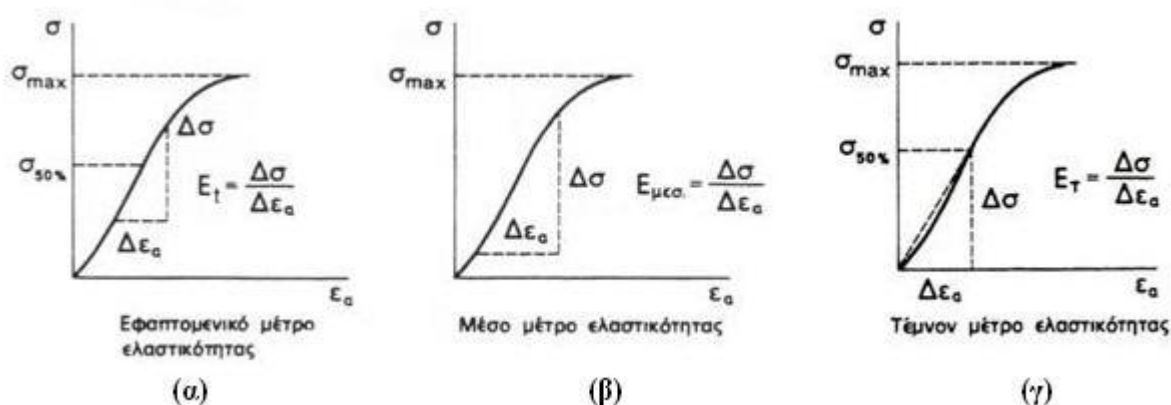
Υπολογίζεται από την καμπύλη τάσης-αξονικής παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7 (α), ως εξής: Σε σημείο που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό της μέγιστης τάσης (συνήθως το 50%) φέρεται η εφαπτομένη. Η κλίση της ευθείας αυτής είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας και εκφράζεται σε GPa.

Μέσο μέτρο ελαστικότητας ($E_{μ\epsilon\sigma}$)

Υπολογίζεται από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου χονδρικά τμήματος της ίδιας καμπύλης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7 (β). Εκφράζεται σε GPa.

Τέμνον μέτρο ελαστικότητας (E_T)

Υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που χαράσσεται στην ίδια καμπύλη, για τιμές τάσης μεταξύ 0 και συνήθως 50% της μέγιστης τάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7 (γ). Εκφράζεται σε GPa.



Σχήμα 6.7. Γραφικός προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας (Τσουτρέλης 1985).

ε) Υπολογισμός του συντελεστή Poisson

Ο συντελεστής Poisson υπολογίζεται από τη σχέση:

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

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

Για κάθε δοκίμιο που εκτελέστηκε η δοκιμή υπολογίστηκαν το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (E_t) και ο εφαπτομενικός λόγος του Poisson, στο σημείο που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης τάσης ($\sigma_{50\%}$).

6. Πειραματικά αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα ανωτέρω συμπληρώνεται ο πίνακας 6.1 και χαράσσεται το διάγραμμα τάσης-παραμορφώσεων για κάθε δοκίμιο. Τα διαγράμματα αυτά, καθώς και φωτογραφίες των δοκιμίων πριν και μετά την εκτέλεση της δοκιμής παρατίθενται στο Παράρτημα 3.

Πίνακας 6.1. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Πέτρωμα	Δοκίμιο	dP/dt (kN/s)	t (min)	P _{max} (kN)	UCS (MPa)	Et (GPa)	v
Ορθογνέσιος Ικαρίας Α	Ik_A_04	0.75	8.55	400.0	174.5	46.53	0.298
	Ik_A_10	0.75	7.52	353.0	154.6	49.94	0.227
Ορθογνέσιος Ικαρίας Β	Ik_B_02	0.75	6.40	302.1	131.3	45.64	0.266
	Ik_B_03*	0.75	5.60	266.3	116.0	43.82	0.273

dP/dt: ρυθμός φόρτισης, t: διάρκεια δοκιμής, P_{max}: φορτίο θραύσης, UCS: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, Et: αξονικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ($\sigma_{50\%}$), v: εφαπτομενικός λόγος του Poisson ($\sigma_{50\%}$).

* Η αποκόλληση από το δοκίμιο και των δύο strain gauges πριν την ολοκλήρωση της δοκιμής είχε ως αποτέλεσμα να μην καταγραφούν οι παραμορφώσεις καθ' όλη τη διάρκεια της και επομένως να μην είναι δυνατή η χάραξη του διαγράμματος τάσης-παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Επειδή όμως υπήρξε καταγραφή μέχρι την τάση των 78 MPa (με το 50% της τάσης θραύσης να είναι $\sigma_{50\%}=58$ MPa) κατέστη δυνατός ο υπολογισμός του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας και του εφαπτομενικού λόγου του Poisson ($\sigma_{50\%}$).

Τα μεγέθη του πίνακα 6.2 των ορθογνέσιων υπολογίστηκαν ως οι μέσες τιμές των δοκιμίων τους.

Πίνακας 6.2. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Πέτρωμα	UCS ± sd (MPa)	Et ± sd (GPa)	v ± sd
Ορθογνέσιος Ικαρίας Α	164.5 ± 14.1	48.24 ± 2.42	0.262 ± 0.051
Ορθογνέσιος Ικαρίας Β	123.6 ± 10.8	44.73 ± 1.29	0.269 ± 0.005

Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων και του πίνακα 6.3 οι ορθογνέσιοι χαρακτηρίζονται ως προς την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη πολύ ισχυροί.

Πίνακας 6.3. Ταξινόμηση των πετρωμάτων βάσει της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (κατά ISRM 1981).

Βαθμονόμηση	Χαρακτηρισμός	UCS (MPa)
R6	Εξαιρετικά ισχυρό	>250
R5	Πολύ ισχυρό	100-250
R4	Ισχυρό	50-100
R3	Μετρίως ισχυρό	25-50
R2	Ασθενές	5-25
R1	Πολύ ασθενές	1-5
R0	Εξαιρετικά ασθενές	0.25-1

6.2. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

1. Σκοπός της δοκιμής

Η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Tension Test) χρησιμοποιείται για την έμμεση μέτρηση της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Στη δοκιμή αυτή, δοκίμιο μορφής δίσκου υποβάλλεται σε αντιδιαμετρική θλίψη μέχρι θραύσης. Υπό αυτές τις συνθήκες φόρτισης, το δοκίμιο αστοχεί κατά τη διάμετρο φόρτισης σε εφελκυσμό και η εφελκυστική τάση που θα προκαλέσει την αστοχία αυτή, θεωρείται ότι είναι ίση με την αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Η δοκιμή βασίζεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα πετρώματα, όταν βρεθούν σε διαξονικά εντατικά πεδία αστοχούν σε εφελκυσμό, όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη κύρια τάση θλιπτική και εφόσον το μέγεθος της τελευταίας δεν υπερβαίνει το τριπλάσιο της κύριας εφελκυστικής τάσης.

2. Εφαρμοζόμενος κανονισμός προδιαγραφών

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1978), Vol. 15, No. 3, pp. 99-103. “Suggested methods for determining tensile strength of rock materials”.

3. Εργαστηριακές μηχανές

Χρησιμοποιούνται οι εξής δύο θλιπτικές μηχανές:

α) Η θλιπτική μηχανή είναι ιταλικής κατασκευής, του οίκου CONTROLS (Uniframe) με τα εξής χαρακτηριστικά:

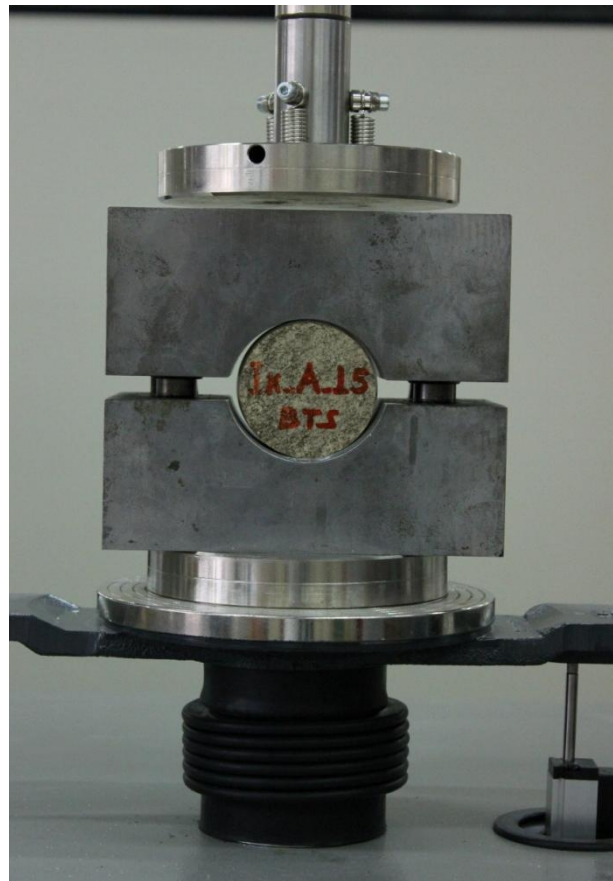
- Αυτόματη εκτέλεση της δοκιμής με σταθερό ρυθμό φόρτισης.
- Δυναμικότητα φόρτισης 50 kN (5 t).
- Δυνατότητα επιλογής του ρυθμού φόρτισης.
- Καταγραφή του φορτίου και της μετατόπισης.
- Ψηφιακή ένδειξη του διαγράμματος φορτίου/μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο.

β) Η μηχανή δοκιμών θλίψης TONIPACT 3000 η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 6.2, γερμανικής προέλευσης, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δυναμικότητα φόρτισης 3000 kN (300 t).
- Δυνατότητα επιλογής του ρυθμού φόρτισης.
- Καταγραφή της μέγιστης τιμής φορτίου της δοκιμής.
- Ψηφιακή ένδειξη του φορτίου σε kN.

Χρησιμοποιείται ακόμη δακτύλιος προσαρμογής του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8, αποτελούμενος από δύο σιαγόνες φόρτισης σχεδιασμένες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εφάπτονται στο μορφής δίσκου δοκίμιο πετρώματος, σε δύο διαμετρικά αντίθετες επιφάνειες κατά ένα μήκος τόξου 10° τη στιγμή της αστοχίας.

Η μηχανή η οποία χρησιμοποιήθηκε για κάθε δοκίμιο φαίνεται στον πίνακα 6.4.



Σχήμα 6.8. Δακτύλιος προσαρμογής του δοκιμίου για τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.

4. Περιγραφή του πειράματος

Η δοκιμή πραγματοποιείται σε δοκίμια πετρώματος μορφής δίσκου. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία δίνεται από την I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics). Βάσει 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, 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.

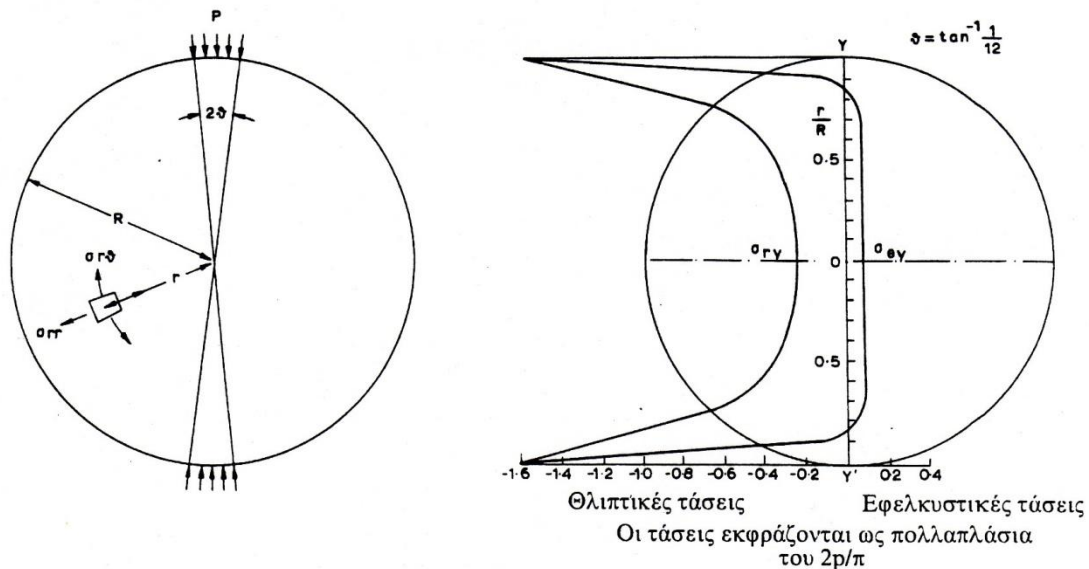
Το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι τη στιγμή της αστοχίας του. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη μέτρηση του φορτίου αστοχίας, καθόσον υπάρχουν περιπτώσεις όπου το δοκίμιο εξακολουθεί να αναλαμβάνει αυξημένα φορτία ακόμη και ύστερα από την αστοχία του. Παρά ταύτα, η διαφορά μεταξύ του φορτίου αρχικής θραύσης 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. Το ISRM προτείνει 10 δοκιμές ανά δείγμα.

5. Θεωρία της δοκιμής

Στην περίπτωση δίσκου από ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό υλικό, ο οποίος φορτίζεται ομοιόμορφα αντιδιαμετρικά, είναι δυνατό με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας να υπολογισθούν οι τάσεις εφελκυσμού σ_θ και θλίψης σ_r κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης Y-Y'.

Η μεταβολή των τάσεων αυτών κατά μήκος της Y-Y' δίνεται στο σχήμα 6.9 για την περίπτωση όπου $\theta = \tan^{-1}(1/12) \Rightarrow 2\theta = 9,5^\circ$. Από αυτήν προκύπτει ότι η τάση σ_θ , με εξαίρεση τις αντιδιαμετρικές περιοχές φόρτισης, είναι εφελκυστική στο μεγαλύτερο τμήμα της διαμέτρου Y-Y' και ταυτόχρονα σταθερή.



Σχήμα 6.9. Μεταβολή της εφελκυστικής (σ_θ) και της θλιπτικής (σ_r) τάσης κατά μήκος της διαμέτρου Y-Y' για φόρτιση υπό γωνία $2\theta = 9,5^\circ$ (Τσουτρέλης 1985).

Η εφελκυστική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$BTS = \sigma_\theta = -\frac{P}{\pi \cdot r_0 \cdot t} \cdot \left(\frac{\sin 2\alpha}{\alpha} - 1 \right) \quad (6.5)$$

όπο: P: επιβαλλόμενο φορτίο τη στιγμή της αστοχίας

r_0 : ακτίνα του μορφής δίσκου δοκιμίου

t: πάχος του μορφής δίσκου δοκιμίου

2α: τόξο γωνίας στο οποίο δρα ομοιόμορφα το φορτίο P επί του δοκιμίου

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

$$BTS = \sigma_\theta = -\frac{2P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad (6.6)$$

όπου $d = 2 r_0 =$ διάμετρος του δοκιμίου

Οι σχέσεις (6.5) και (6.6) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό του πετρώματος (BTS), υπό την προϋπόθεση ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται έναρξη αστοχίας του δοκιμίου κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης.

Επίδραση των παραμέτρων

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

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

6. Πειραματικά αποτελέσματα

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε 6 δοκίμια ορθογώνσιου A και σε 4 δοκίμια ορθογώνσιου B. Τα αποτελέσματα της παρατίθενται στον πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Tension Test).

Πέτρωμα	Δοκίμιο	Μηχανή	Πάχος t (mm)	Διάμετρος d (mm)	Ρυθμός φόρτισης (N/s)	Διάρκεια δοκιμής (min)	Φορτίο θραύσης P (kN)	BTS (MPa)
Ορθογώνσιος Ικαρίας A	Ik_A_11	CONTROLS	28.39	53.98	75	11.03	48.54	20.2
	Ik_A_12	TONIPACT	28.43	53.80	150	3.60	49.70	20.7
	Ik_A_13	TONIPACT	27.47	53.77	150	4.84	46.70	20.1
	Ik_A_14	TONIPACT	27.80	53.74	100	2.80	34.30	14.6
	Ik_A_15	TONIPACT	27.95	54.12	100	5.44	50.40	21.2
	Ik_A_16	TONIPACT	27.71	54.11	100	5.20	48.90	20.8
Ορθογώνσιος Ικαρίας B	Ik_B_06	CONTROLS	28.52	54.10	75	7.10	31.20	12.9
	Ik_B_07	CONTROLS	28.42	54.00	100	3.42	20.10	8.3
	Ik_B_08	CONTROLS	24.36	54.10	100	3.02	17.85	8.6
	Ik_B_09	CONTROLS	24.85	54.06	100	3.57	21.16	10.0

Η αντοχή σε εφελκυσμό (Brazilian Tensile Strength) των ορθογώνσιων, υπολογίστηκε ως η μέση τιμή των αντοχών των δοκιμίων τους και παρατίθεται στον πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5. Αντοχή σε εφελκυσμό (BTS) των ορθογώνσιων A και B.

Πέτρωμα	count	min	average \pm sd	max
Ορθογώνσιος Ικαρίας A	6	14.6	19.6 \pm 2.5	21.2
Ορθογώνσιος Ικαρίας B	4	8.3	10.0 \pm 2.1	12.9

6.3. Δοκιμές σκληρομέτρησης των πετρωμάτων

Ως σκληρότητα (αν και ο ορισμός της δεν είναι μονοσήμαντος) ορίζεται ο βαθμός αντίστασης ενός υλικού στην πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται από τη διείσδυση άλλων σωμάτων σε αυτό. Η σκληρότητα, καθώς και η φθοροποιός ικανότητα των πετρωμάτων εξαρτώνται από τον τύπο και την ορυκτολογική τους σύσταση, καθώς και από τη συνοχή των κόκκων των ορυκτών μεταξύ τους. Έχει αποδειχθεί ότι όσο πιο σκληρό είναι ένα πέτρωμα τόσο πιο μεγάλη αντίσταση παρουσιάζει έναντι διείσδυσης από εργαλεία μεθόδων κοπής.

Η σκληρότητα δεν αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα των πετρωμάτων, αλλά είναι περισσότερο μία ιδιότητα που ανήκει σε αυτές που περιγράφουν εμπειρικά τη συμπεριφορά των υλικών. Γι' αυτό το 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 (indentation tests).
- 2) Οι δυναμικές δοκιμές ή δοκιμές αναπήδησης (dynamic or rebound tests).
- 3) Οι δοκιμές χάραξης (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 διείσδυσης είναι γνωστές οι δοκιμές σκληρομέτρησης κατά Brinell, Vickers και Rockwell και δοκιμές χάραξης είναι οι δοκιμές σκληρότητας κατά Mohs και κατά Rosiwall. Οι δύο τελευταίες τεχνικές παρόλο που είναι ευρέως διαδεδομένες στο πεδίο της ορυκτολογικής ανάλυσης, δεν εξασφαλίζουν ακρίβεια και δε δίνουν πληροφορίες για τον ακριβή προσδιορισμό της φθοροποιού ικανότητας των πετρωμάτων, αφού αφορούν αποκλειστικά και μόνο στα ορυκτά των πετρωμάτων και όχι στο πέτρωμα ως σύνολο.

6.3.1. Δοκιμή σκληρομέτρησης με το σκληροσκόπιο Shore

1. Σκοπός της δοκιμής

Η δοκιμή αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για μεταλλικά υλικά, στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε υλικά οδοποιίας και πιο πρόσφατα στα πετρώματα. 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 ως ο μέσος όρος πολυάριθμων διαφορετικών μετρήσεων σε τυχαίες θέσεις του δοκιμίου και σε διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης κόκκους.

Περιορισμούς στη γενική χρήση του σκληροσκοπίου και στην ευρεία εφαρμογή του θέτουν η κοκκομετρία του εξεταζόμενου πετρώματος και η ομοιογένειά του. Σε στρωσιγενή ή σε χονδρόκοκκα υλικά οι τιμές της σκληρότητας Shore (SH) παρουσιάζουν διακυμάνσεις και συνήθως εμφανίζονται μειωμένες.

2. Εφαρμοζόμενος κανονισμός προδιαγραφών

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1978), Vol.15, No.3, pp.89-97. “Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks”.

3. Πειραματική συσκευή και μηχανισμός λειτουργίας

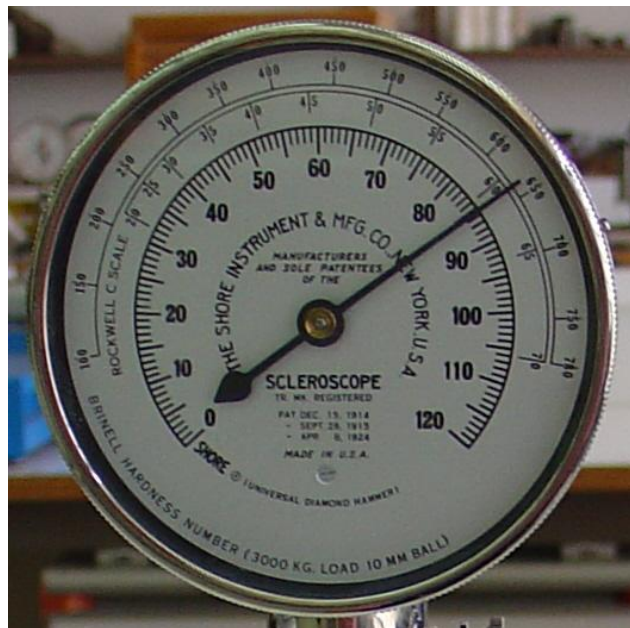
Η πειραματική συσκευή Shore (D model), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της δοκιμής απεικονίζεται στο σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10. Πειραματική συσκευή Shore (D model), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της δοκιμής.

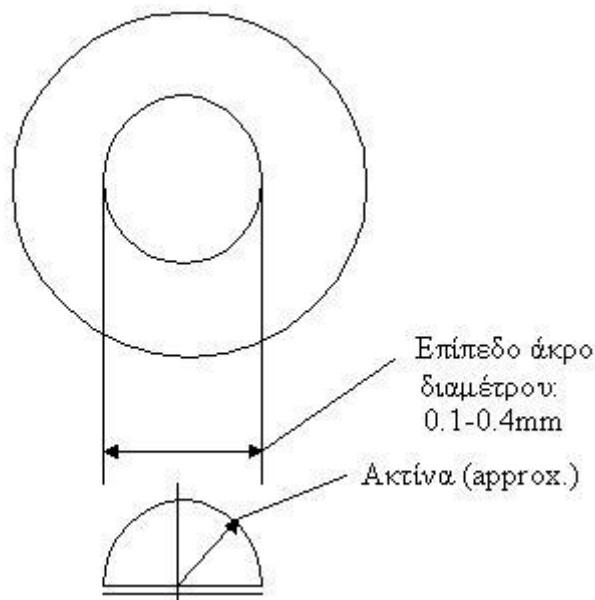
Το σκληροσκόπιο Shore (D model) αποτελείται από έναν κάθετα τοποθετημένο μεταλλικό κύλινδρο, εντός του οποίου κινείται σφύρα που καταλήγει σε στρογγυλεμένη αδαμάντινη ακμή. Μία βαθμονομημένη κλίμακα από την ένδειξη 0 έως την ένδειξη 120, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.11, είναι τοποθετημένη πάνω από το μεταλλικό σωλήνα, έτσι ώστε να είναι ορατή. Με τη βοήθεια χειροτροχού το δοκίμιο του πετρώματος συσφίγγεται ελαφρά μεταξύ της επίπεδης επιφάνειας δοκιμής της συσκευής και του άκρου του μεταλλικού σωλήνα. Με τη βοήθεια ενός ελατηριωτού κομβίου ανεβάζεται το αδαμάντινο σφυρί στην άνω θέση (στιγμιαία) και αφήνεται να πέσει και να αναπηδήσει ελεύθερα εντός του μεταλλικού σωλήνα, εξαιτίας της κρούσης στην

επιφάνεια του δοκιμίου. Η συσκευή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μετράει την αναπήδηση αυτή, δίνοντας την αντίστοιχη ένδειξη στη βαθμονομημένη κλίμακα. Επιπλέον, είναι ευαίσθητη στη χρήση της και παρόλο που είναι πολύ απλή και εξασφαλίζει ταχύτητα στις δοκιμές, απαιτεί ειδικευση στο χειρισμό της.



Σχήμα 6.11. Βαθμονομημένη κλίμακα σκληροσκοπίου Shore (D model).

Το αδαμάντινο σφυρί πρέπει να είναι σχηματισμένο έτσι ώστε να παράγει τη σωστή ανάγνωση στις στήλες αναφοράς, οι οποίες έχουν γνωστή σκληρότητα. Σε τομή το αδαμάντινο σφυρί είναι κυρτό και έχει ακτίνα η οποία καταλήγει σε μία επίπεδη κρουστική επιφάνεια, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.12. Η επίπεδη επιφάνεια κρούσης του σφυριού είναι περίπου κυκλική διαμέτρου 0.1-0.4mm και η γεωμετρία της εξαρτάται από τη σκληρότητα και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου διαμαντιού.



Σχήμα 6.12. Τομή του αδαμάντινου άκρου του σκληροσκοπίου Shore.

4. Πειραματική διαδικασία

α) Χρησιμοποιούμενα δοκίμια

Οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται σε επίπεδες, ομαλές και καλά λειαθείσες επιφάνειες χρησιμοποιώντας κατάλληλη λειαντική πούδρα (No. 1800 grade aluminium oxide abrasive powder). Μία τραχεία επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στις μετρήσεις, κυρίως από την πλευρά της ανάγνωσης μειωμένων τιμών σκληρότητας του υλικού. Σε ότι αφορά τις διαστάσεις και τη μορφή των δοκιμίων μπορεί να χρησιμοποιούνται και κυλινδρικά και κυβικά δοκίμια με κυμαινόμενο ύψος. Σε ότι αφορά τις διαστάσεις της επιφάνειας δοκιμής απαιτείται ελάχιστο εμβαδό επιφάνειας 10 cm² και ελάχιστο πάχος 1cm.

Για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των ορθογνύσιων Α και Β χρησιμοποιήθηκαν 11 κυλινδρικά δοκίμια για κάθε πέτρωμα, οι διαστάσεις των οποίων δίνονται στον πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6. Διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή Shore.

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	Ύψος h (mm)	Διάμετρος d (mm)	h / d
Ορθογνύσιος Ικαρίας Α	Ik_A_01	73.19	54.18	1.4
	Ik_A_02	88.06	53.88	1.6
	Ik_A_03	103.19	55.21	1.9
	Ik_A_04	127.75	54.01	2.4
	Ik_A_05	95.10	53.81	1.8
	Ik_A_06	100.92	53.92	1.9
	Ik_A_07	102.19	53.99	1.9
	Ik_A_08	103.28	53.96	1.9
	Ik_A_09	110.83	53.98	2.1
	Ik_A_10	118.88	53.91	2.2
	Ik_A_11	28.39	53.98	0.5
Ορθογνύσιος Ικαρίας Β	Ik_B_01	122.29	54.09	2.3
	Ik_B_02	132.47	54.11	2.4
	Ik_B_03	141.57	54.03	2.6
	Ik_B_04	145.71	54.08	2.7
	Ik_B_05	28.50	54.04	0.5
	Ik_B_06	28.52	54.10	0.5
	Ik_B_07	28.42	54.00	0.5
	Ik_B_08	24.36	54.10	0.5
	Ik_B_09	24.85	54.06	0.5
	Ik_B_11*	-	-	-
	Ik_B_12*	-	-	-

* Κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 54.7 mm και ύψους περίπου 90 mm με μη διαμορφωμένες τις βάσεις τους.

β) Εκτέλεση της δοκιμής

i) Πριν την έναρξη των δοκιμών είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται 5 αναγνώσεις της σκληρότητας σε πρότυπο δοκίμιο γνωστής σκληρότητας (παρεχόμενο από τον κατασκευαστή) και σε εύρος τιμών αντίστοιχο με αυτό της συσκευής. Εάν οι τιμές είναι κατιούσες εντός του εύρους της σκληρότητας του δοκιμίου τότε η συσκευή λειτουργεί ικανοποιητικά.

ii) Δοκίμια μικρού μεγέθους πρέπει να συγκρατούνται με ασφάλεια στην επίπεδη επιφάνεια δοκιμής της συσκευής και να τοποθετούνται κάθετα στον άξονα του σκληροσκοπίου.

iii) Για την εκτέλεση μίας δοκιμής, η συσκευή πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθετη θέση σε σχέση με τον κύλινδρο, του οποίου η άκρη πρέπει να εφαρμόζει ακριβώς στην επιφάνεια του δοκιμίου, επίσης σε κάθετη θέση. Ανεβάζεται το σφυρί με τη βοήθεια του ελατηριωτού κομβίου στην άνω θέση και αφήνεται να πέσει και να χτυπήσει την επιφάνεια δοκιμής, μετρώντας το ύψος αναπήδησης του σφυριού. Το ύψος στο οποίο το σφυρί αναπηδά για πρώτη φορά δείχνει τη σκληρότητα του υλικού.

iv) Προς αποφυγή σφαλμάτων που μπορεί να προέρχονται από κακή ευθυγράμμιση της συσκευής, συνίσταται ο έλεγχος της καθετότητας μέσω της αεροστάθμης.

v) Γενικά, πρέπει να αποφεύγονται πλευρικές δονήσεις στη συσκευή, διότι εμποδίζουν την απρόσκοπτη πτώση του σφυριού και προκαλούν ανάγνωση χαμηλών τιμών σκληρότητας.

vi) Είναι απαραίτητο να διενεργούνται τουλάχιστον 20 δοκιμές για κάθε δοκίμιο, σε θέσεις που απέχουν 5mm μεταξύ τους και ποτέ να μην επαναλαμβάνεται μία δοκιμή στο ίχνος της προηγούμενης.

Με βάση τα παραπάνω, σε κάθε δοκίμιο εκτελέστηκαν 20 δοκιμές σε διαφορετικά σημεία, για τον υπολογισμό της σκληρότητας Shore (SH) και 20 δοκιμές στο ίδιο σημείο (με καταγραφή της πρώτης και της τελευταίας μέτρησης) για τον υπολογισμό του συντελεστή πλαστικότητας Shore K(%) μέσω της σχέσης (6.7). Στα δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο $h/d=0.5$, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις δύο βάσεις των δοκιμίων (10 μετρήσεις σε κάθε βάση), ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια οι δοκιμές εκτελέστηκαν στην παράπλευρη επιφάνεια τους.

$$K(\%) = \left(\frac{H_{20} - H_1}{H_{20}} \right) \cdot 100 \quad (6.7)$$

Όπου H_{20} : σκληρότητα κατά Shore μετά από 20 ανακρούσεις στο ίδιο σημείο
 H_1 : σκληρότητα κατά Shore μετά από 1 ανάκρουση

5. Πειραματικά Αποτελέσματα

Η σκληρότητα Shore (SH) και ο συντελεστής πλαστικότητας Shore K(%) των ορθογνέσιων Α και Β υπολογίστηκε ως η μέση τιμή των δοκιμών τους και παρατίθενται στον πίνακα 6.7. Αναλυτικά οι τιμές των δοκιμών που εκτελέστηκαν, παρατίθενται στους πίνακες 6.8 και 6.9.

Πίνακας 6.7. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Shore.

Πέτρωμα	Σκληρότητα Shore (SH)				Συντελεστής πλαστικότητας Shore K(%)			
	count	min	average±sd	max	count	min	average±sd	max
Ορθογνέσιος Ικαρίας Α	11	71.1	76.9 ± 4.0	84.0	11	1.1	3.9 ± 2.1	7.4
Ορθογνέσιος Ικαρίας Β	11	73.8	83.6 ± 4.3	89.5	11	1.8	4.2 ± 2.6	8.7

Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων της δοκιμής σκληρομέτρησης Shore, οι ορθογνέσιοι χαρακτηρίζονται ως πολύ σκληροί.

Ακόμη, λόγω των πολύ χαμηλών τιμών του δείκτη πλαστικότητας Shore K (%) οι ορθογνέσιοι χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά ψαθυροί.

Πίνακας 6.8. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Shore του ορθογενέσιου Α.

Count	Ικ_A_01	Ικ_A_02	Ικ_A_03	Ικ_A_04	Ικ_A_05	Ικ_A_06	Ικ_A_07	Ικ_A_08	Ικ_A_09	Ικ_A_10	Ικ_A_11
1	85	85	82	77	79	67	88	82	72	84	73
2	82	72	83	86	70	66	84	87	85	79	70
3	69	72	73	70	82	80	79	65	81	72	84
4	73	81	84	89	74	63	67	74	72	80	90
5	68	68	70	76	67	66	73	82	69	73	85
6	87	82	77	85	75	62	64	74	87	96	86
7	79	71	70	71	75	66	92	88	87	85	85
8	81	71	71	78	80	67	67	67	84	64	83
9	90	76	68	89	66	85	77	66	82	77	90
10	79	70	66	82	81	63	75	86	71	77	76
11	82	73	84	81	65	74	81	69	85	80	87
12	89	65	71	84	66	67	91	77	89	78	78
13	68	82	67	81	78	72	81	83	69	69	86
14	70	86	77	87	75	85	72	65	73	85	94
15	77	72	70	84	68	72	71	71	76	77	74
16	79	83	74	87	73	70	93	71	87	72	87
17	69	66	65	86	73	75	82	73	87	75	88
18	69	72	70	75	61	70	78	66	88	74	87
19	86	69	73	88	74	83	68	79	88	84	97
20	72	70	72	78	70	69	69	80	77	73	80
H1	78	84	74	75	82	63	90	88	61	86	78
H20	82	85	74	75	82	66	90	91	66	89	80
H1	78	78	75	64	77	62	60	77	87	87	78
H20	81	80	78	65	78	69	62	78	91	87	89
H1	74	72	77	89	70	75	78	67	88	91	-
H20	82	74	85	94	73	80	79	70	89	92	-
H1	75	79	82	88	74	75	87	71	86	80	-
H20	83	85	84	90	75	76	87	78	88	83	-

Πίνακας 6.9. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Shore του ορθογενέσιου Β.

Count	Ik_B_01	Ik_B_02	Ik_B_03	Ik_B_04	Ik_B_05	Ik_B_06	Ik_B_07	Ik_B_08	Ik_B_09	Ik_B_11	Ik_B_12
1	89	95	80	98	87	82	67	69	73	81	85
2	84	90	89	70	89	68	69	85	74	69	81
3	85	101	87	91	81	78	88	90	104	78	69
4	94	91	91	81	76	88	104	75	94	73	90
5	78	90	79	80	78	84	93	84	97	77	72
6	87	95	74	86	76	82	99	87	95	76	75
7	88	95	88	86	79	78	80	99	76	60	67
8	70	93	92	84	64	91	77	87	88	83	90
9	90	95	85	90	73	97	78	90	97	74	86
10	88	88	79	83	87	96	76	84	73	69	87
11	79	86	74	88	61	83	71	87	91	58	78
12	77	84	90	85	89	87	98	93	90	67	85
13	91	88	102	93	80	79	70	70	87	80	71
14	91	86	74	91	81	97	80	88	96	66	74
15	89	90	80	80	78	88	73	76	87	87	91
16	96	94	91	98	89	87	84	80	87	90	83
17	70	85	75	90	94	71	76	84	92	64	94
18	85	72	85	81	86	89	80	86	94	65	91
19	91	84	90	75	89	99	81	93	82	85	78
20	74	88	78	87	76	86	75	86	84	73	89
H1	77	97	90	90	73	61	60	86	95	65	89
H20	85	100	97	91	75	69	66	95	98	72	89
H1	90	97	90	96	72	76	86	69	84	85	78
H20	91	99	93	98	80	79	90	75	85	85	79
H1	78	95	84	89	-	-	-	-	-	74	89
H20	78	97	86	92	-	-	-	-	-	74	90
H1	99	97	90	95	-	-	-	-	-	75	80
H20	100	97	90	97	-	-	-	-	-	75	86

6.4. Δοκιμή αποξεστικότητας κατά Cerchar

1. Εισαγωγή

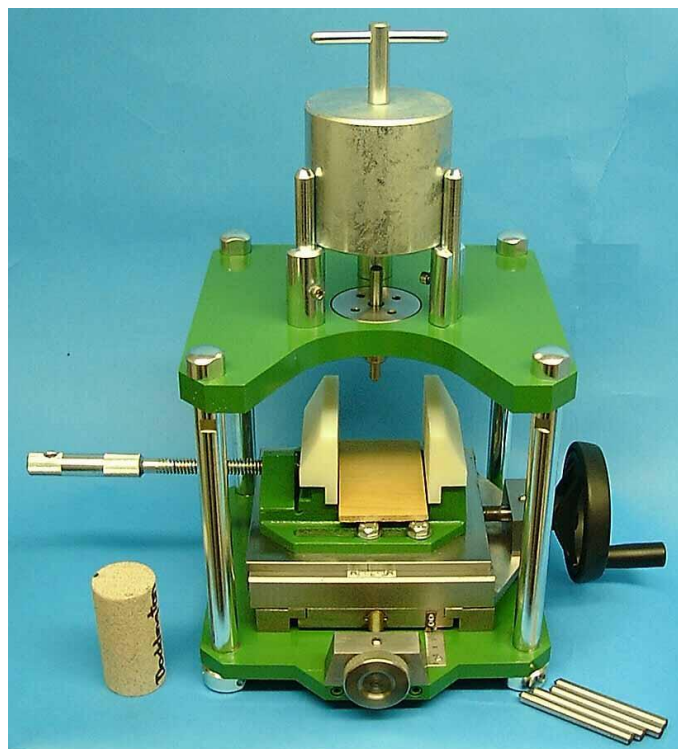
Σύμφωνα με τον Atkinson (Michalakopoulos et al. 2006) η αποξεστικότητα ενός πετρώματος «είναι η φθορά ή απώλεια υλικού που προκαλεί το πέτρωμα σε ένα άλλο υλικό όπως η κοπτική κεφαλή ενός TBM. Είναι συνάρτηση της ορυκτολογίας, ειδικότερα της περιεκτικότητας σε χαλαζία και της μικροδομής του πετρώματος». Η αποξεστικότητα θεωρείται ότι εκφράζει ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της συμπεριφοράς του πετρώματος, παρά μία θεμελιώδη φυσική ή μηχανική ιδιότητα. Ως επακόλουθο, είναι δύσκολο να εφαρμοστεί μία πρότυπη δοκιμή σε μία ισχυρή και αδιαμφισβήτητη βάση κι έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων δοκιμών.

Από τις διάφορες δοκιμές αποξεστικότητας που έχουν προταθεί, η δοκιμή Cerchar έχει επικρατήσει ως μία σχετικά εύκολη και χαμηλού κόστους δοκιμή, για τη μέτρηση και σύγκριση της αποξεστικότητας των πετρωμάτων. Η προκύπτουσα τιμή του δείκτη αποξεστικότητας Cerchar (Cerchar Abrasiveness Index ή CAI), χρησιμοποιείται ως βασική παράμετρος για την εκτίμηση της καταλληλότητας των πετρωμάτων για μηχανική τους εκσκαφή και κατ' επέκταση της απόδοσης των μηχανών εκσκαφής.

2. Εφαρμοζόμενος κανονισμός προδιαγραφών

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (1989), Vol. 26, No. 2, pp. 151-160. “Rock abrasiveness testing for tunnelling”.

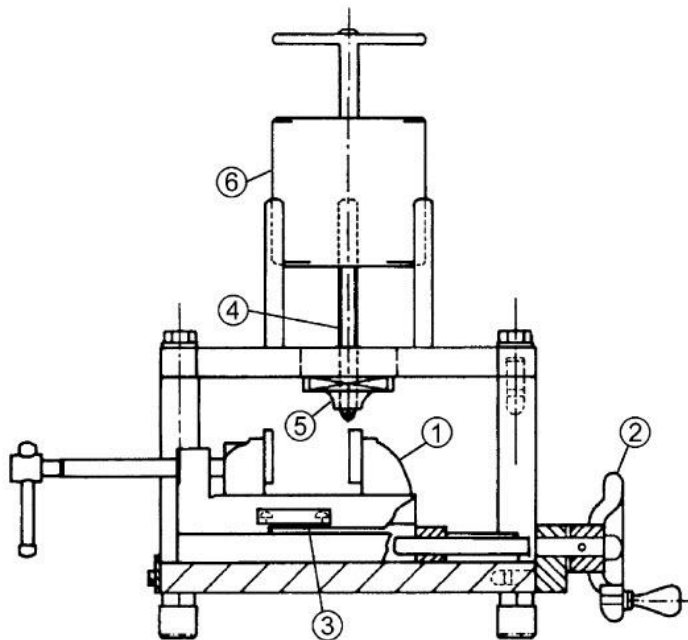
American Society for Testing and Materials (ASTM) (2010), D7625-10. “Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the Cerchar method”.



Σχήμα 6.13. Πειραματική συσκευή «West» (www.ergotech.co.uk).

3. Πειραματική συσκευή

Στα σχήματα 6.13 και 6.14 απεικονίζεται η πειραματική συσκευή «West» που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του CAI. Το δοκίμιο του πετρώματος συγκρατείται ασφαλώς από μία μέγγενη (1), η οποία μπορεί να μετακινηθεί κατά μήκος της βάσης της συσκευής από ένα χειροτροχό (2). Μία πλήρης περιστροφή του τροχού μετακινεί τη βάση κατά 1mm. Η μετακίνηση αυτή μπορεί να μετρηθεί στην κλίμακα (3). Μία χαλύβδινη ράβδος (4) που εφαρμόζει ομαλά στην υποδοχή της (5) έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου του πετρώματος και φορτίζεται με βάρος 70N (6).



Σχήμα 6.14. Πειραματική συσκευή «West» για τον προσδιορισμό του δείκτη αποξεστικότητας Cerchar (Plinninger 2003).

4. Πειραματική διαδικασία

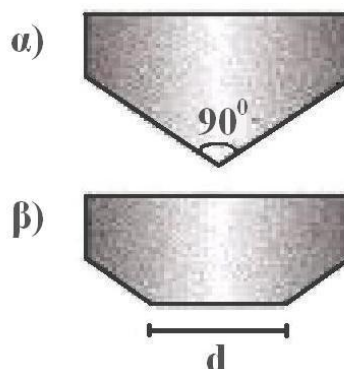
Αρχικά, επιλέγεται ένα κατάλληλου μεγέθους δοκίμιο του υπό εξέταση πετρώματος, έτσι ώστε να χωράει να τοποθετηθεί στις σιαγόνες της μέγγενης. Για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 4 κυλινδρικά δοκίμια ορθογνεύσιου (2 ορθογνεύσιου A και 2 ορθογνεύσιου B) με ύψος από 90 έως 122 mm και διαμέτρου 54.7 mm. Στη συνέχεια το δοκίμιο συσφίγγεται στη μέγγενη, χρησιμοποιώντας μικρές ξύλινες σφήνες για να στερεωθεί καλά, αν είναι απαραίτητο. Η άνω επιφάνεια του πετρώματος πρέπει να είναι επίπεδη. Η χαλύβδινη ράβδος διαμέτρου 10mm και με αιχμηρή κωνική ακίδα, με γωνία κώνου 90° τοποθετείται στην υποδοχή της και η ακίδα της έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του πετρώματος. Το βάρος (70N) τοποθετείται πάνω στη χαλύβδινη ράβδο. Η μέγγενη συγκρατώντας το δοκίμιο μετακινείται αργά κατά 10mm με ταχύτητα περίπου 1mm/s, περιστρέφοντας το χειροτροχό 10 φορές κατά την επιθυμητή διεύθυνση. Έπειτα, απομακρύνονται το βάρος και η ράβδος από τη συσκευή.

Η ακίδα μετά τη χρήση της από αιχμηρή γίνεται επίπεδη, παίρνοντας το σχήμα βάσης κόλουρου κώνου διαμέτρου d , όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15. Αφού καθαριστεί η ακίδα από τυχόν υπολείμματα του πετρώματος, μετρίεται η διάμετρος d , χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο το οποίο είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πραγματοποιούνται δύο μετρήσεις κατά μήκος δύο κάθετων μεταξύ τους διαμέτρων και λαμβάνεται η μέση τιμή τους.

Ο δείκτης αποξεστικότητας Cerchar (CAI) υπολογίζεται από τη ακόλουθη σχέση (Michalakopoulos et al. 2006):

$$CAI = 10^{-2} \cdot d \quad (6.8)$$

όπου d : διάμετρος της φθαρμένης ακίδας της χαλύβδινης ράβδου σε μm



Σχήμα 6.15. Μορφή της ακίδας πριν (α) και μετά τη χρήση της (β).

Χρησιμοποιούνται ράβδοι από χάλυβα σκληρότητας Rockwell HRC 40 και HRC 55. Σε κάθε δοκίμιο εκτελέστηκαν δέκα δοκιμές, πέντε με χρήση ακίδων HRC 40 και πέντε με HRC 55, με διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Ύστερα από τη χρήση τους οι ακίδες μπορούν να τροχιστούν, για να αποκτήσουν την αρχική τους μορφή και να επαναχρησιμοποιηθούν. Το τρόχισμα των ακίδων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Οι μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το τρόχισμα, ενδέχεται να επηρεάσουν τη σκληρότητα των ακίδων, με αποτέλεσμα η χρήση τους να δίνει εσφαλμένες τιμές του δείκτη αποξεστικότητας.

Κατά τη διάρκεια μιας φυσιολογικής δοκιμής δύο πράγματα συμβαίνουν: η χαλύβδινη ακίδα δημιουργεί μία χαραγή στο πέτρωμα και το πέτρωμα προκαλεί απόξεση (φθορά) στην ακίδα. Τα περισσότερα πετρώματα έχει αποδειχτεί ότι είναι κατάλληλα για τη δοκιμή, με εξαίρεση τα πολύ μαλακά ή τα πολύ σκληρά. Ορισμένα πετρώματα είναι τόσο μαλακά, που δεν μπορούν να προκαλέσουν μετρήσιμη φθορά στην ακίδα κι έτσι γι' αυτά τα πετρώματα καταγράφεται μηδενική τιμή. Στα πολύ σκληρά πετρώματα η ράβδος δεν είναι ικανή να χαράξει το δοκίμιο και παρά το ότι η ακίδα έχει αμβλυνθεί, δεν έχει αλληλεπιδράσει σωστά με το πέτρωμα, ώστε να θεωρηθεί ότι η φθορά της προκλήθηκε λόγω απόξεσης. Με τα σκληρά πετρώματα είναι επομένως απαραίτητο να εξετάζεται προσεκτικά το δοκίμιο μετά τη δοκιμή, για να εξασφαλίζεται ότι η ακίδα έχει εισχωρήσει στο πέτρωμα και το έχει χαράξει και δεν έχει απλά ολισθήσει πάνω στην επιφάνειά του. Αν αυτό συμβαίνει το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως πολύ σκληρό για να υποβληθεί στη δοκιμή (too hard to test).

Προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιλογή των σημείων του δοκιμίου που εκτελούνται οι δοκιμές, όταν το πέτρωμα είναι χονδρόκοκκο, όταν περιέχει ασυνέχειες ή στρώσεις, ή είναι πορφυριτικό. Αν το δείγμα είναι ανισότροπο, ή στρωσιγενές, οι χαράξεις πρέπει να γίνονται με διαφορετικούς προσανατολισμούς.

5. Πειραματικά αποτελέσματα

Ο δείκτης αποξεστικότητας Cerchar (CAI) των ορθογενέσιων Α και Β υπολογίστηκε ως η μέση τιμή των δεικτών των δοκιμών τους και παρατίθεται στον πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10. Δείκτης αποξεστικότητας Cerchar (CAI) των ορθογενέσιων Α και Β.

Πέτρωμα	count	CAI ₄₀			CAI ₅₅		
		min	average±sd	max	min	average±sd	max
Ορθογενέσιος Ικαρίας Α	2	4.31	4.83 ± 0.74	5.35	4.40	4.48 ± 0.12	4.57
Ορθογενέσιος Ικαρίας Β	2	5.26	5.57 ± 0.44	5.89	4.70	4.82 ± 0.17	4.94

Οι ράβδοι σκληρότητας HRC 40 (σε 16 από τις 20 δοκιμές που εκτελέστηκαν συνολικά σε όλα τα δοκίμια) δεν ήταν ικανές να εισχωρήσουν και να χαράξουν τα δοκίμια και απλά ολίσθησαν πάνω στην επιφάνειά τους.

Ομοίως για τις ράβδους σκληρότητας HRC 55 για τις 8 από τις 20 συνολικά εκτελεσθείσες δοκιμές, ενώ αντίθετα στις υπόλοιπες οι ακίδες αλληλεπίδρασαν σωστά με το πέτρωμα, ώστε να θεωρηθεί ότι η φθορά τους προκλήθηκε λόγω απόξεσης.

Οπότε το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως πολύ σκληρό για να υποβληθεί στη δοκιμή (too hard to test).

Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών όπου η αλληλεπίδραση ακίδας – πετρώματος ήταν σωστή και του πίνακα 6.11 το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά αποξεστικό.

Πίνακας 6.11. Ταξινόμηση του δείκτη αποξεστικότητας Cerchar (CAI) (Michalakopoulos et al. 2006).

Cerchar abrasiveness index (CAI) classification

Classification	CAI ₅₅	CAI ₄₀ ^a
Very low abrasiveness	0.30–0.50	0.32–0.66
Low abrasiveness	0.50–1.00	0.66–1.51
Medium abrasiveness	1.00–2.00	1.51–3.22
High abrasiveness	2.00–4.00	3.22–6.62
Extreme abrasiveness	4.00–6.00	6.62–10.03

^aValues estimated from Eq.: $CAI_{40} = 0.1109 + 0.5874CAI_{55}$

Στους πίνακες 6.12 έως 6.19 που ακολουθούν παρατίθενται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών.

Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής Cerchar

Πίνακας 6.12. CAI του δοκιμίου Ικ_Α_05 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Α_05		Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	40	0.424	0.438	0.431	4.31
2	40	-	-	-	-
3	40	-	-	-	-
4	40	-	-	-	-
5	40	-	-	-	-
Average CAI:					4.31
Standard deviation:					-
- too hard to test					

Πίνακας 6.13. CAI του δοκιμίου Ικ_Α_05 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Α_05		Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	55	0.445	0.413	0.429	4.29
2	55	0.492	0.466	0.479	4.79
3	55	0.406	0.376	0.391	3.91
4	55	0.461	0.463	0.462	4.62
5	55	0.463	0.411	0.437	4.37
Average CAI:					4.40
Standard deviation:					0.39

Πίνακας 6.14. CAI του δοκιμίου Ικ_Α_08 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Α_08		Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	40	-	-	-	-
2	40	-	-	-	-
3	40	-	-	-	-
4	40	-	-	-	-
5	40	0.545	0.525	0.535	5.35
Average CAI:					5.35
Standard deviation:					-
- too hard to test					

Πίνακας 6.15. CAI του δοκιμίου Ικ_Α_08 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Α_08		Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	55	0.418	0.422	0.420	4.20
2	55	0.450	0.404	0.427	4.27
3	55	-	-	-	-
4	55	0.422	0.402	0.412	4.12
5	55	0.560	0.579	0.570	5.70
Average CAI:					4.57
Standard deviation:					0.07
- too hard to test					

Πίνακας 6.16. CAI του δοκιμίου Ικ_Β_01 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Β_01		Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	40	-	-	-	-
2	40	-	-	-	-
3	40	-	-	-	-
4	40	0.569	0.608	0.589	5.89
5	40	-	-	-	-
Average CAI:					5.89
Standard deviation:					-
- too hard to test					

Πίνακας 6.17. CAI του δοκιμίου Ικ_Β_01 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Β_01		Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011			
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	55	-	-	-	-
2	55	-	-	-	-
3	55	0.488	0.501	0.494	4.94
4	55	-	-	-	-
5	55	-	-	-	-
Average CAI:					4.94
Standard deviation:					-
- too hard to test					

Πίνακας 6.18. CAI του δοκιμίου Ικ_Β_11 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 40.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Β_11			Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011		
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	40	-	-	-	-
2	40	-	-	-	-
3	40	-	-	-	-
4	40	0.520	0.532	0.526	5.26
5	40	-	-	-	-
Average CAI:					5.26
Standard deviation:					-
- too hard to test					

Πίνακας 6.19. CAI του δοκιμίου Ικ_Β_11 με χρήση ράβδων σκληρότητας HRC 55.

Κωδικός Δοκιμίου: Ικ_Β_11			Ημερομηνία Δοκιμής: 04/10/2011		
α/α χαραγής (scratch)	Σκληρότητα ακίδας (HRC)	Φθορά ακίδας			Δείκτης CERCHAR (CAI)
		Μέτρηση 1 (mm)	Μέτρηση 2 (mm)	Μέση τιμή (mm)	
1	55	-	-	-	-
2	55	0.488	0.496	0.492	4.92
3	55	-	-	-	-
4	55	0.421	0.478	0.449	4.49
5	55	-	-	-	-
Average CAI:					4.70
Standard deviation:					0.30
- too hard to test					

6.5. Δοκιμή υπερήχων

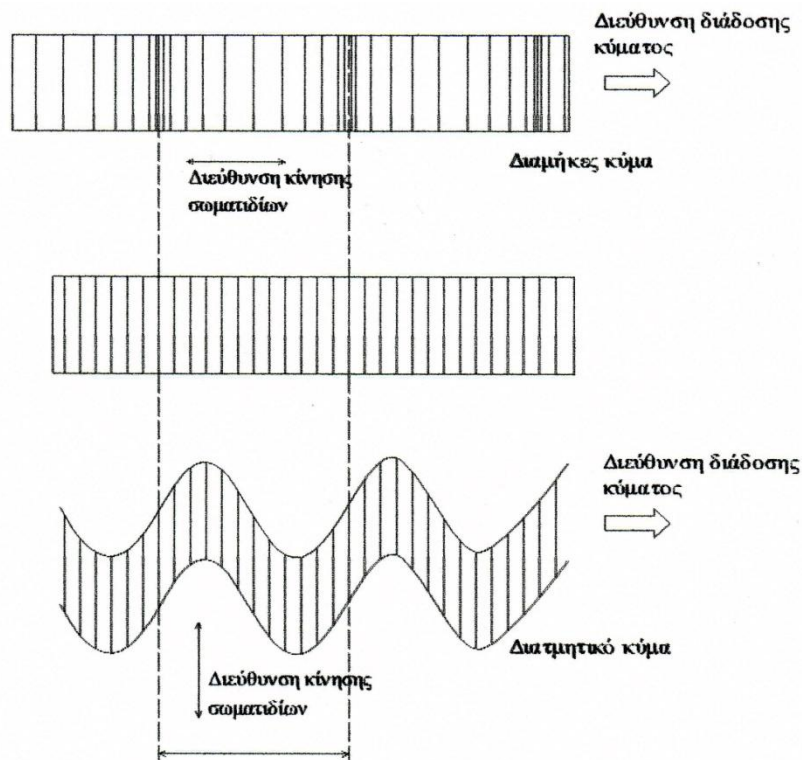
1. Θεωρητικά στοιχεία

Ένας ήχος με συχνότητα μεγαλύτερη από τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να συλλάβει ο άνθρωπος (περίπου 20 kHz) καλείται υπέρηχος. Ο υπέρηχος είναι ένα κύμα που διαδίδεται σε αέριο, στερεό ή υγρό σώμα. Χαρακτηριστικό ενός υπερηχητικού παλμού είναι το μικρό μήκος κύματος και η ιδιότητα του να ανακλάται σε πολύ μικρές επιφάνειες, που τον καθιστούν χρήσιμο για το μη καταστροφικό έλεγχο των πετρωμάτων.

Η ταχύτητα διάδοσης c του κύματος σε ένα σώμα υπό σταθερή θερμοκρασία και πίεση, είναι σταθερή και σχετίζεται με το μήκος κύματος λ , τη συχνότητα f και την περίοδο T με τις

$$\text{σχέσεις: } \lambda = \frac{c}{f}, \quad \lambda = c \cdot T \quad (6.9)$$

Για τον έλεγχο των πετρωμάτων με υπερήχους χρησιμοποιούνται δύο είδη κυμάτων: τα διαμήκη (P-wave) και τα διατμητικά ή αλλιώς εγκάρσια (S-wave). Στο σχήμα 6.16 δίνεται μία εικόνα της κίνησης των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος για τα δύο αυτά είδη κυμάτων.



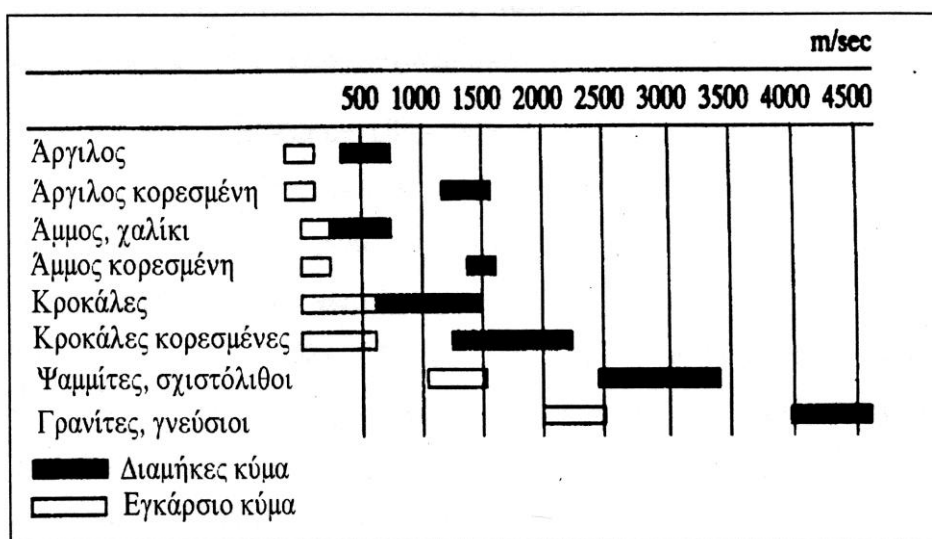
Σχήμα 6.16. Κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Νομικός 2008).

Η ταχύτητα με την οποία ένας υπερηχητικός παλμός ταξιδεύει εντός ενός στερεού σώματος εξαρτάται από την πυκνότητα ρ του σώματος, και τις ελαστικές του ιδιότητες. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εντός του πετρώματος ή εδάφους είναι μία χαρακτηριστική ιδιότητα του πετρώματος ή εδάφους και αποτελεί ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του υλικού.

Ο πίνακας 6.20 και το σχήμα 6.17, δίνουν τις ταχύτητες διάδοσης του διαμήκους κύματος V_p και διατμητικού (εγκάρσιου) κύματος V_s σε διάφορα πετρώματα και εδάφη.

Πίνακας 6.20. Ταχύτητες διάδοσης του διαμήκους (V_p) και εγκάρσιου (V_s) κύματος (Νομικός 2008).

Πέτρωμα	Πυκνότητα [t/m^3]	V_p [m/s]	V_s [m/s]
Ξηρή άμμος, χαλαρή δομή	1.5 -1.7	300-1000	50-400
Ξηρή άμμος	1.6 -1.7	1000-1700	400-900
Υγρή άμμος, χαλαρή δομή	1.8 -2.2	1500-2000	50-400
Υγής ψαμμίτης	2.0 -2.65	1800-4500	1000-3000
Ψαμμίτης Berea	2.2	3800-4000	2300-2400
Ασθενής ψαμμίτης	1.7-2.0	1000-2000	600-1200
Ψαμμίτης Wildmoor (λεπτόκοκκος, πορώδης)	2	1700-2000	1100-1300
Αργίλος	1.9 -2.1	1500-1600	100-300
Αργίλος του Λονδίνου	2	1700-1800	800-1100
Αργιλικός σχιστόλιθος	2.3 -2.8	1600-4500	700-3000
Weak Shale, North Sea	2.35	2400-2600	1200-1300
Τάλκης, υψηλό πορώδες	1.4-1.7	1800-2600	1000-1500
Τάλκης, χαμηλό πορώδες	1.7-2.4	2600-5000	1500-3500
Ασβεστόλιθος	2.4 -2.7	3500-6000	2000-3500
Ασβεστόλιθος		6000-6500	
Δολομίτης		6500-7000	
Βασάλτης	2.5 -2.9	3500-5500	1700-3400
Βασάλτης		6500-7000	
Γάββρος		7000	
Γρανίτης		5500-6000	
Γρανίτης	2.6 -2.7	5500-6500	3000-3500



Σχήμα 6.17. Ταχύτητες διάδοσης του διαμήκους θλιπτικού κύματος και του εγκάρσιου κύματος εντός διαφόρων πετρωμάτων και εδαφών (Νομικός 2008).

Οι ασυνέχειες του πετρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Όπως δείχνει ο πίνακας 6.21, η ταχύτητα του διαμήκου θλιπτικού κύματος είναι πολύ μεγαλύτερη στο άρρηκτο πέτρωμα, απ' ό τι στο ρωγματωμένο. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η διαφορά αυτή στην ταχύτητα είναι μεγαλύτερη για τον ίδιο τύπο πετρώματος με διαφορετική πυκνότητα ασυνεχειών, απ' ό τι μεταξύ διαφορετικών τύπων πετρωμάτων. Μία άλλη αναμενόμενη παρατήρηση επίσης, είναι ό τι η ταχύτητα διάδοσης αυξάνει με το βάθος, ενώ η πυκνότητα των ασυνεχειών μειώνεται, λόγω αύξησης της πυκνότητας του πετρώματος.

Πίνακας 6.21. Ταχύτητες διάδοσης P-κυμάτων και S-κυμάτων, για διάφορους τύπους πετρωμάτων με ύπαρξη ασυνεχειών και χωρίς ασυνέχειες (Νομικός 2008).

Τύπος Πετρώματος	Θλιπτικό Κύμα (P)		Εγκάρσιο Κύμα (S)	
	Έντονα ρωγματωμένο	Άρρηκτο	Έντονα ρωγματωμένο	Άρρηκτο
Ασβεστόλιθος	2000	5900	1000	3100
Μεταμορφωμένα Πετρώματα	2100	3500	1000	1700
Βασάλτης	2300	4500	1100	2200
Γρανίτης	2400	5000	1200	2500
Άμμος	500	2000	250	850
Αργίλος	400	1700	200	800

2. Σκοπός της δοκιμής

Σκοπός της δοκιμής είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας του διαμήκου (P-wave) κύματος εντός των χρησιμοποιούμενων δοκιμίων πετρωμάτων και ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d των υπό δοκιμή πετρωμάτων.

Η δοκιμή βασίζεται στη διάδοση μέσω κατάλληλα διαμορφωμένου δοκιμίου του πετρώματος, υπερηχητικού παλμού και στη μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ο παλμός αυτός να διανύσει το μήκος του δοκιμίου.

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος υπολογίζεται από τη σχέση: $c = \frac{l}{t}$ (6.10)

όπου l : το μήκος που διανύει το κύμα

t : ο χρόνος που χρειάζεται το κύμα για να διανύσει το μήκος l

3. Εργαστηριακή Συσκευή

Για τη μέτρηση της ταχύτητας V_p του διαμήκους κύματος χρησιμοποιούνται:

➤ Μία συσκευή PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) της εταιρείας PROCEQ, ελβετικής κατασκευής και ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών ακροδεκτών, με δυνατότητα παραγωγής υπέρηχου διαφόρων συχνοτήτων, το οποίο προσαρμόζεται στη συσκευή. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο βασίζεται σε μια ιδιότητα ορισμένων φυσικών (κρύσταλλοι χαλαζία) ή συνθετικών κρυστάλλων, οι οποίοι όταν παραμορφώνονται παράγουν ηλεκτρικό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό λειτουργεί και αντιστρόφως: δηλαδή, όταν εφαρμόζεται στους κρυστάλλους αυτούς ένα ηλεκτρικό δυναμικό ο κρύσταλλος παραμορφώνεται. Οι δύο ακροδέκτες τοποθετούνται στις δύο βάσεις του δοκιμίου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.18. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η καλή επαφή μεταξύ δοκιμίου και ακροδέκτη.

➤ Ηλεκτρονικός υπολογιστής.



Σχήμα 6.18. Εργαστηριακή συσκευή PUNDIT (Proceq Pundit Lab Sales Flyer 2010).

4. Προετοιμασία των δοκιμίων

Τα δοκίμια είναι κυλινδρικά με διάμετρο 54 mm και μήκος από 73 έως 146 mm. Οι βάσεις τους είναι παράλληλες μεταξύ τους και επίπεδες. Η ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου (δηλαδή το μήκος εκείνο που διασχίζει ο κυματοπαλμός) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του κυματικού παλμού.

5. Πειραματική διαδικασία - υπολογισμοί και αποτελέσματα

Πριν την έναρξη των δοκιμών στο υπό εξέταση πέτρωμα είναι απαραίτητο να μηδενιστεί η συσκευή, όπως δείχνει το σχήμα 6.19, χρησιμοποιώντας πρότυπο δοκίμιο (calibration rod) που παρέχεται από τον κατασκευαστή. Το μήκος του πρότυπου δοκιμίου και ο χρόνος που χρειάζεται ο υπερηχητικός παλμός (συχνότητας 54 kHz) να διανύσει το μήκος του είναι δεδομένα. Εάν η τιμή του χρόνου που μετράται είναι σύμφωνη με τη δεδομένη τιμή, η συσκευή λειτουργεί σωστά.



Σχήμα 6.19. Μηδενισμός της συσκευής PUNDIT (Proceq Pundit Lab Operating Instructions 2010).

Για την εκτέλεση της δοκιμής, αρχικά τοποθετούνται οι δύο πιεζοηλεκτρικοί ακροδέκτες στις βάσεις του κυλινδρικού δοκιμίου που έχει κατάλληλα διαμορφωθεί, αφού μετρηθεί το μήκος του. Στη συνέχεια μετράται ο χρόνος που χρειάζεται ο υπερηχητικός παλμός συχνότητας 54 kHz να διανύσει το μήκος του δοκιμίου και η ταχύτητά του. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δοκίμια και σημειώνεται κάθε φορά ο χρόνος διέλευσης και η ταχύτητα του παλμού.

Μετά το πέρας των μετρήσεων υπολογίζεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d βάσει της σχέσης των Jaeger and Cook (1979):

$$E_d = V_p^2 \cdot \rho \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (6.11)$$

Όπου V_p : ταχύτητα διαμήκους κύματος (m/s)

ρ : πυκνότητα του πετρώματος (kg/m^3)

ν : λόγος του Poisson (όπως υπολογίστηκε από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης)

Η ταχύτητα του διαμήκους κύματος V_p και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d των ορθογνέσιων Α και Β υπολογίστηκαν ως οι μέσες τιμές των δοκιμίων τους και παρατίθενται στον πίνακα 6.22.

Πίνακας 6.22. Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής υπερήχων.

Πέτρωμα	Ταχύτητα διαμήκους κύματος V_p (m/s)				Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d (GPa)			
	count	min	average \pm sd	max	count	min	average \pm sd	max
Ορθογνέσιος Ικαρίας Α	10	4709.0	6143.7 \pm 1067.5	7932.4	10	47.48	82.99 \pm 29.33	134.48
Ορθογνέσιος Ικαρίας Β	4	5079.6	5287.9 \pm 218.5	5487.6	4	54.63	59.26 \pm 4.87	63.72

Αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής υπερήχων παρατίθενται στον πίνακα 6.23.

Πίνακας 6.23. Αναλυτικά πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής υπερήχων.

ΠΕΤΡΩΜΑ	Δοκίμιο	l (mm)	ρ (kg/m ³)	t_p (μ s)	V_p (m/s)	E_d (GPa)
Ορθογνέσιος Ικαρίας Α	Ik_A_01	73.19	2629.55	13.74	5323.0	60.58
	Ik_A_02	88.06	2628.40	11.10	7932.4	134.48
	Ik_A_03	103.19	2627.70	17.38	5934.0	75.24
	Ik_A_04	127.75	2634.05	21.94	5794.8	71.92
	Ik_A_05	95.10	2633.22	20.20	4709.0	47.48
	Ik_A_06	100.92	2634.79	14.58	6869.6	101.10
	Ik_A_07	102.19	2631.08	19.20	5312.8	60.39
	Ik_A_08	103.28	2633.38	13.40	7693.2	126.73
	Ik_A_09	110.83	2637.46	20.18	5458.2	63.89
	Ik_A_10	118.88	2635.73	18.42	6409.6	88.05
Ορθογνέσιος Ικαρίας Β	Ik_B_01	122.29	2642.27	23.84	5119.0	55.49
	Ik_B_02	132.47	2640.41	24.20	5465.2	63.21
	Ik_B_03	141.57	2641.69	27.76	5079.6	54.63
	Ik_B_04	145.71	2640.13	26.44	5487.6	63.72

I: μήκος δοκιμίου, ρ : πυκνότητα, t_p : χρόνος διέλευσης διαμήκους κύματος,
 V_p : ταχύτητα διαμήκους κύματος, E_d : δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Όπως αναμενόταν βάσει του πίνακα 6.20, η ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους κύματος V_p και επομένως το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d των ορθογνέσιων, έχουν πολύ υψηλές τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ MICRO TBM

7.1. Microtunnelling

Ως microtunnelling ορίζεται η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση υπόγειων αγωγών χωρίς την εκσκαφή τάφρου.

Ισχυρά υδραυλικά έμβολα (jacks) προωθούν σωλήνες ειδικού τύπου (pipe jacking) προσαρμοσμένους πίσω από κατάλληλη κοπτική κεφαλή. Η προώση λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την εκσκαφή/εξόρυξη.

Ο χειριστής του συστήματος είναι εγκατεστημένος στην επιφάνεια. Δεν υπάρχουν εργαζόμενοι στο υπόγειο τμήμα του έργου.

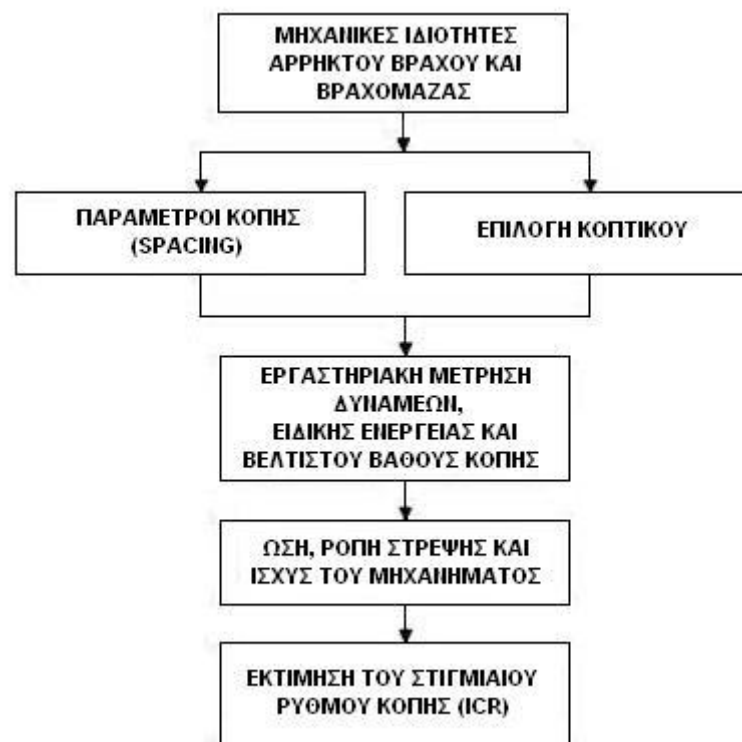
Απαιτείται η κατασκευή κατάλληλων φρεάτων για την εγκατάσταση και ανάκτηση του εξοπλισμού, καθώς και για τη μεταφορά των προϊόντων της εκσκαφής/εξόρυξης.

Σύμφωνα με American Society of Civil Engineers (North American Society for Trenchless Technology), η μέθοδος microtunnelling δεν έχει περιορισμούς όσον αφορά τις διαστάσεις του έργου, καθώς μία σήραγγα μπορεί να θεωρηθεί ως μικροσήραγγα αν περιλαμβάνει όλα τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

- Τηλεκατεύθυνση (remote controlled). Ο χειρισμός της μηχανής διάνοιξης της μικροσήραγγας (MicroTBM) γίνεται από πίνακα ελέγχου εγκατεστημένο στην επιφάνεια. Το σύστημα προωθεί τις σωλήνες ταυτόχρονα με την εκσκαφή/εξόρυξη. Δεν απαιτείται είσοδος προσωπικού στο υπόγειο τμήμα του έργου για τη συνήθη λειτουργία.
- Καθοδήγηση (guided). Το σύστημα καθοδήγησης συνήθως περιλαμβάνει μία ακτίνα laser που προβάλλεται πάνω σε ένα στόχο που βρίσκεται μέσα στην αρθρωτή ασπίδα.
- Προώθηση σωλήνων (pipe jacked). Η προώθηση των σωλήνων από το MTBM γίνεται με σύστημα ισχυρών υδραυλικών εμβόλων.
- Συνεχή υποστήριξη (continuously supported). Η υποστήριξη γίνεται συνεχώς και στο μέτωπο της εκσκαφής.

Τα συνήθη βήματα που ακολουθούνται για τη διαστασιολόγηση της κοπτικής κεφαλής ενός TBM παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1.

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει το χαρακτηρισμό του πετρώματος και των γεωλογικών συνθηκών και τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του άρρηκτου πετρώματος και της βραχομάζας. Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή κατάλληλου κοπτικού και παραμέτρων κοπής (απόσταση μεταξύ των κοπτικών). Οι δυνάμεις που δρουν στα κοπτικά μετρώνται με εργαστηριακές δοκιμές κοπής ή μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας θεωρητικά ή εμπειρικά μοντέλα. Η δύναμη κύλισης, η δύναμη ώσης, η πλευρική δύναμη και η ειδική ενέργεια κοπής λαμβάνονται για διαφορετικά βάθη κοπής (p) και διαφορετικές αποστάσεις (s) μεταξύ των κοπτικών. Τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος όπως η ώση (thrust), η ροπή στρέψης (torque) και η ισχύς (power) του εκτιμώνται βάσει των δυνάμεων κοπής. Ο στιγμιαίος ρυθμός κοπής (Instantaneous Cutting Rate - ICR) του TBM εκτιμάται βάσει του βέλτιστου λόγου s/p , για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής.



Σχήμα 7.1. Διάγραμμα ροής για τη διαστασιολόγηση TBM και την πρόβλεψη του ρυθμού προχώρησης.

Στη συνέχεια γίνεται η διαστασιολόγηση ενός Micro TBM για τη διάνοιξη μικροσήραγγας προσαγωγής, κυκλικής διατομής, με εσωτερική διάμετρο $\Phi 600$ και εξωτερική $\Phi 900$, η οποία γίνεται σε ορθογενέσιο Ικαρίας Α.

7.2. Σχεδιασμός της κοπτικής κεφαλής

Ο λόγος απόσταση μεταξύ των κοπτικών/βάθος κοπής (spacing/penetration - s/p) είναι θεμελιώδης παράμετρος για την αποδοτική κοπή του πετρώματος. Υπάρχει πάντα μία ελάχιστη τιμή της ειδικής ενέργειας κοπής για έναν από τους λόγους s/p (το βέλτιστο), για δεδομένο πέτρωμα. Εντούτοις, οι κατασκευαστές συνήθως επιλέγουν αποστάσεις s μεταξύ 70 και 80 mm. Σ' αυτή την περίπτωση το πιο σημαντικό είναι η λειτουργία του TBM στο βέλτιστο βάθος κοπής για τη δεδομένη απόσταση s.

Ο βέλτιστος λόγος s/p για τον ορθογνέσιο Ικαρίας Α βρέθηκε $s/p=9$. Λόγω της μικρής διατομής της σήραγγας (0.90m) επιλέγεται $s=65\text{mm}$. Άρα το βέλτιστο βάθος κοπής ανά περιστροφή προκύπτει $p=7\text{mm/rev}$.

Ο αριθμός των κοπτικών δίσκων (N_C) του TBM μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Balci 2009):

$$N_C = \frac{D_{TBM}}{2s} + N_{GAUGE} \quad (7.1)$$

Η ταχύτητα περιστροφής (revolution per minute) του TBM μπορεί να υπολογιστεί από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής των δίσκων που βρίσκονται στην περιφέρεια της κεφαλής, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\text{RPM} = \frac{V}{\pi \cdot D_{TBM}} \quad (7.2)$$

όπου D_{TBM} : διάμετρος της κοπτικής κεφαλής του TBM (cm ή m).

s: απόσταση μεταξύ των κοπτικών (cm).

N_{GAUGE} : αριθμός των περιφερειακών κοπτικών.

V: αποδεκτή ταχύτητα κοπτικών (m/min).

Με δεδομένα $D_{TBM}=0.90\text{m}$, $N_{GAUGE}=3$ και $V=17\text{m/min}$, υπολογίζονται:

ο αριθμός των κοπτικών δίσκων

$$N_C = \frac{D_{TBM}}{2s} + N_{GAUGE} = \frac{90\text{cm}}{2 \cdot 6.5\text{cm}} + 3 \Rightarrow N_C = \mathbf{10 \text{ κοπτικοί δίσκοι}}$$

και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής

$$\text{RPM} = \frac{V}{\pi \cdot D_{TBM}} = \frac{17\text{m}/\text{min}}{\pi \cdot 0.90\text{m}} \Rightarrow \mathbf{\text{RPM} = 6 \text{ rev/min.}}$$

7.3. Δύναμη ώσης του Micro TBM

Για την εκτίμηση της συνολικής μέγιστης ώσης (total thrust – FT_{max}) της μηχανής, χρησιμοποιείται η σχέση (Balci 2009):

$$FT_{max} = N_C \cdot F_{Nmax} \cdot f_L \quad (7.3)$$

όπου F_{Nmax} : μέγιστη ώση για έναν κοπτικό δίσκο (kN/disc).

f_L : συντελεστής για τις απώλειες λόγω τριβών, συνήθως λαμβάνεται 1.2.

N_C : αριθμός των κοπτικών.

Η μέγιστη ώση F_{Nmax} για έναν κοπτικό δίσκο λαμβάνεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των Micro TBM του οίκου Robbins, για κοπτικούς δίσκους διαμέτρου 6.5''.

Για $F_{Nmax}=22.3\text{kN}$ και $N_C=10$ είναι:

$$FT_{max} = N_C \cdot F_{Nmax} \cdot f_L = 10 \cdot 22.3\text{kN} \cdot 1.2 \Rightarrow FT_{max} = \mathbf{267.6\text{kN}}$$

7.4. Ροπή στρέψης και ισχύς της κοπτικής κεφαλής

Για τον υπολογισμό της μέγιστης ροπής στρέψης (torque – T_{max}) και της μέγιστης ισχύος της κοπτικής κεφαλής (power – P_{max}) χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (7.4) και (7.5) αντίστοιχα (Balci 2009):

$$T_{max} = \frac{N_C \cdot F_{Rmax} \cdot D_{TBM} \cdot f_L}{4} \quad (7.4)$$

$$P_{max} = 2\pi \frac{\text{RPM}}{60} T_{max} \quad (7.5)$$

όπου T_{max} : μέγιστη ροπή στρέψης (kNm).

F_{Rmax} : μέγιστη δύναμη κύλισης για ένα δίσκο (kN/disc).

D_{TBM} : διάμετρος της κοπτικής κεφαλής (m).

f_L : συντελεστής για τις απώλειες λόγω τριβών, συνήθως λαμβάνεται 1.2.

P_{max} : μέγιστη ισχύς (kW).

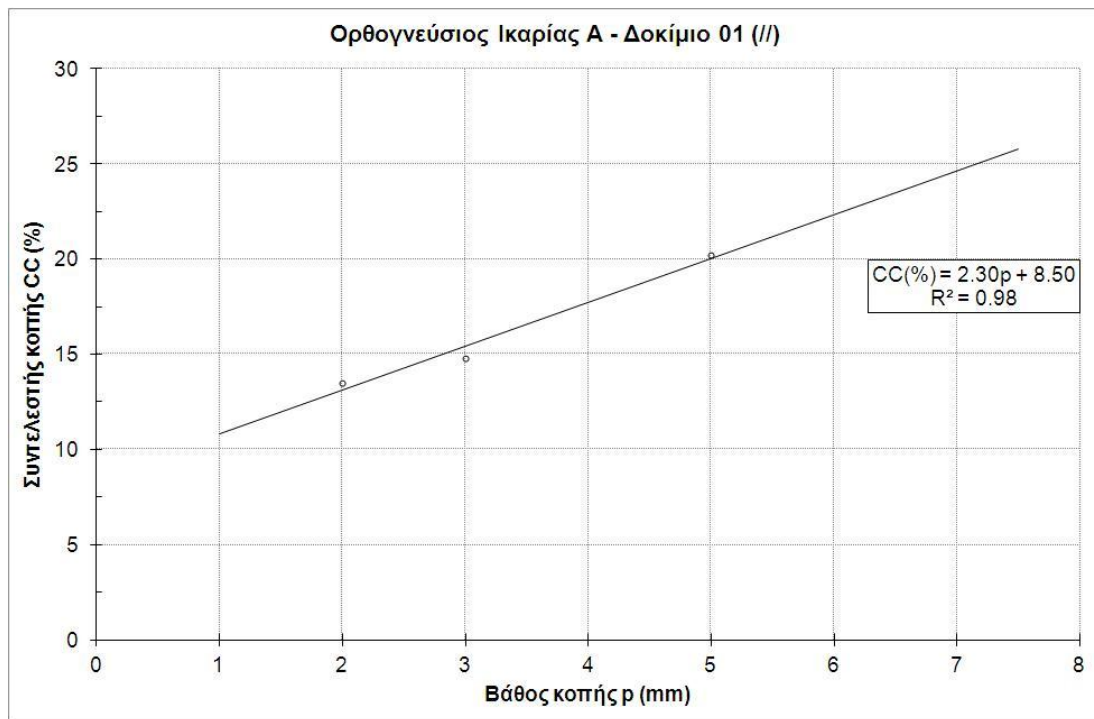
RPM: ταχύτητα περιστροφής (περιστροφές ανά λεπτό) (rev/min).

N_C : αριθμός των κοπτικών.

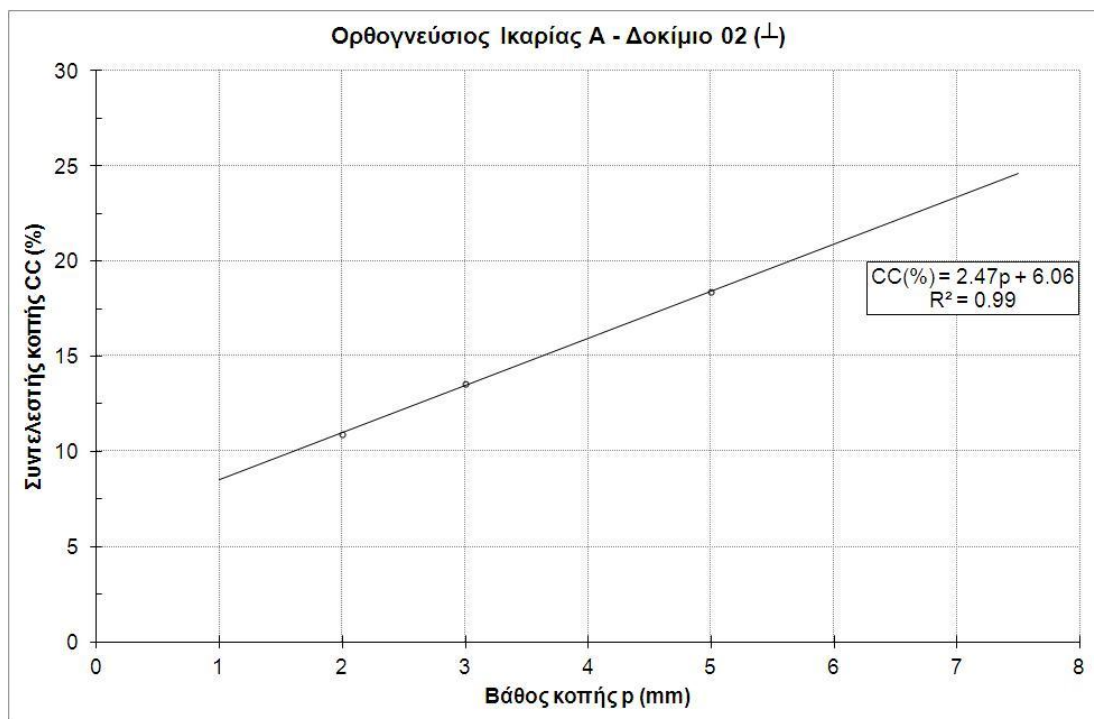
Η μέγιστη δύναμη κύλισης για ένα δίσκο F_{Rmax} υπολογίζεται μέσω του συντελεστή κοπής CC(%). Από τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου και μέσω παλινδρόμησης βασισμένη στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτει **CC=24%** για βάθος κοπής $p=7\text{mm}$, όπως φαίνεται στα σχήματα 7.2 και 7.3.

Άρα, η μέγιστη δύναμη κύλισης για ένα δίσκο F_{Rmax} είναι:

$$F_{Rmax} = CC \cdot F_{Nmax} = 0.24 \cdot 22.3\text{kN} \Rightarrow F_{Rmax} = \mathbf{5.35\text{kN}}$$



Σχήμα 7.2. Συντελεστής κοπής CC(%) συναρτήσει του βάθους κοπής p για το δοκίμιο 01 (//).



Σχήμα 7.3. Συντελεστής κοπής CC(%) συναρτήσει του βάθους κοπής p για το δοκίμιο 02 (⊥).

Η μέγιστη ροπή στρέψης T_{max} είναι:

$$T_{max} = \frac{N_C \cdot F_{Rmax} \cdot D_{TBM} \cdot f_L}{4} = \frac{10 \cdot 5.35kN \cdot 0.90m \cdot 1.2}{4} \Rightarrow T_{max} = 14.45 kNm$$

Η μέγιστη ισχύς P_{max} είναι:

$$P_{max} = 2\pi \frac{RPM}{60} T_{max} = 2\pi \frac{6 \text{ rev/min}}{60} 14.45kNm \Rightarrow P_{max} = 9.08 kW$$

7.5. Στιγμαίος ρυθμός κοπής (ICR)

Χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό του ICR.

Η σχέση (7.6) είναι η πρώτη μέθοδος για τον υπολογισμό του ICR και χρησιμοποιεί το βέλτιστο βάθος κοπής για δεδομένη απόσταση μεταξύ των κοπτικών και την ταχύτητα περιστροφής του μηχανήματος (Balci 2009).

$$ICR = p \cdot RPH \cdot A \quad (7.6)$$

όπου ICR: στιγμιαίος ρυθμός κοπής (m^3/h).

p: βέλτιστο βάθος κοπής (m/rev).

RPH (=60RPM): ταχύτητα περιστροφής (περιστροφές ανά ώρα) (rev/h).

A: διατομή της σήραγγας (m^2).

Για $p=0.007$ m/rev, $RPM=6$ rev/min και $A = \pi \cdot \frac{D_{TBM}^2}{4} = \pi \cdot \frac{0.90^2}{4} \Rightarrow A = 0.636$ m^2 προκύπτει:

$$ICR = p \cdot RPH \cdot A = 0.007 \frac{m}{rev} \cdot 60 \cdot 6 \frac{rev}{h} \cdot 0.636 m^2 \Rightarrow ICR = 1.60 \frac{m^3}{h}$$

Η σχέση (7.7) είναι η δεύτερη μέθοδος για τον υπολογισμό του ICR και χρησιμοποιεί την ελάχιστη ειδική ενέργεια που λαμβάνεται από τις εργαστηριακές δοκιμές κοπής. Πρόκειται για μια απλή μέθοδο για τη γρήγορη πρόβλεψη της επίδοσης όλων των τύπων των μηχανημάτων. Χρησιμοποιεί την εγκατεστημένη ισχύ του μηχανήματος, τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος και την ειδική ενέργεια κοπής που απαιτείται για την εξόρυξη δεδομένου πετρώματος με ορισμένο τύπο κοπτικού (Balci 2009).

$$ICR = k \frac{P}{SE_{opt}} \quad (7.7)$$

όπου P: εγκατεστημένη ισχύς του μηχανήματος (kW).

k: συντελεστής μεταφοράς ενέργειας από την κοπτική κεφαλή στο μέτωπο εκσκαφής, που συνήθως λαμβάνεται 0.85-0.90 για TBM και για συνθήκες άρρηκτου πετρώματος

SE_{opt} : ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής (kWh/m^3).

Ο προβλεπόμενος ICR που προκύπτει από τη σχέση (7.7) είναι έγκυρος για συνθήκες άρρηκτου πετρώματος και δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ιδιοτήτων της βραχομάζας. Είναι προφανές ότι η ύπαρξη ασυνεχειών θα αυξήσει τον ICR μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο.

Η εγκατεστημένη ισχύς του μηχανήματος που επελέγη είναι:

$$P = 2\pi \frac{RPM}{60} T = 2\pi \frac{6 \frac{rev}{min}}{60} 17.1 \text{ kNm} \Rightarrow P_{max} = 10.7 \text{ kW}$$

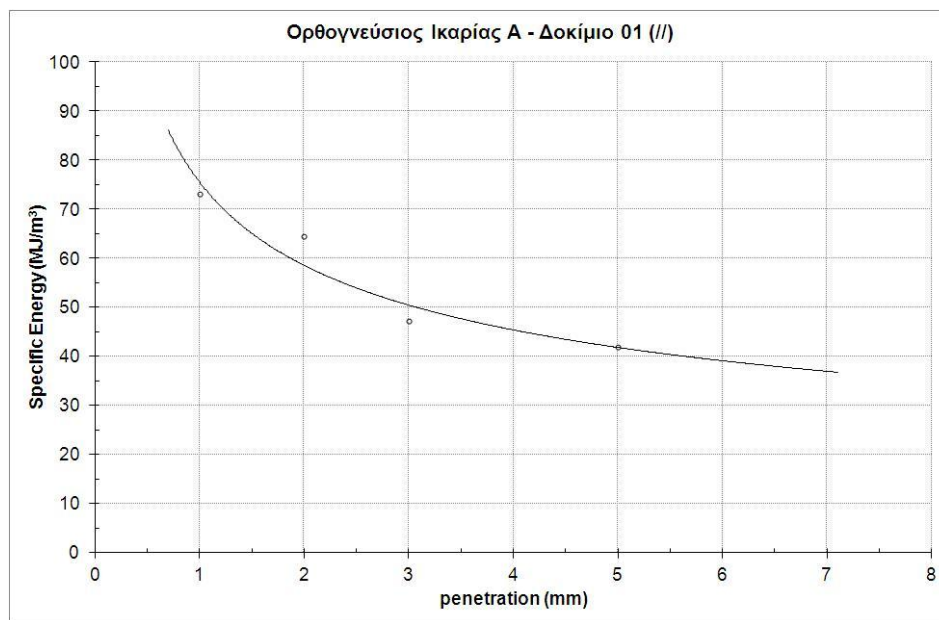
Η ειδική ενέργεια SE_{opt} για το βέλτιστο βάθος κοπής $p=7$ mm/rev εκτιμάται βάσει των διαγραμμάτων SE-p που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές κοπής για κάθε δοκίμιο, όπως φαίνεται στα σχήματα 7.4 και 7.5. Εκτιμάται ότι είναι 30-40MJ/ m^3 για το δοκίμιο 01 (//) και 50-60MJ/ m^3 για το δοκίμιο 02 (\perp).

Ο ICR προσδιορίζεται για την ελάχιστη και τη μέγιστη εκτιμώμενη τιμή της SE_{opt} .

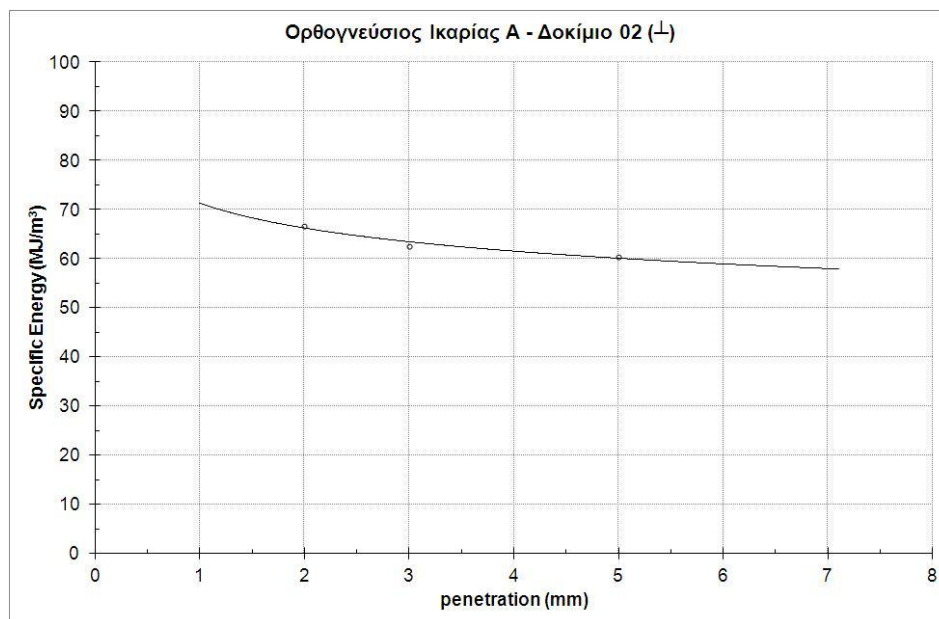
$$\text{Για } SE_{opt}=30\text{MJ/m}^3=8.3\text{kWh/m}^3 \text{ είναι: } ICR = k \frac{P}{SE_{opt}} = 0.9 \frac{10.7\text{kW}}{8.3\text{kWh/m}^3} \Rightarrow ICR = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Για } SE_{opt}=60\text{MJ/m}^3=16.7\text{kWh/m}^3 \text{ είναι: } ICR = k \frac{P}{SE_{opt}} = 0.9 \frac{10.7\text{kW}}{16.7\text{kWh/m}^3} \Rightarrow ICR = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Λόγω του μεγάλου εύρους τιμών (30-60MPa) που προκύπτει από την εκτίμηση της SE_{opt} και άρα της αβεβαιότητας για τις εκτιμώμενες τιμές, τόσο της SE_{opt} , όσο και του ICR, συνιστάται η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών κοπής του πετρώματος σε βάθος 7mm.



Σχήμα 7.4. Διάγραμμα ειδικής ενέργειας κοπής-βάθους κοπής για το δοκίμιο 01 (//).



Σχήμα 7.5. Διάγραμμα ειδικής ενέργειας κοπής-βάθους κοπής για το δοκίμιο 02 (⊥).

7.6. Διάρκεια ζωής των κοπτικών

Σύμφωνα με το Rostami et al. (2005), η δοκιμή αποξεστικότητας κατά Cerchar είναι αυτή που κατά κανόνα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αποξεστικότητας του πετρώματος και κατ' επέκταση την εκτίμηση της διάρκειας ζωής και του σωρευτικού κόστους των κοπτικών ενός TBM.

Για κοπτικά τύπου δίσκου, έχει αποδειχτεί ότι η διάρκεια ζωής (σε πόδια (ft) διαδρομής στο μέτωπο της σήραγγας) είναι αντιστρόφως ανάλογη του δείκτη CAI. Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής των δίσκων για TBM βράχου δίνεται από τη σχέση (Rostami et al. 2005):

$$LF = \frac{6.75 \cdot D_C}{17 \cdot CAI} \quad (7.8)$$

όπου LF: διαδρομή του δίσκου στο μέτωπο σε εκατομμύρια πόδια (10^6 ft).

D_C : διάμετρος του δίσκου (in).

Για $D_C=6.5$ in και $CAI=4.57$ προκύπτει: $LF = \frac{6.75 \cdot 6.5}{17 \cdot 4.57} \Rightarrow LF = 0.5647 \cdot 10^6 \text{ ft}$

Η εκτίμηση του αριθμού των περιστροφών της κεφαλής πριν την ανάγκη αντικατάστασης των κοπτικών δίσκων δίνεται από τη σχέση:

$$NRev = \frac{LF}{0.32 \cdot \pi \cdot D_{TBM}} \quad (7.9)$$

όπου D_{TBM} : διάμετρος του TBM (ft).

Για $D_{TBM}=0.90 \text{ m}=2.95 \text{ ft}$ είναι: $NRev = \frac{564744}{0.32 \cdot \pi \cdot 2.95} \Rightarrow NRev = 190430$ περιστροφές

Η διάρκεια ζωής των κοπτικών σε ώρες εκτιμάται βάσει της ταχύτητας περιστροφής της κεφαλής (RPM) από τη σχέση:

$$Hr = \frac{NRev}{60 \cdot RPM} \quad (7.10)$$

όπου Hr: διάρκεια ζωής των δίσκων (h).

Για $RPM=6$ είναι: $Hr = \frac{190430}{60 \cdot 6} \Rightarrow Hr = 530 \text{ h}$

Ανεξαρτήτως της ακρίβειας των χρησιμοποιούμενων σχέσεων, αυτό που παρατηρείται για τις ανωτέρω σχέσεις είναι ο υψηλός βαθμός αλληλεξάρτησης μεταξύ της διάρκειας ζωής των κοπτικών και του δείκτη αποξεστικότητας CAI. Η σχέση αυτή είναι κατά κανόνα γραμμική, που σημαίνει ότι οποιαδήποτε διακύμανση λόγω λάθους, θα προκαλέσει ένα παρόμοιου μεγέθους λάθος στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής και του κόστους των κοπτικών. Για παράδειγμα, μετρούμενη τιμή του δείκτη CAI 3 αντί για 2, σημαίνει 1.5 φορά μικρότερη διάρκεια ζωής των κοπτικών και άρα 1.5 φορά μεγαλύτερο κόστος. Αυτό δείχνει τη μεγάλη ευαισθησία των μετρήσεων και το αντίκτυπο που έχουν στις επακόλουθες εκτιμήσεις (Rostami et al. 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των ορθογνέσιων Ικαρίας Α και Β, όπως αυτά παρατίθενται συγκεντρωτικά στους πίνακες 8.1 και 8.2 αντίστοιχα, συμπεραίνεται ότι και τα δύο πετρώματα παρουσιάζουν υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Πιο συγκεκριμένα, συμπεραίνεται ότι είναι:

- πολύ ισχυρά όσον αφορά την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη και εφελκυσμό.
- πολύ υψηλής σκληρότητας.
- εξαιρετικά ψαθυρά, καθώς ο συντελεστής πλαστικότητας Shore είναι πολύ χαμηλός.
- εξαιρετικά αποξεστικά.

Οι τιμές των αποτελεσμάτων των δοκιμών Shore και Cerchar είναι παρόμοιες για τους δύο ορθογνέσιους, ενώ ο ορθογνέσιος Α έχει σημαντικά υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη, ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τον ορθογνέσιο Β.

Οι τιμές του δείκτη ειδικής ενέργειας κοπής που προέκυψαν από τη δοκιμή κοπής με κοπτικό συρόμενου τύπου είναι 47.863 και 48.421 MJ/m³ για τους ορθογνέσιους Α και Β αντίστοιχα.

Όσον αφορά τη δοκιμή κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου, η οποία εκτελέστηκε σε δύο δοκίμια ορθογνέσιου Α (στο 01 (//) με παράλληλη τη στρώση του στη διεύθυνση κοπής και στο 02 (⊥) με κάθετη τη στρώση του προς αυτή), προκύπτει ότι στο δοκίμιο 01, σε σύγκριση με το 02:

- τα δημιουργούμενα θραύσματα (chips) για το ίδιο βάθος κοπής είναι μεγαλύτερου μεγέθους και άρα
- ο βέλτιστος λόγος s/p για τον οποίο λαμβάνεται η ελάχιστη ειδική ενέργεια κοπής είναι μεγαλύτερος (10 για το δοκίμιο 01 (//) έναντι 9 για το δοκίμιο 02 (⊥)).
- οι τιμές της ειδικής ενέργειας κοπής είναι γενικά χαμηλότερες για τις ίδιες συνθήκες κοπής (ίδιο βάθος κοπής και λόγο s/p).

Τόσο στη δοκιμή κοπής με κοπτικό τύπου δίσκου, όσο και σ' αυτή με κοπτικό συρόμενου τύπου, παρατηρείται ότι οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις ώσης είναι σημαντικά υψηλότερες από τις δυνάμεις κοπής F_R και F_Z αντίστοιχα, όπως εύκολα διαπιστώνεται από τα διαγράμματα του παραρτήματος 1 και 2 και από τις τιμές του συντελεστή κοπής (CC). Διαπιστώνεται ακόμη, ότι ο συντελεστής κοπής αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του βάθους κοπής.

Όσον αφορά τη δυνατότητα εξόρυξης του πετρώματος με Micro TBM αυτή είναι δυνατή και με δεδομένο τον ICR που προσδιορίστηκε, εκτιμάται ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί ικανοποιητικός ρυθμός προχώρησης, παρά την υψηλή αντοχή, τη μεγάλη σκληρότητα και αποξεστικότητα του πετρώματος.

Πίνακας 8.1. Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα ορθογέσιου Ικαρίας Α.

		Specimen						Test results											
No.	Code	Diameter	Length	L/D	Mass	Density	Specific cutting energy	UCS	Static Young's modulus	Static Poisson ratio	Brazilian tensile strength	PUNDIT Vp	PUNDIT Young's modulus	Shore hardness	Shore plasticity index	CERCHAR 55	CERCHAR 40		
		(mm)	(mm)	(-)	(kg)	(kg/m ³)	(MJ/m ³)	(MPa)	(GPa)	(-)	(MPa)	(m/s)	(GPa)	(-)	(%)	(-)	(-)		
Count	16	16	16	16	16	16	2	2	2	2	6	10	10	11	11	2	2		
Min		53.7				2592.4	26.823	154.6	46.5	0.227	14.6	4709.0	152.4	71.1	1.1	4.40	4.31		
95% CI of the mean		0.2				6.2	41.239	19.5	3.3	0.070	2.0	661.6	58.4	2.4	1.2	0.2	1.0		
Avg		54.0				2628.8	47.863	164.5	48.2	0.262	19.6	6143.7	266.4	76.9	3.9	4.49	4.83		
StDev		0.3				12.7	29.756	14.1	2.4	0.051	2.5	1067.5	94.2	4.0	2.1	0.12	0.74		
Max		55.2				2652.1	68.904	174.5	49.9	0.298	21.2	7932.4	431.8	84.0	7.4	4.57	5.35		
	1	IK_A_01	54.18	73.19	1.35	0.444	2629.6					5323.0	194.5	77.7	6.99				
	2	IK_A_02	53.88	88.06	1.63	0.528	2628.4					7932.4	431.8	74.3	3.36				
	3	IK_A_03	55.21	103.19	1.87	0.649	2627.7	26.823				5934.0	241.6	73.4	3.91				
	4	IK_A_04	54.01	127.75	2.37	0.771	2634.1		174.5	46.5	0.298	5794.8	230.9	81.7	2.27				
	5	IK_A_05	53.81	95.10	1.77	0.570	2633.2					4709.0	152.4	72.6	1.68	4.40	4.31		
	6	IK_A_06	53.92	100.92	1.87	0.607	2634.8	68.904				6869.6	324.6	71.1	5.56				
	7	IK_A_07	53.99	102.19	1.89	0.615	2631.1					5312.8	193.9	77.6	1.12				
	8	IK_A_08	53.96	103.28	1.91	0.622	2633.4					7693.2	406.9	75.3	4.46	4.57	5.35		
	9	IK_A_09	53.98	110.83	2.05	0.669	2637.5					5458.2	205.1	80.5	3.84				
	10	IK_A_10	53.91	118.88	2.21	0.715	2635.7		154.6	49.9	0.227	6409.6	282.7	77.7	2.02				
	11	IK_A_11	53.98	28.39	0.53	0.168	2592.4							84.0	7.43				
	12	IK_A_12	53.80	28.43	0.53	0.169	2611.8												
	13	IK_A_13	53.77	27.47	0.51	0.164	2623.2												
	14	IK_A_14	53.74	27.80	0.52	0.167	2652.1												
	15	IK_A_15	54.12	27.95	0.52	0.169	2627.4												
	16	IK_A_16	54.11	27.71	0.51	0.167	2628.0												

Πίνακας 8.2. Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα ορθογώνιου Ικαρίας Β.

		Specimen						Test results										
	No.	Code	Diameter	Length	L/D	Mass	Density	Specific cutting energy	UCS	Static Young's modulus	Static Poisson ratio	Brazilian tensile strength	PUNDIT Vp	PUNDIT Young's modulus	Shore hardness	Shore plasticity index	CERCHAR 55	CERCHAR 40
			(mm)	(mm)	(-)	(kg)	(kg/m ³)	(MJ/m ³)	(MPa)	(GPa)	(-)	(MPa)	(m/s)	(GPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
Count	11		9	9	9	9	8	2	2	2	2	4	4	4	11	11	2	2
Min			54.0				2602.0	31.216	116.0	43.8	0.266	8.3	5079.6	54.6	73.8	1.8	4.70	5.26
95% CI of the mean			0.0				10.9	33.722	15.0	1.8	0.007	2.0	214.1	4.8	2.5	1.5	0.2	0.6
Avg			54.1				2627.4	48.421	123.6	44.7	0.269	10.0	5287.9	59.3	83.6	4.2	4.82	5.57
StDev			0.0				15.7	24.332	10.8	1.3	0.005	2.1	218.5	4.9	4.3	2.6	0.17	0.44
Max			54.1				2642.3	65.627	131.3	45.6	0.273	12.9	5487.6	63.7	89.5	8.7	4.94	5.89
	17	Ik_B_01	54.09	122.29	2.26	0.742	2642.3	31.216					5119.0	55.5	84.8	2.88	4.94	5.89
	18	Ik_B_02	54.11	132.47	2.45	0.804	2640.4		131.3	45.6	0.266		5465.2	63.2	89.5	1.77		
	19	Ik_B_03	54.03	141.57	2.62	0.857	2641.7		116.0	43.8	0.273		5079.6	54.6	84.2	3.19		
	20	Ik_B_04	54.08	145.71	2.69	0.884	2640.1	65.627					5487.6	63.7	85.9	2.12		
	21	Ik_B_05	54.04	28.50	0.53	0.171	2622.6								80.7	6.33		
	22	Ik_B_06	54.10	28.52	0.53	0.172	2616.4					12.9			85.5	7.70		
	23	Ik_B_07	54.00	28.42	0.53	0.169	2602.0					8.3			81.0	6.77		
	24	Ik_B_08	54.10	24.36	0.45	0.146	2613.7					8.6			84.7	8.74		
	25	Ik_B_09	54.06	24.85	0.46	0.143	-					10.0			88.1	2.12		
	26	Ik_B_11	-	-	-	-	-								73.8	2.43	4.70	5.26
	27	Ik_B_12	-	-	-	-	-								81.8	2.34		

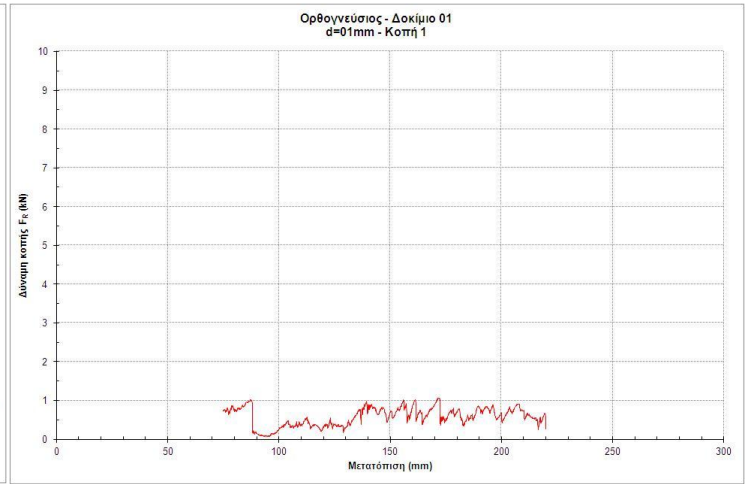
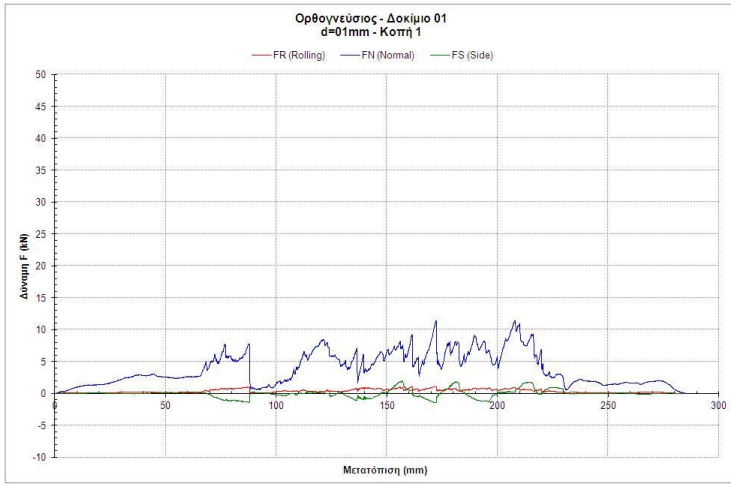
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

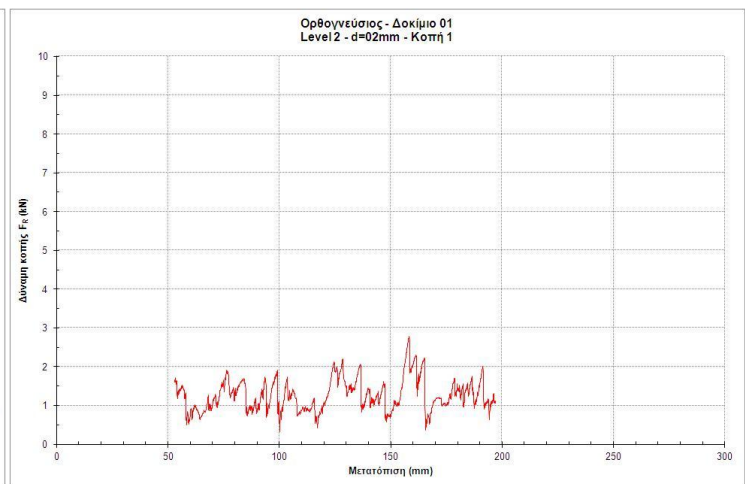
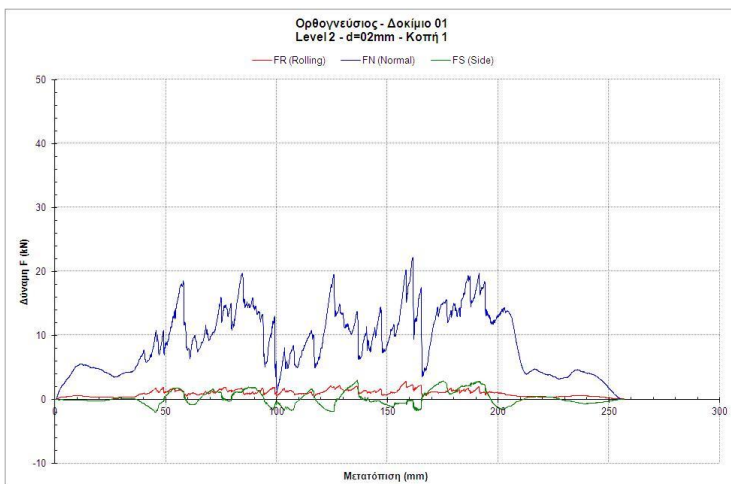
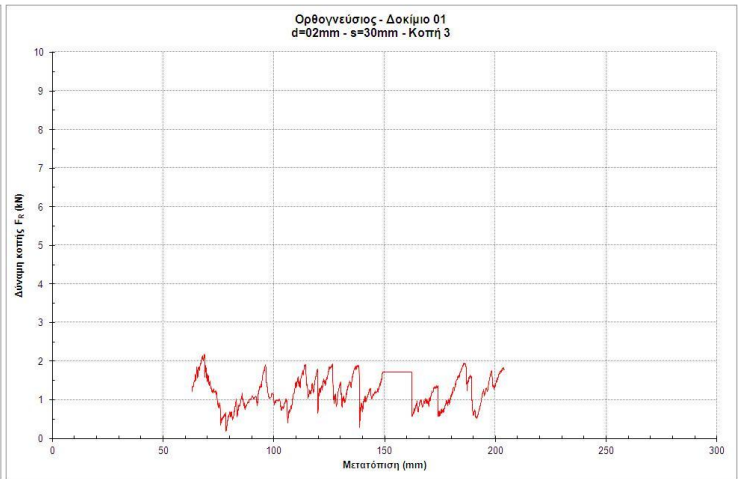
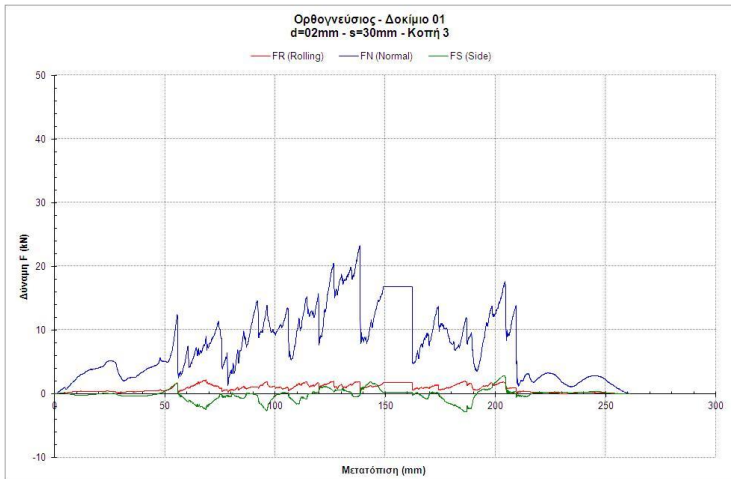
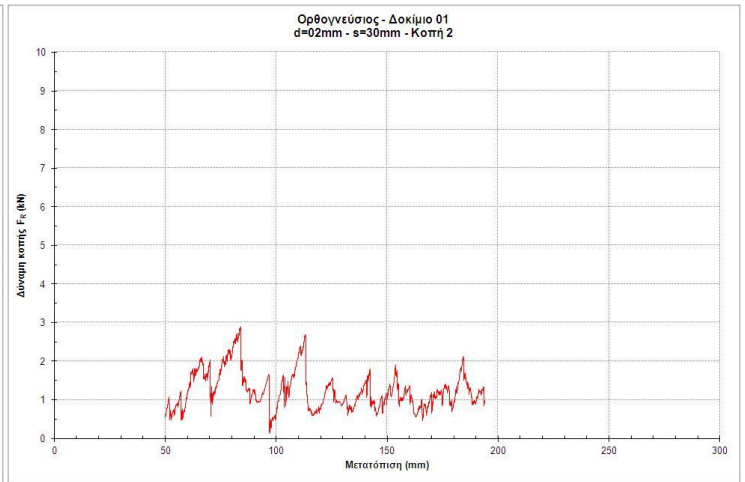
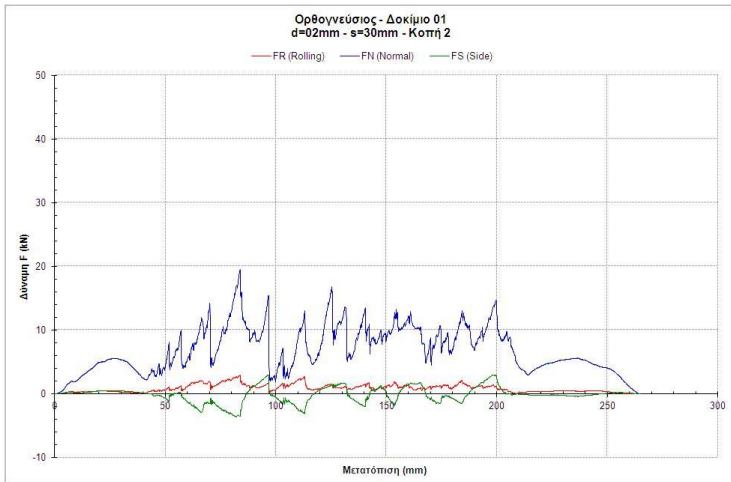
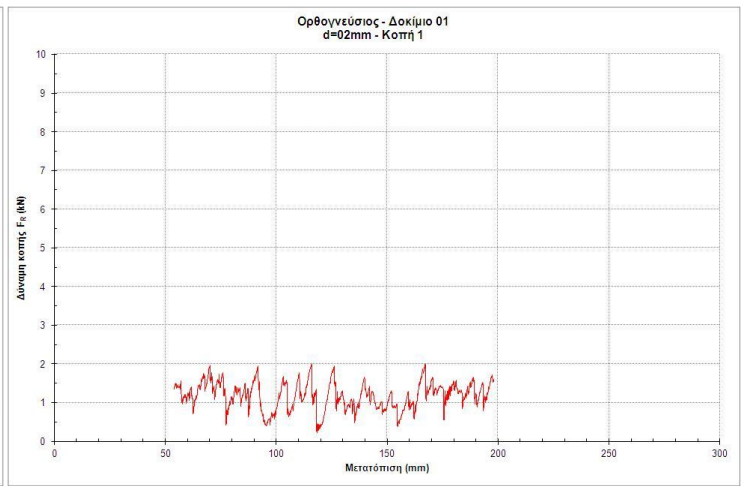
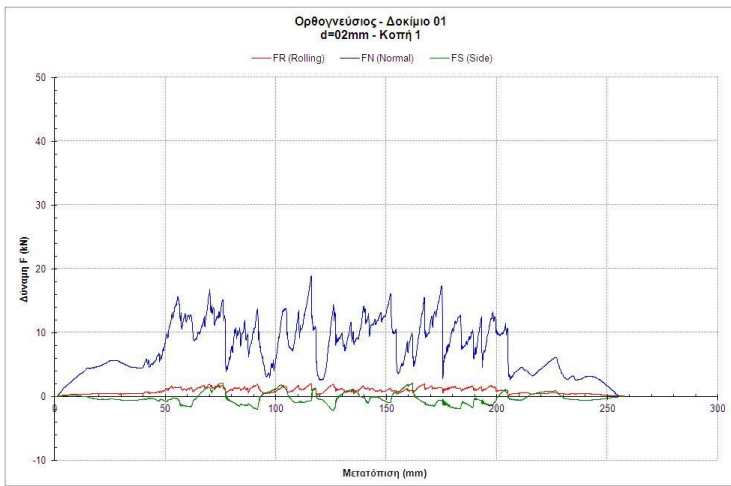
1. Balci C. (2009). Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**, 423-435.
2. Balci C. and Bilgin N. (2007). Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **44**, 468-476.
3. Cigla M. (2006). Prediction and modeling of disc cutting forces for hard rock excavation based on assessment of punch penetration index for quantifying rock toughness and resistance to chipping. D. Phil. thesis. Colorado School of Mines.
4. Gertsch R., Gertsch L. and Rostami J. (2007). Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **44**, 238-246.
5. Michalakopoulos T.N., Anagnostou V.G., Bassanou M.E., Panagiotou G.N. (2006). The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **43**, 321–327.
6. Ozdemir (2009). Εκπαιδευτικές σημειώσεις. CSM, Golden, Colorado.
7. Panagiotou G.N. (1992). *Rock cutting theories*. Notes on the lectures given for the M.Sc. course in Rock Mechanics and Excavation Engineering. University of Newcastle.
8. Plinninger R., Kasling H., Thuro K., Spaun G. (2003). Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **40**, 259–263.
9. Rostami J. and Ozdemir L. (1993). A new model for performance prediction of hard rock TBMs. *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings.*, Boston, USA, 794-809.
10. Rostami J., Ozdemir L. and Nilson B. (1996). Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models. *Institute of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, Las Vegas.
11. Rostami J., Ozdemir L., Bruland A. and Dahl F. (2005). Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings.*, Seattle, USA, 738-751.
12. Roxborough F. F. and Philips H. R. (1975). Rock excavation by disc cutter. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **12**, 361-366.
13. Sanio H. P. (1985). Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22**, 153-161.
14. Snowdon R. A., Ryley M. D. and Temporal J. (1982). A study of disc cutting in selected British rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **19**, 107-121.
15. University of Trondheim, NTH-Anleggsdrift (1994): Project Report 1-94 HARD ROCK TUNNEL BORING.

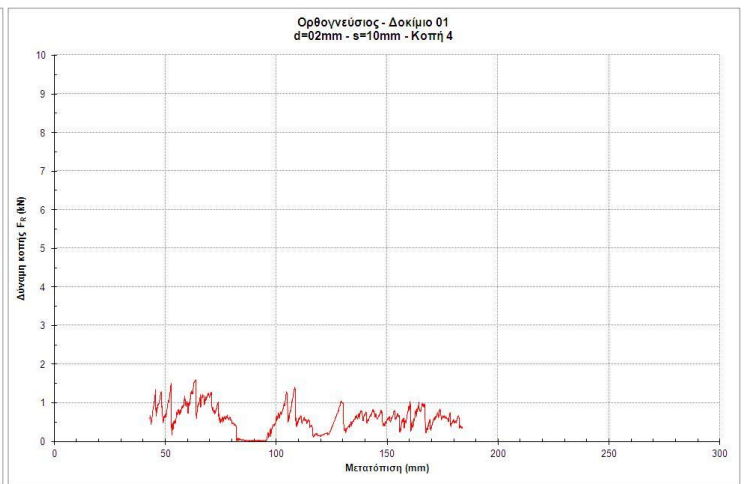
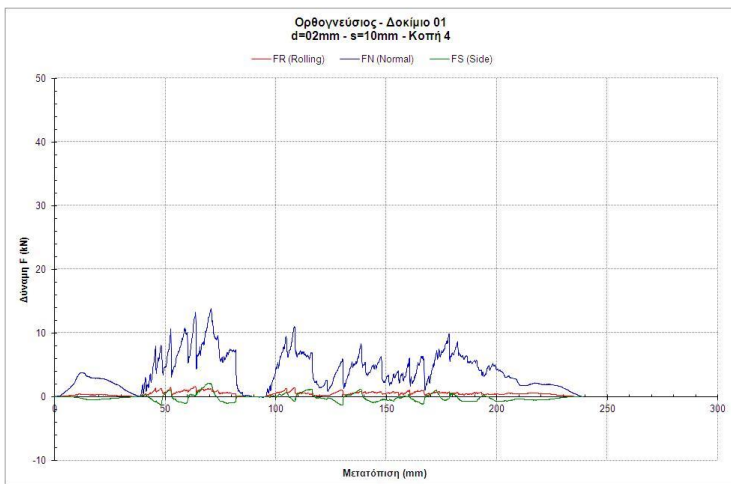
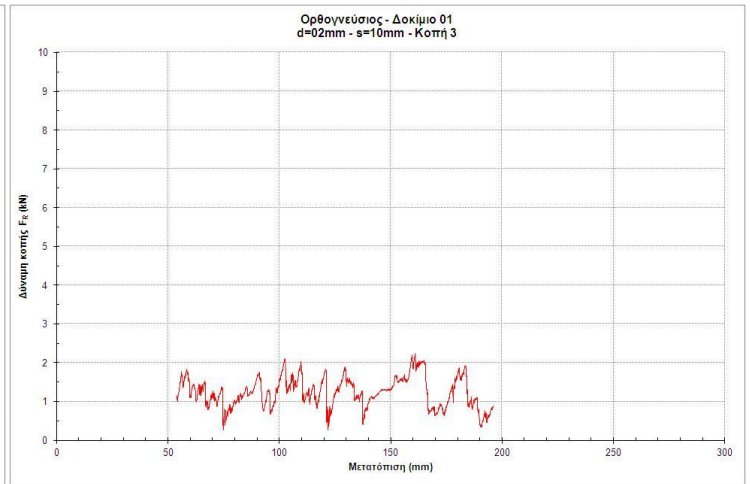
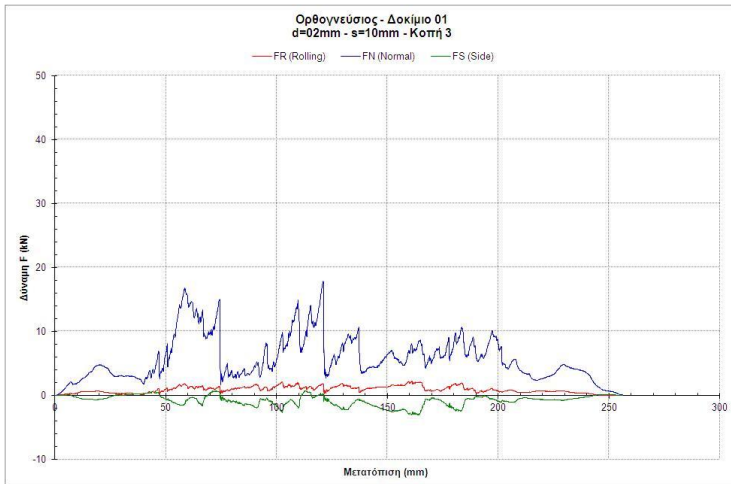
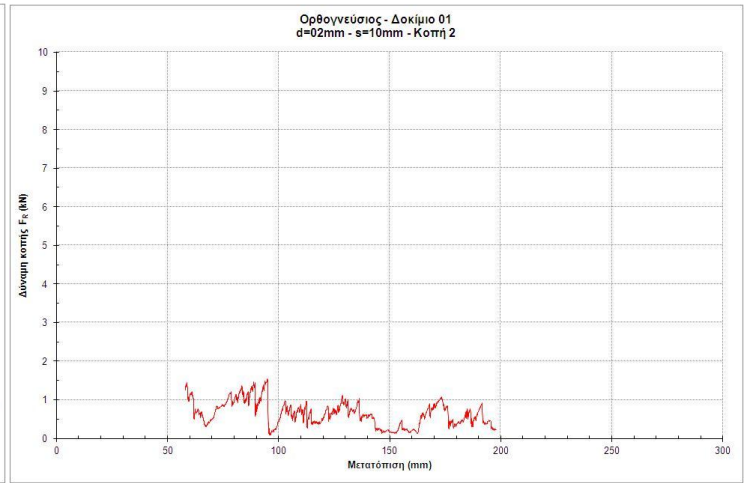
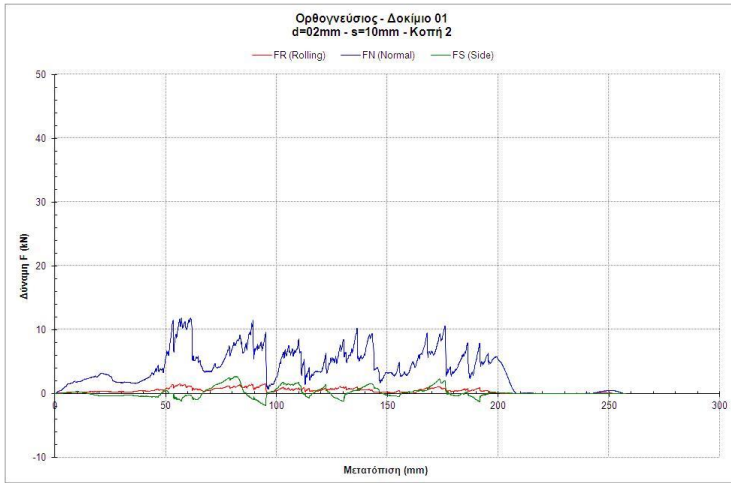
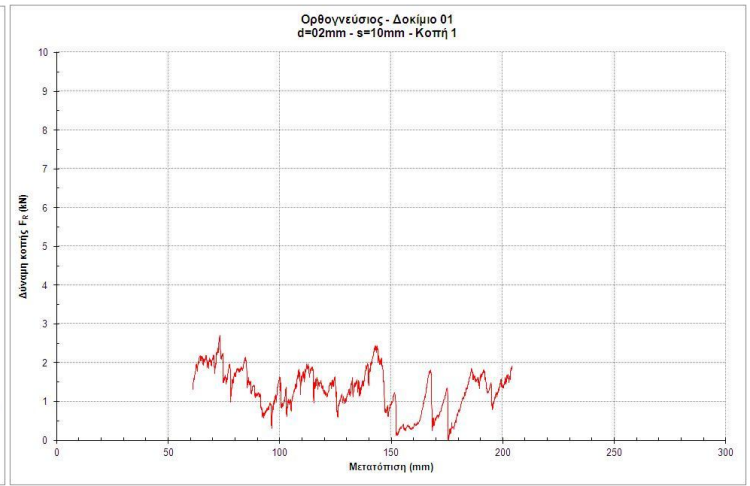
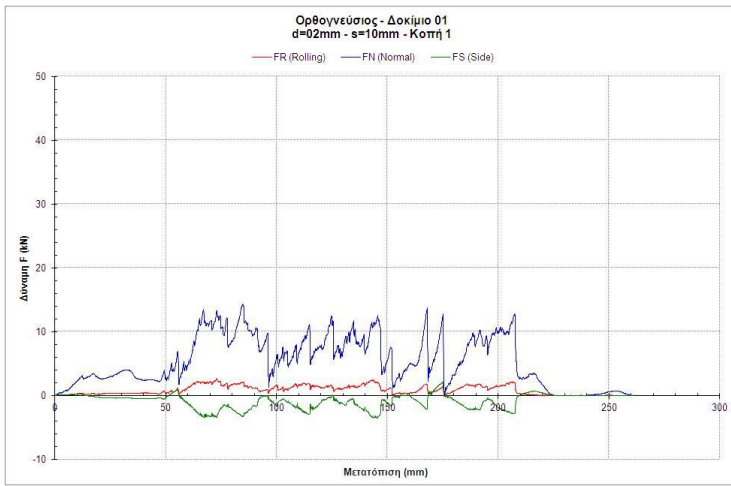
16. West G. (1989). Rock abrasiveness testing for tunnelling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **26**, 151-160.
17. Αναγνώστου Β. (2006). Προσδιορισμός του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής ιζηματογενών πετρωμάτων. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
18. ΔΕΗ Ανανεώσιμες. *Ικαρία, το αύριο της ενέργειας, σήμερα.*
19. Μαλαχίας Γ. και Καρούτσος Α. (2009). Η θεμελίωση του υβριδικού ενεργειακού έργου της Ικαρίας. *Εταιρεία Ικαριακών Μελετών*, **7**, 17-18.
20. Μαλαχίας Γ., Ρόζος Δ., Καρούτσος Α., Μπούρκας Κ. και Γαγλίας Κ. (2003). Εισήγηση για την προτεινόμενη περιοχή εγκατάστασης οργανωμένου ΧΥΤΑ στην επαρχία Ικαρίας του νομού Σάμου. *Σύλλογος Ικάρων Επιστημόνων*, Αθήνα.
21. Νομικός Π. (2008). *Προχωρημένη μηχανική των πετρωμάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
22. Πατσίδης Γ. (2009). Εργαστηριακός προσδιορισμός της ειδικής ενέργειας κοπής λατερίτη και ασβεστολίθου από το μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη της ΛΑΡΚΟ Α.Ε. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
23. Τσουτρέλης Χ. (1985). *Στοιχεία μηχανικής των πετρωμάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
24. Τσουτρέλης Χ., Γκίκας Ν., Νομικός Π. (2000). *Εργαστηριακές ασκήσεις μηχανικής πετρωμάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

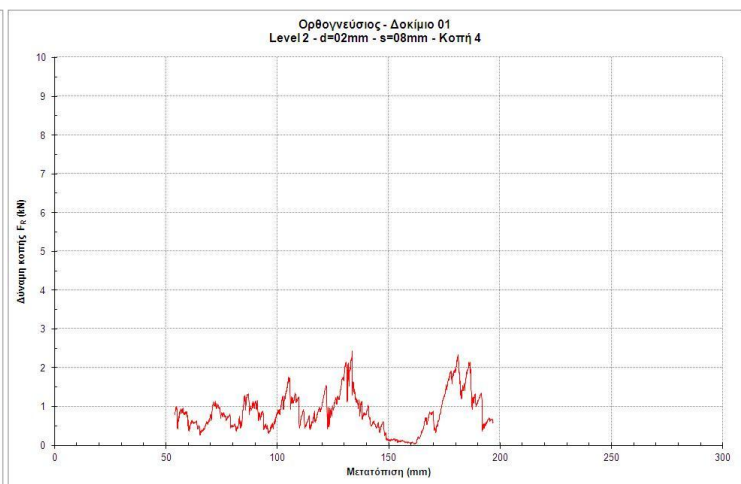
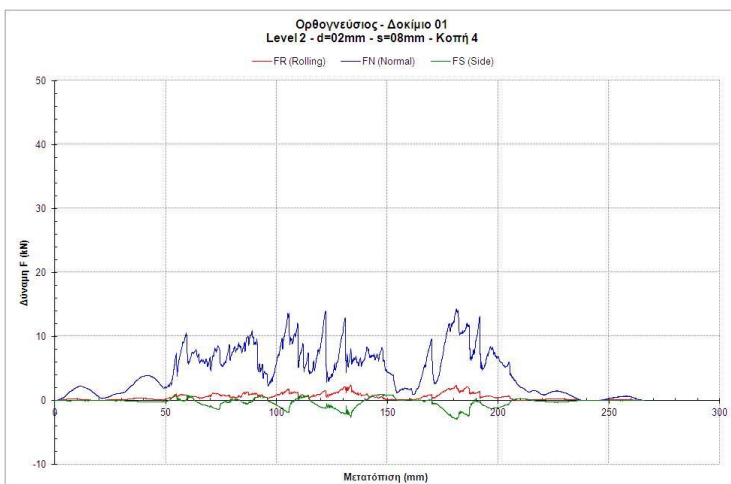
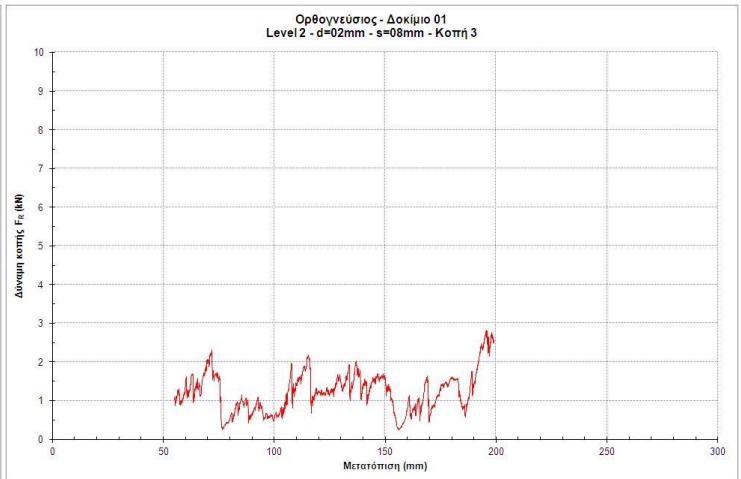
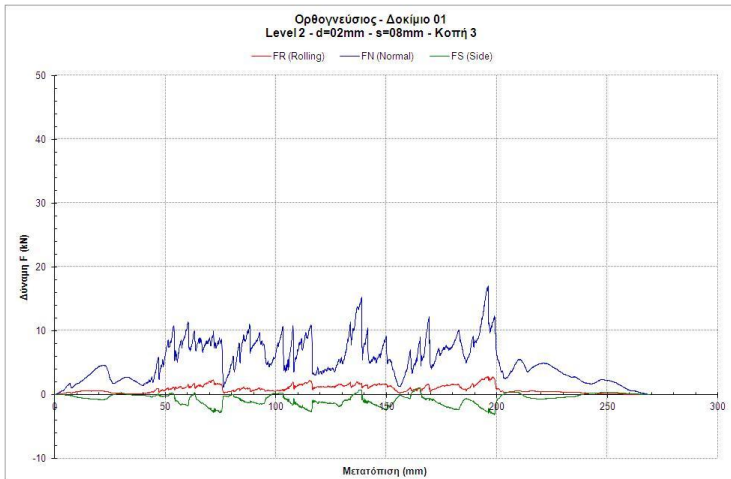
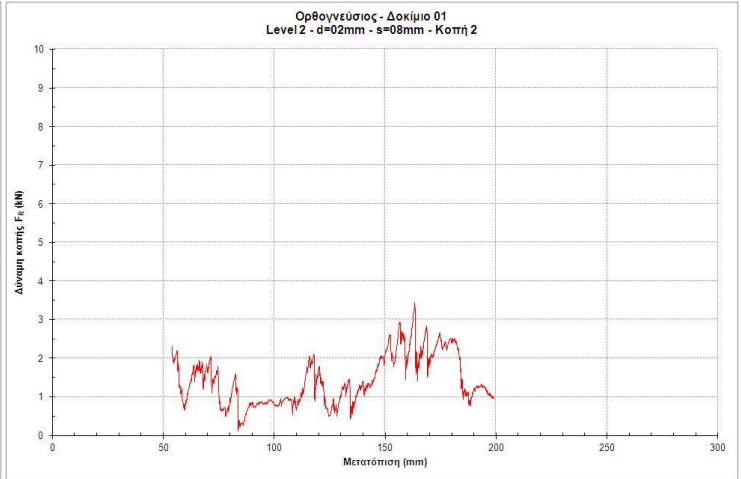
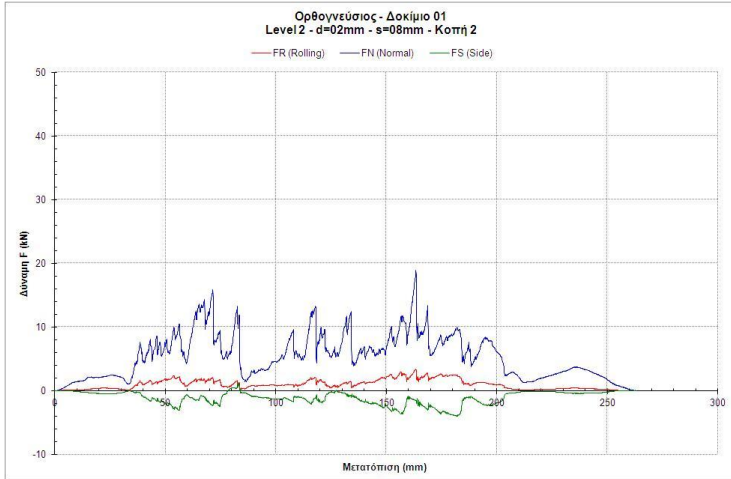
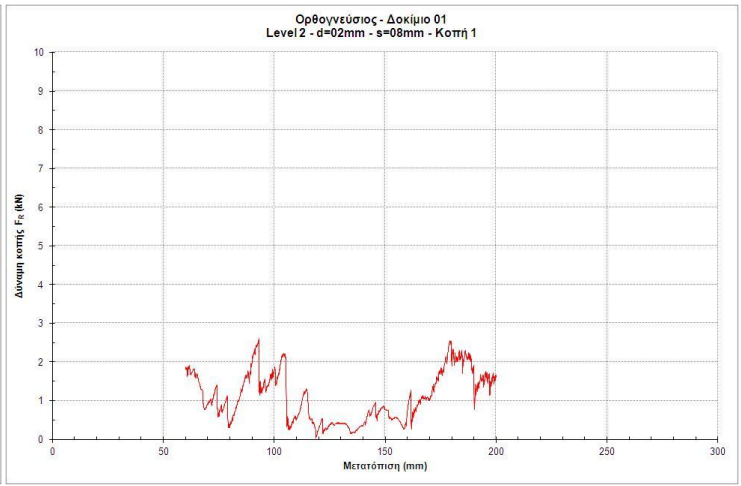
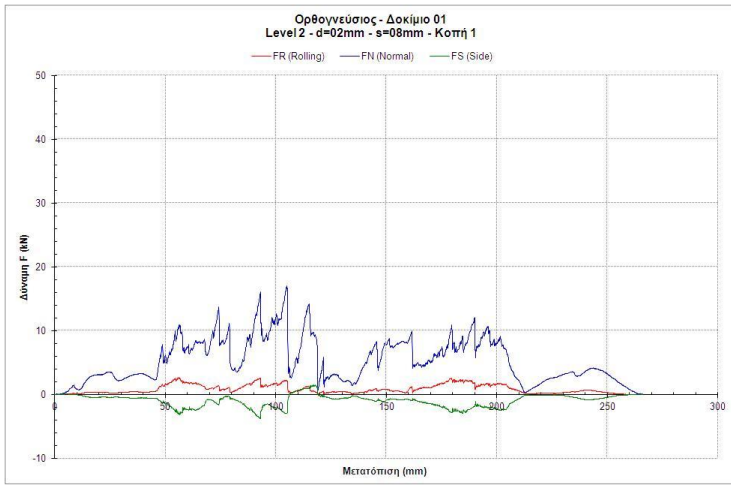
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

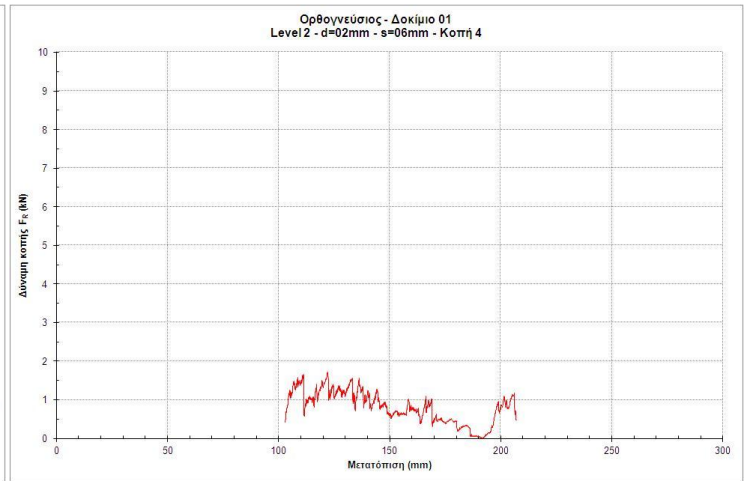
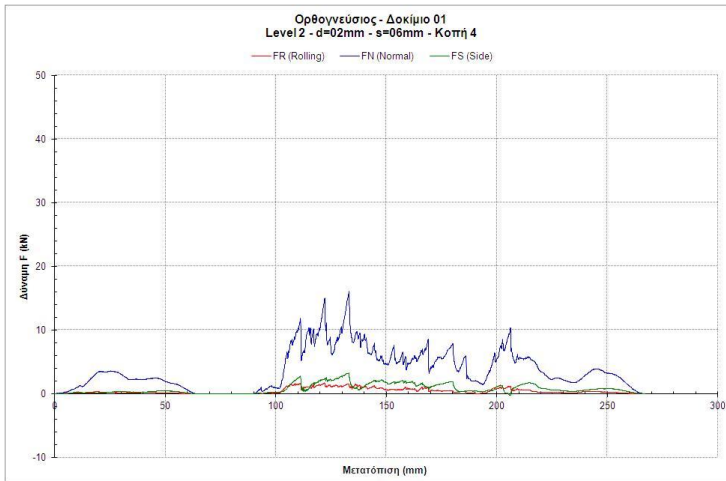
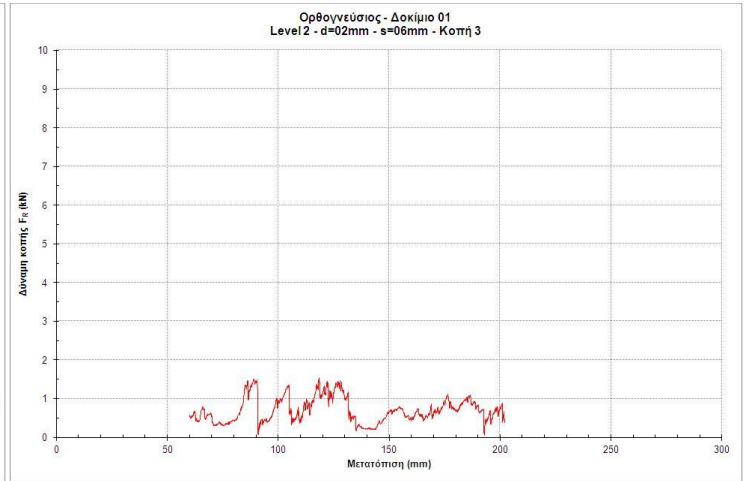
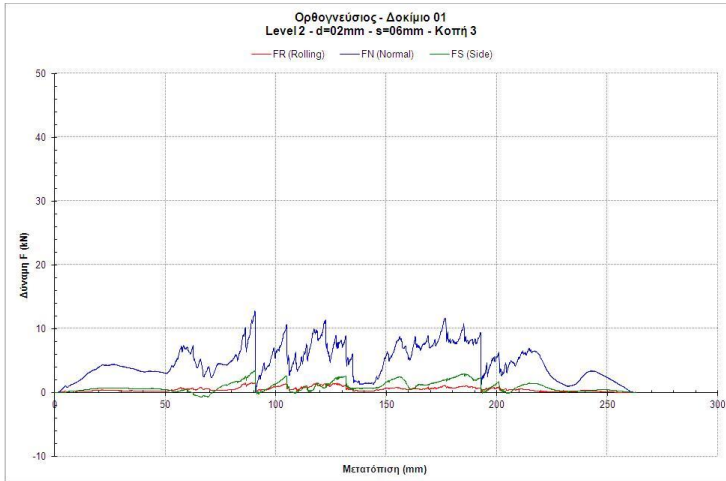
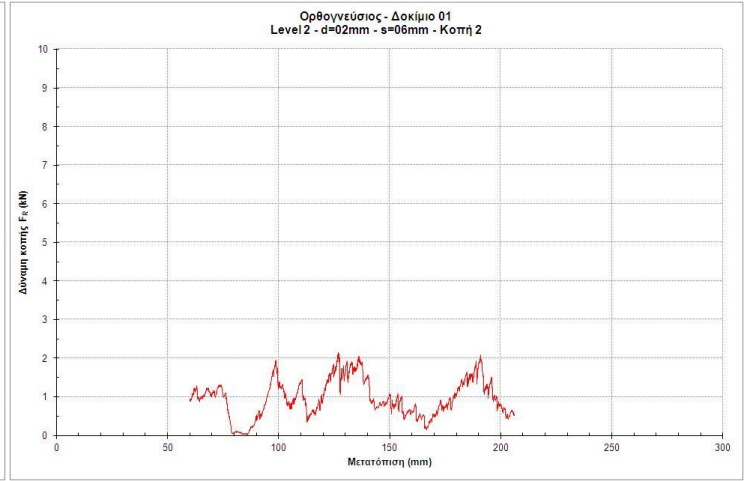
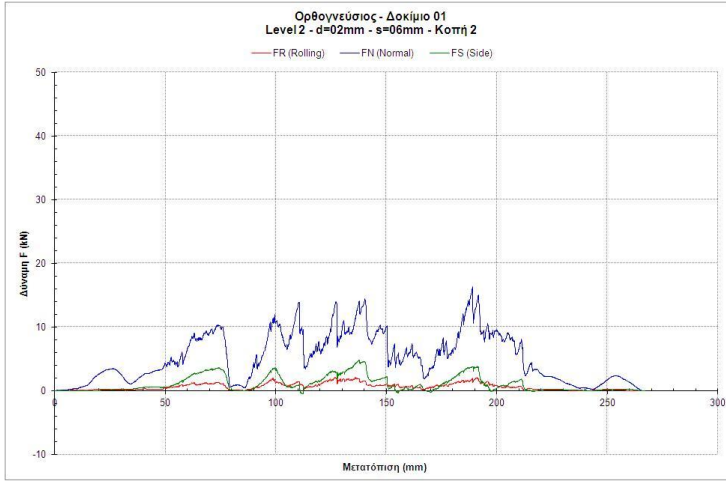
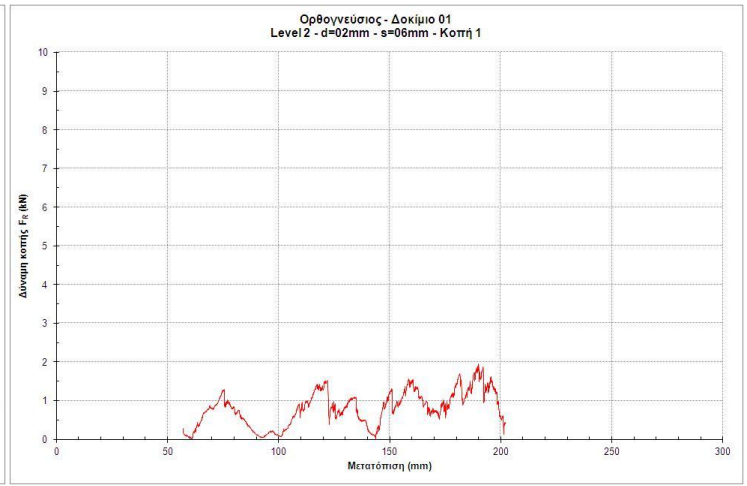
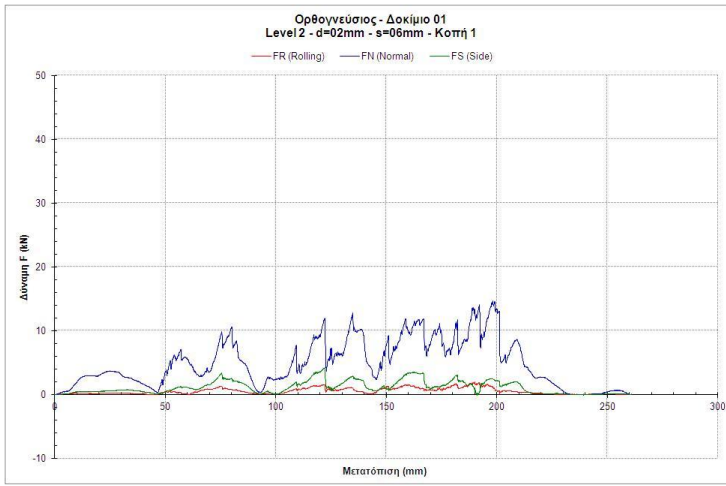
**α) Διαγράμματα δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό τύπου δίσκου
Ορθογνέσιου Ικαρίας Α
Δοκίμιο 01 (//)**

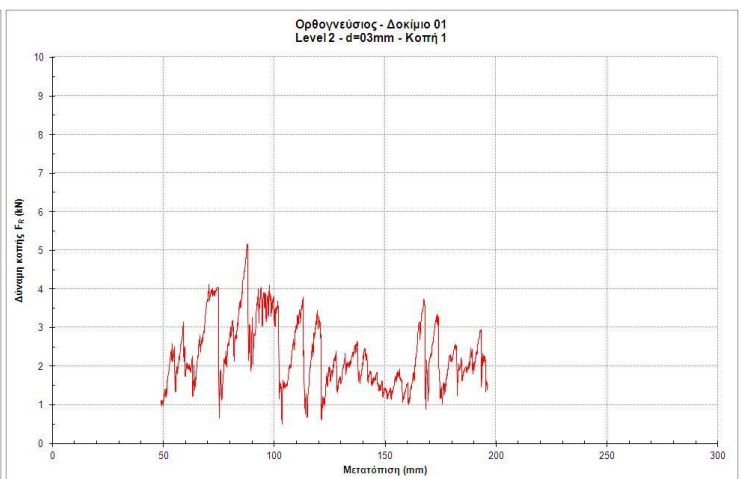
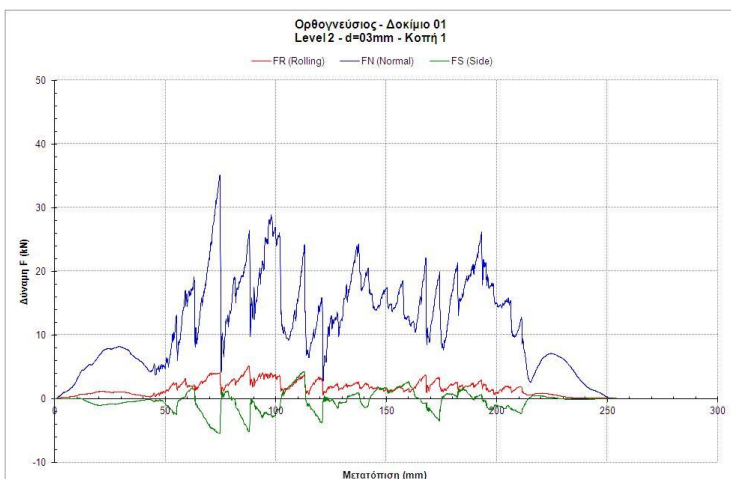
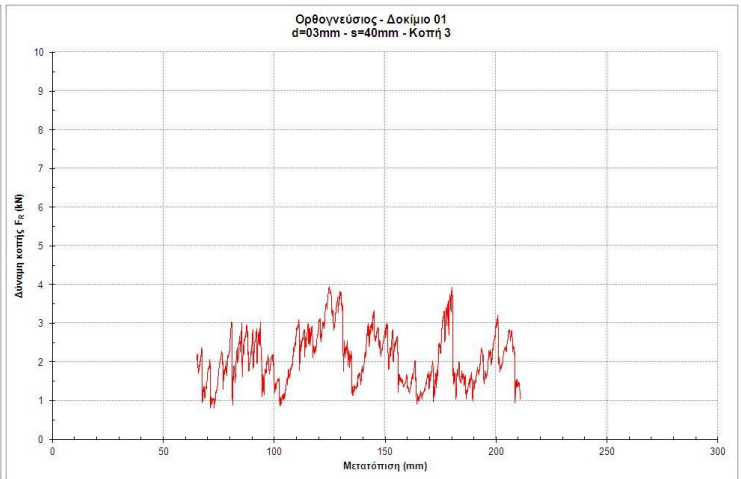
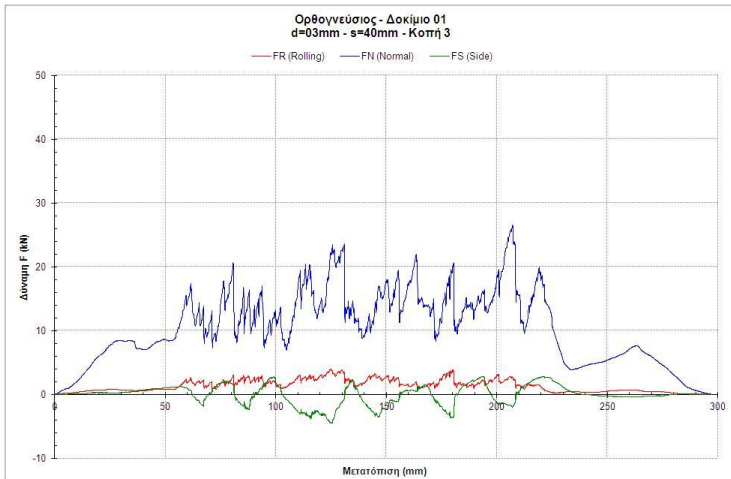
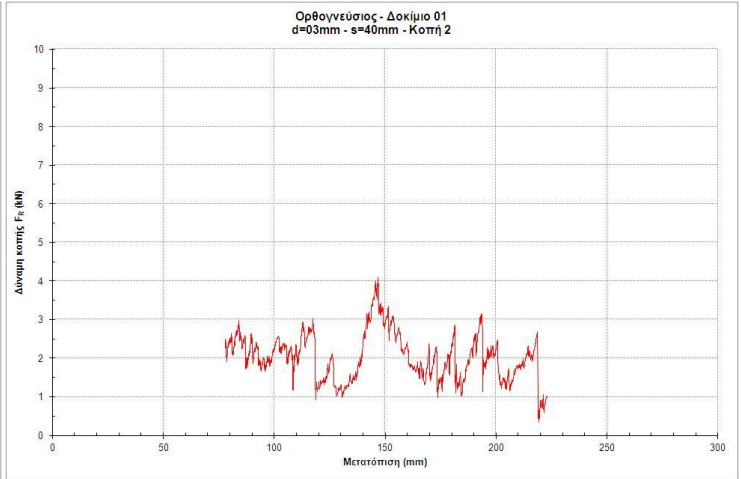
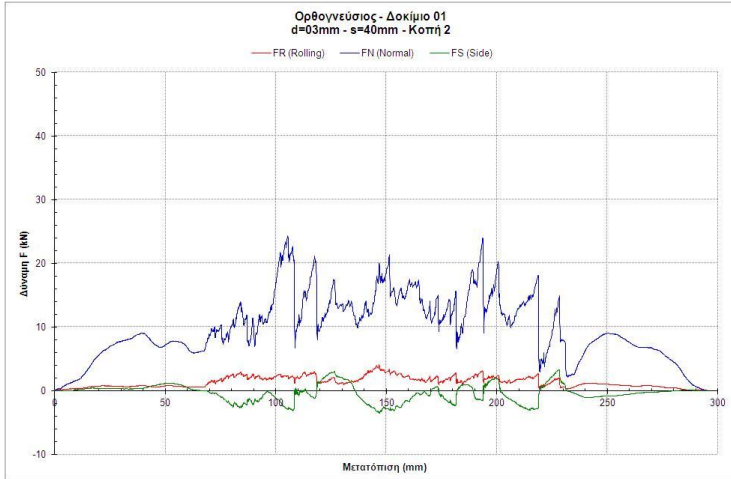
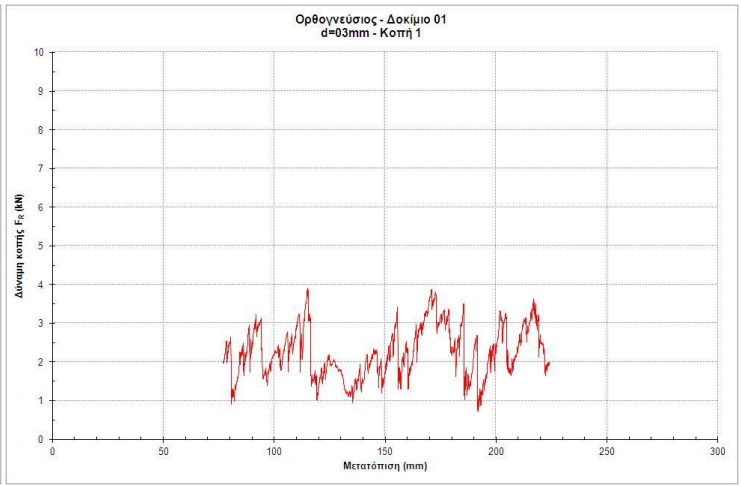
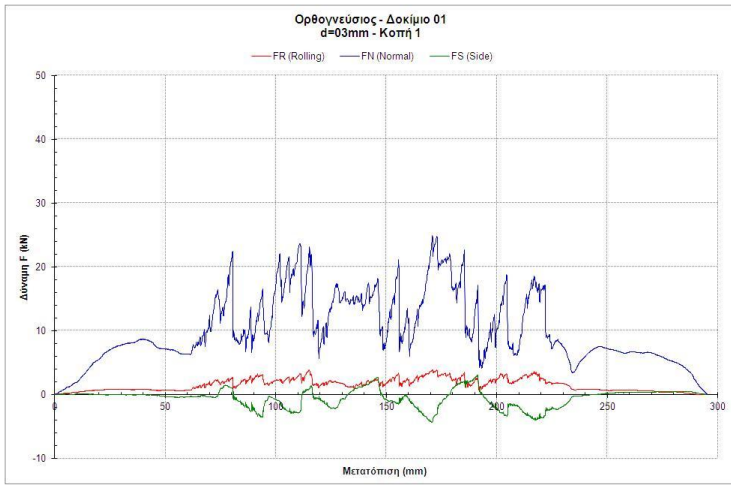


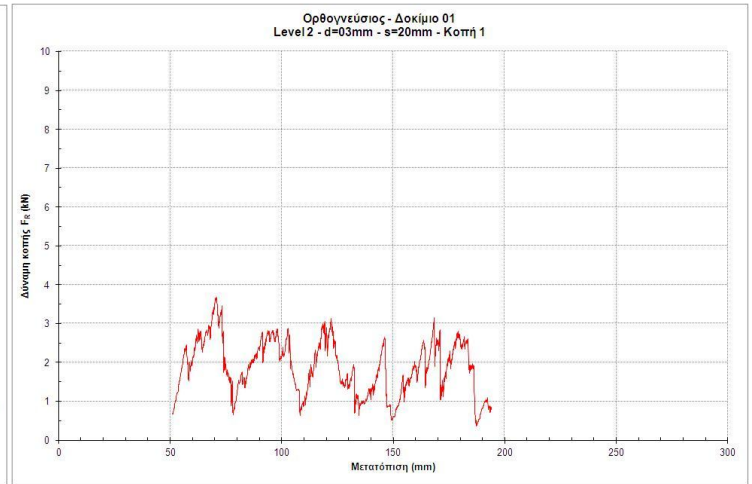
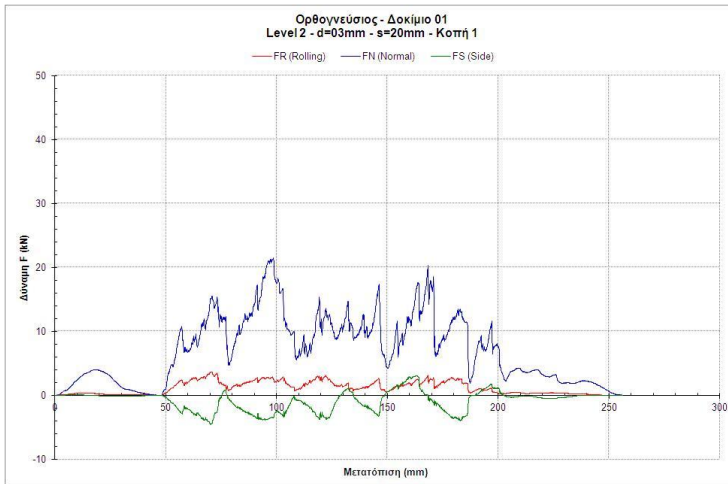
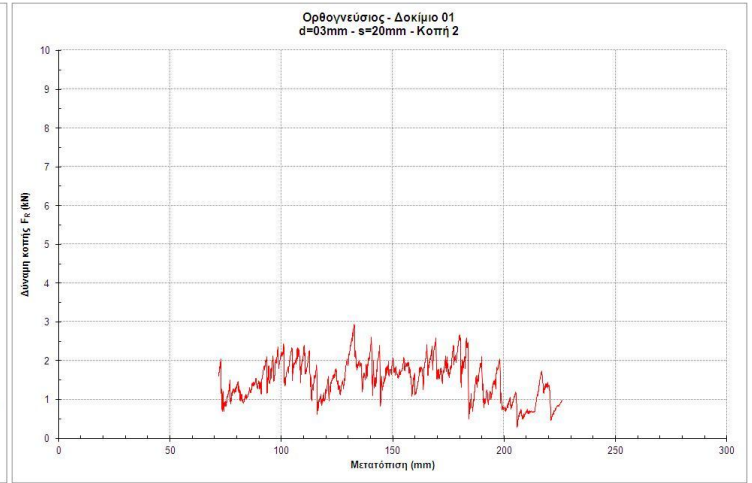
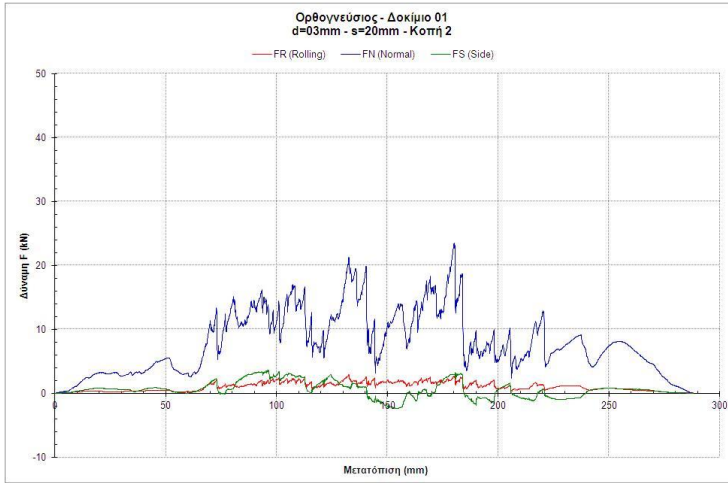
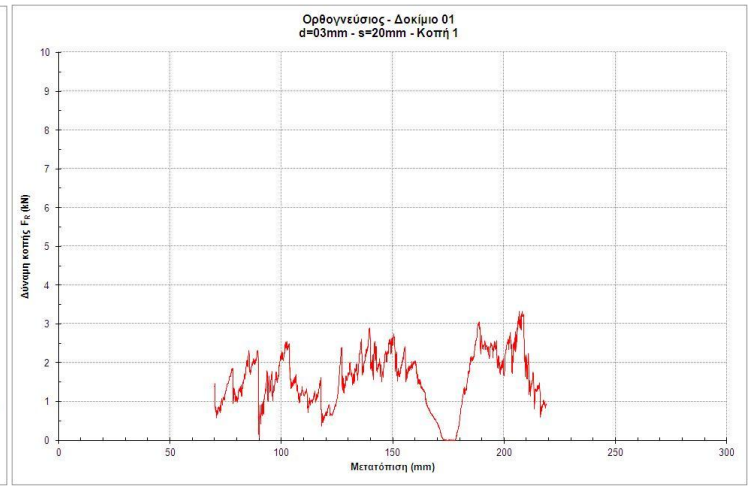
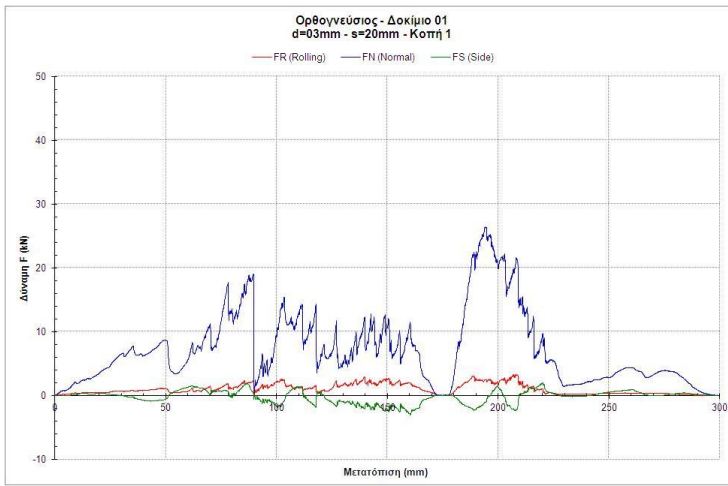


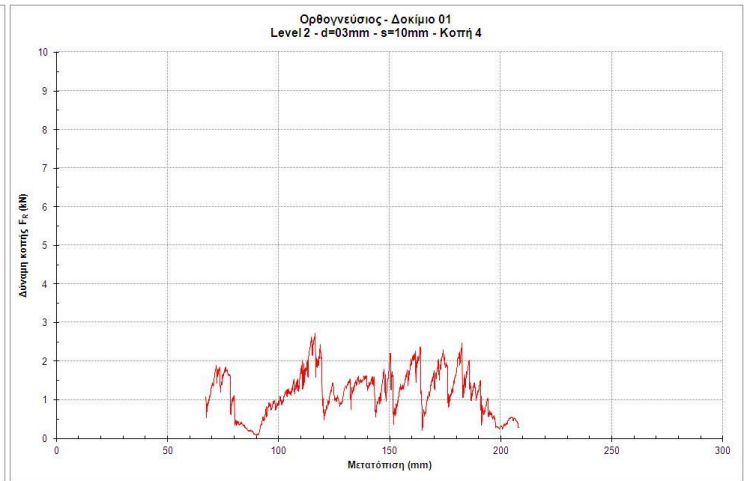
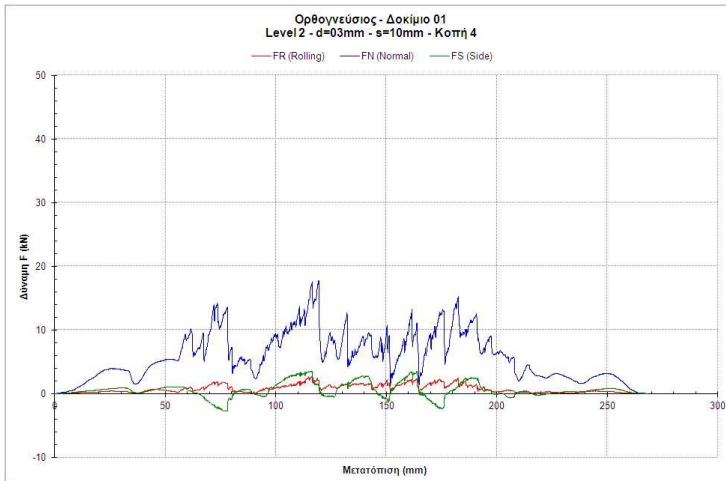
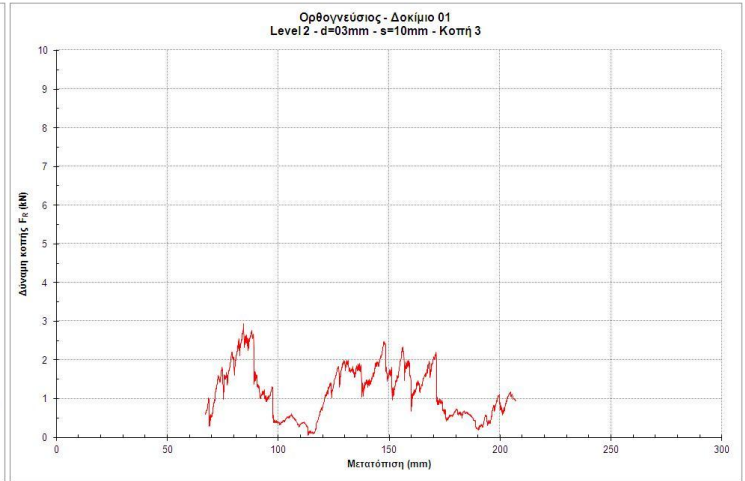
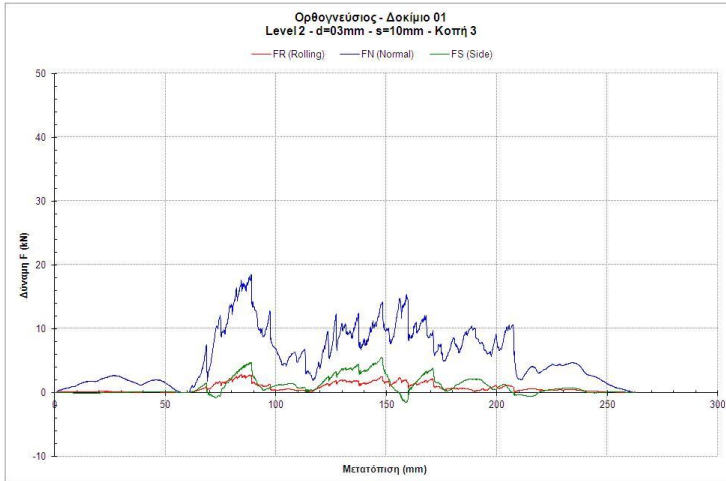
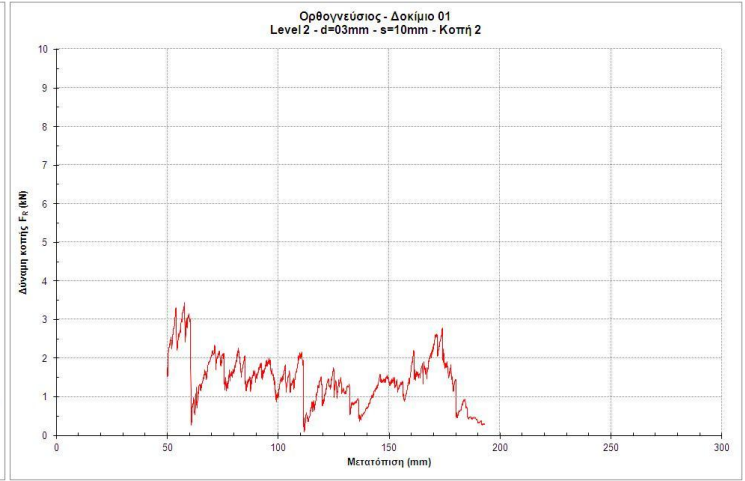
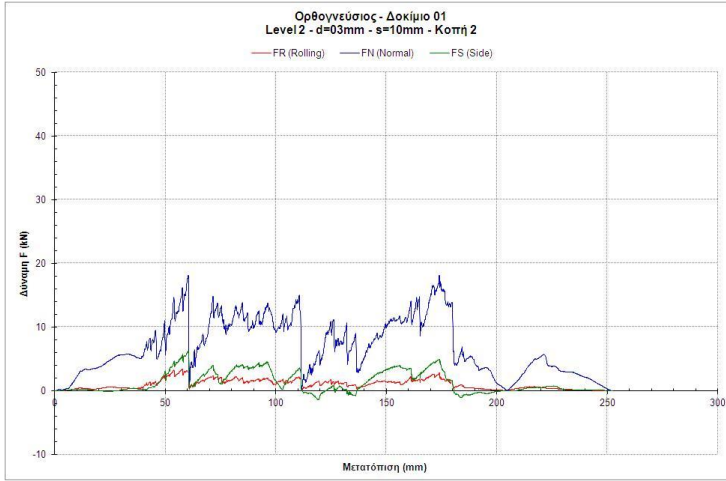
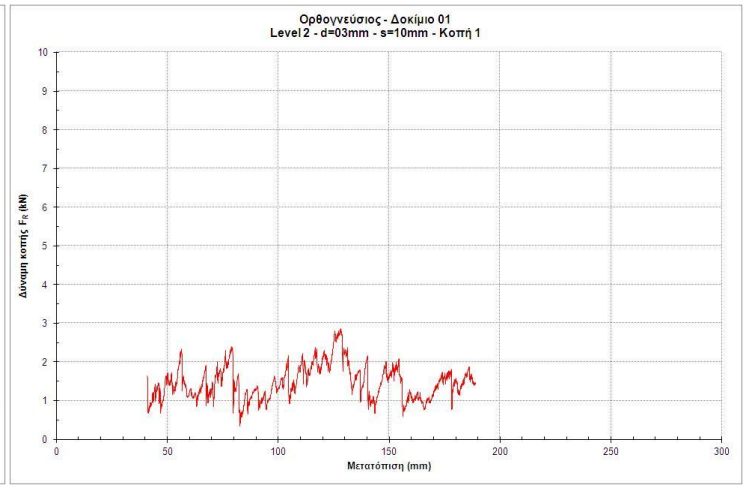
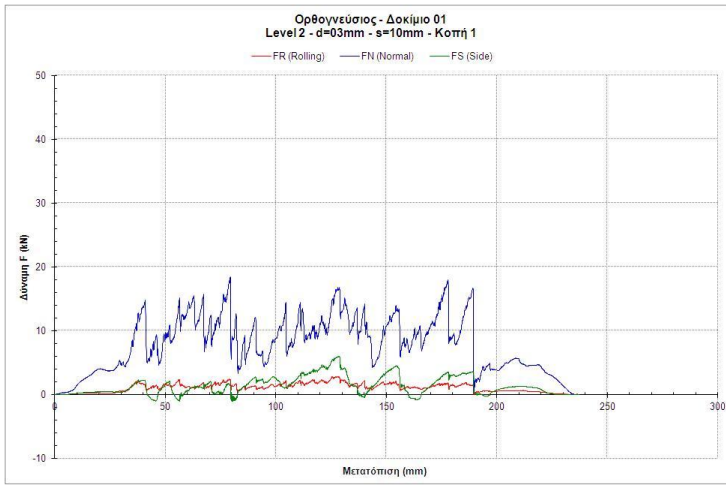


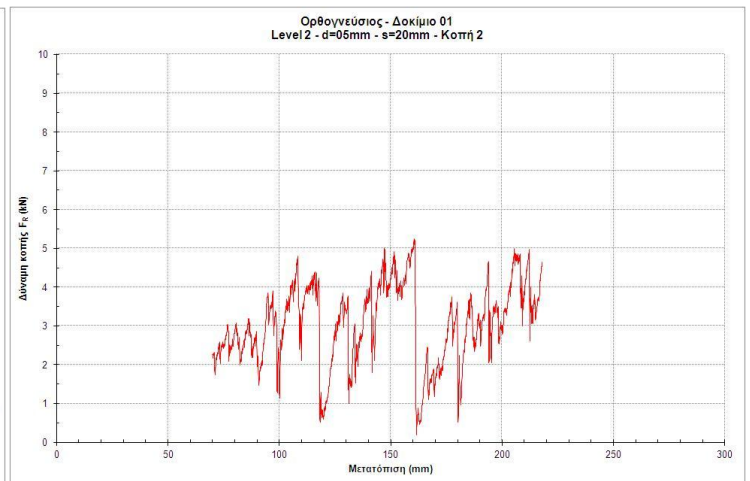
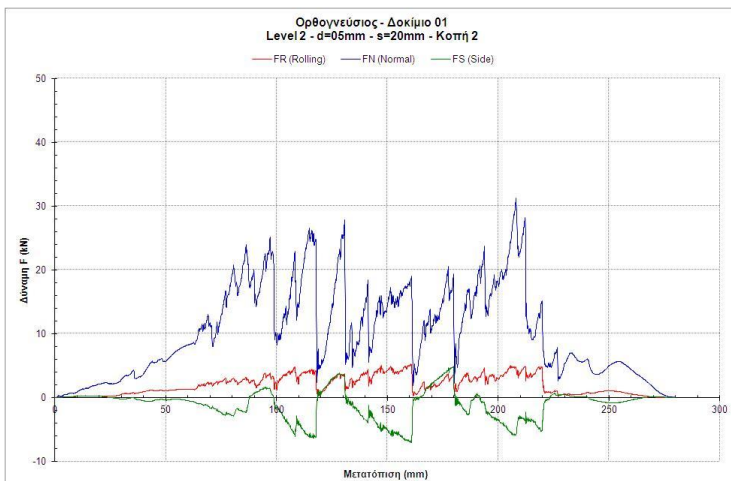
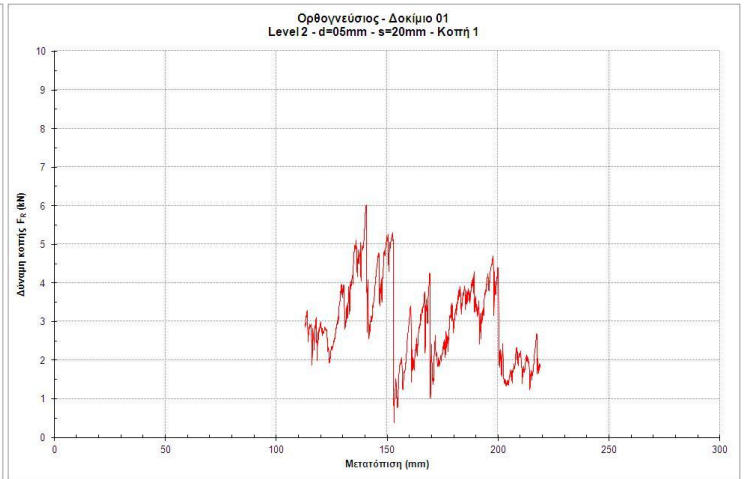
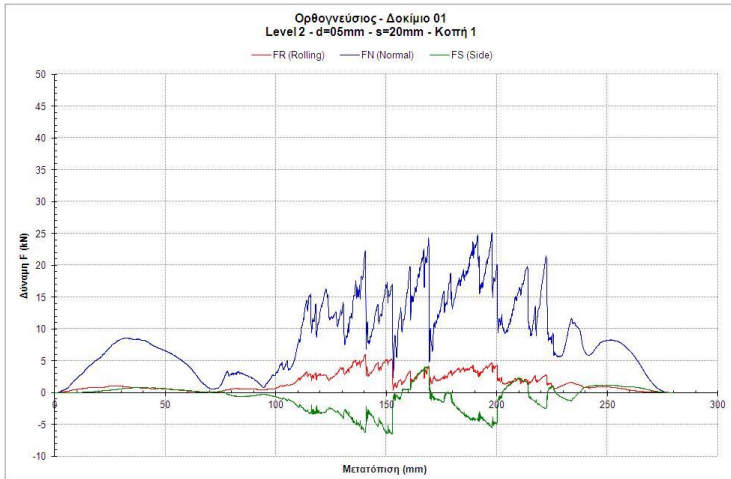
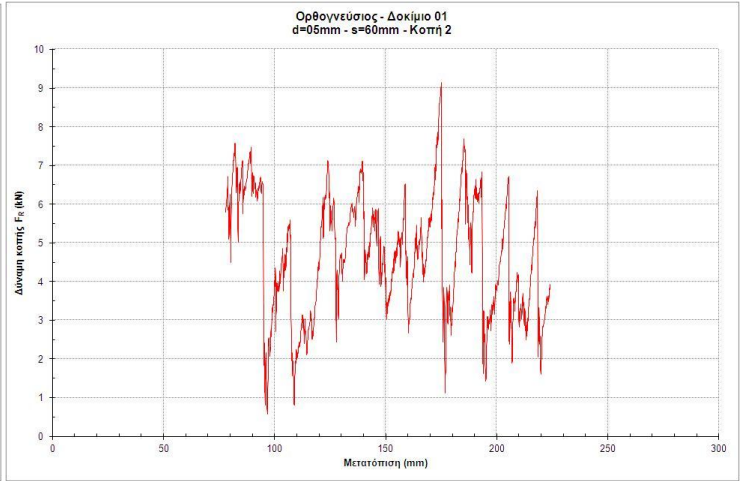
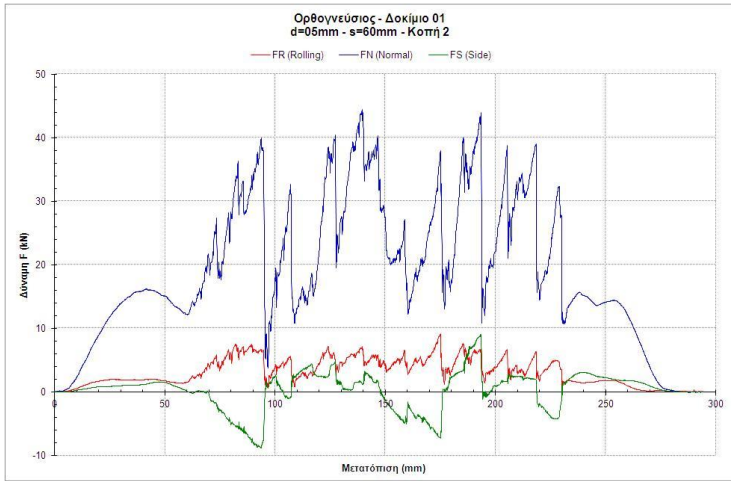
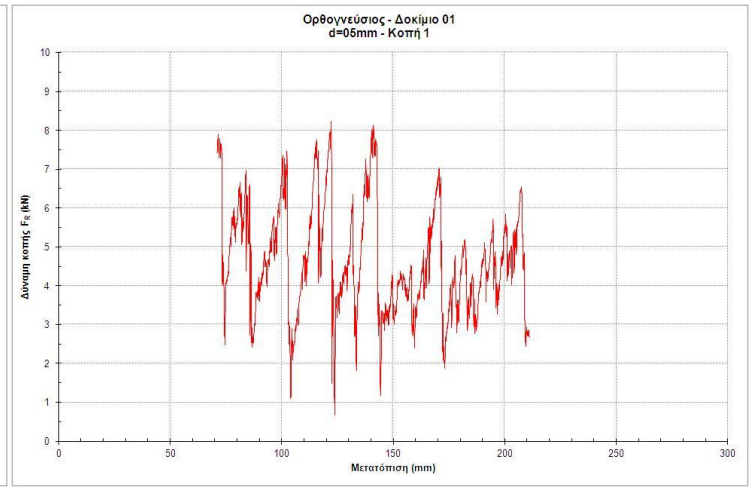
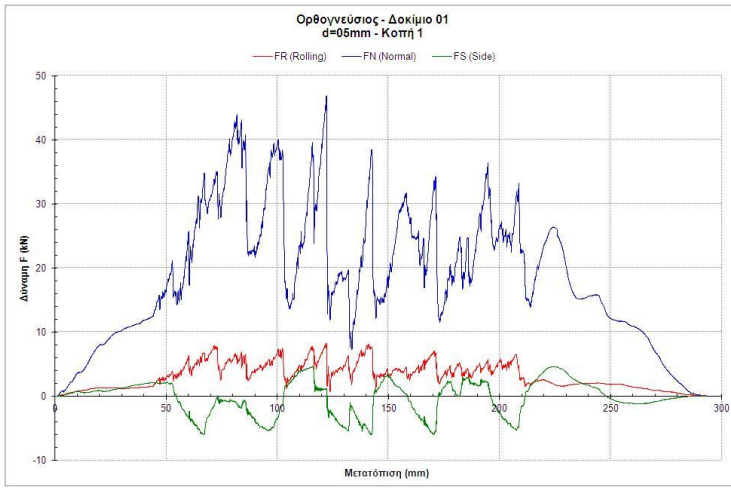


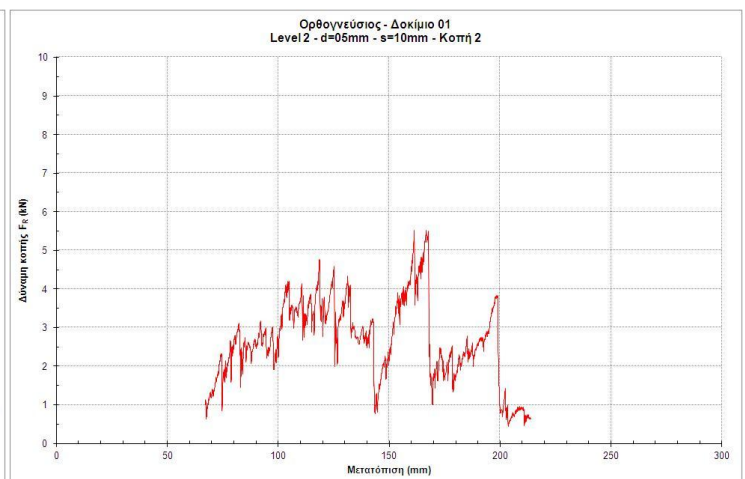
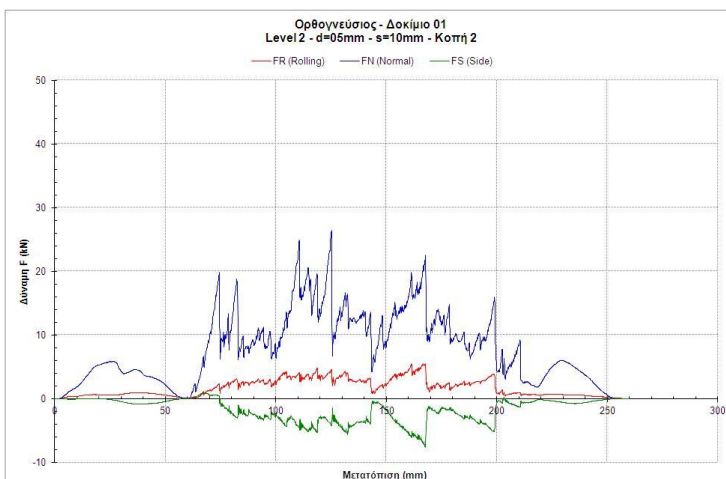
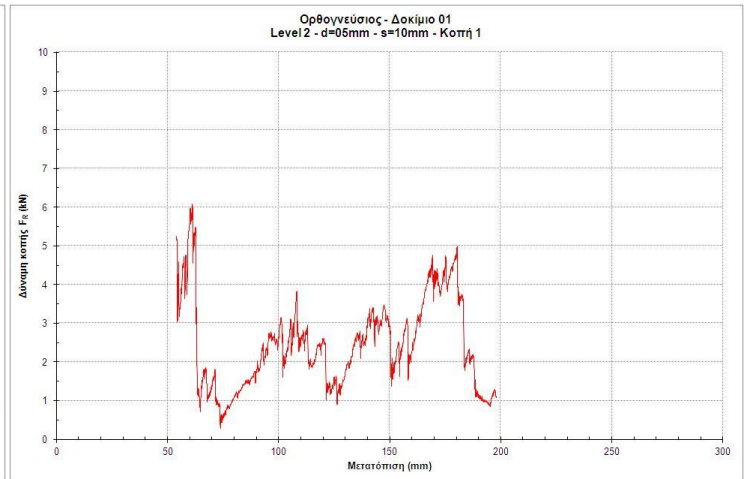
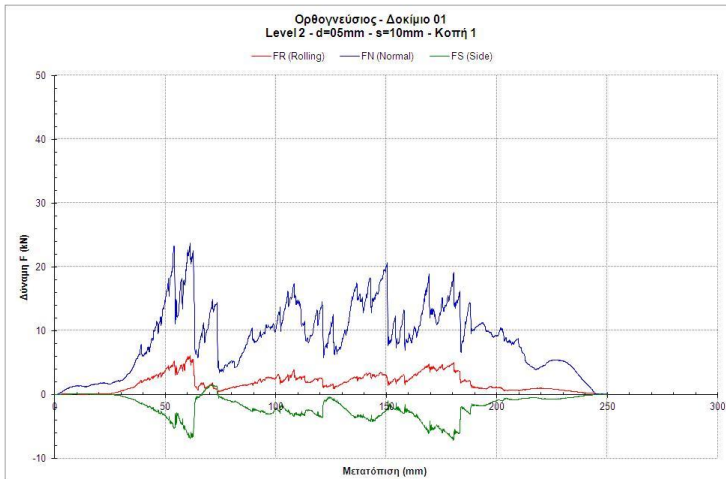
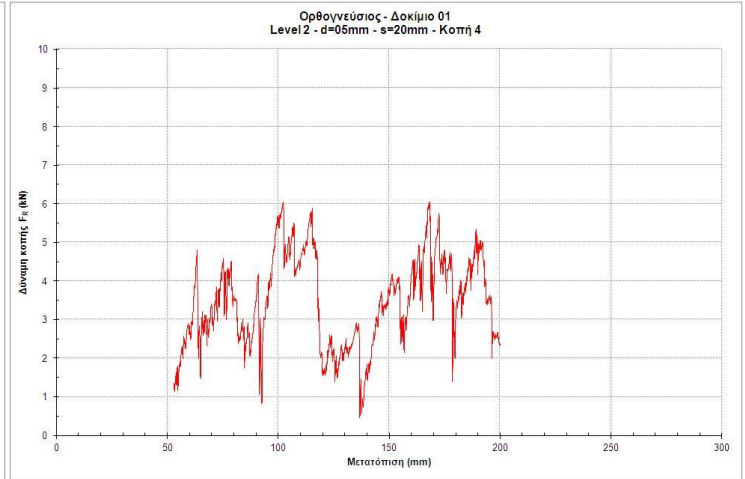
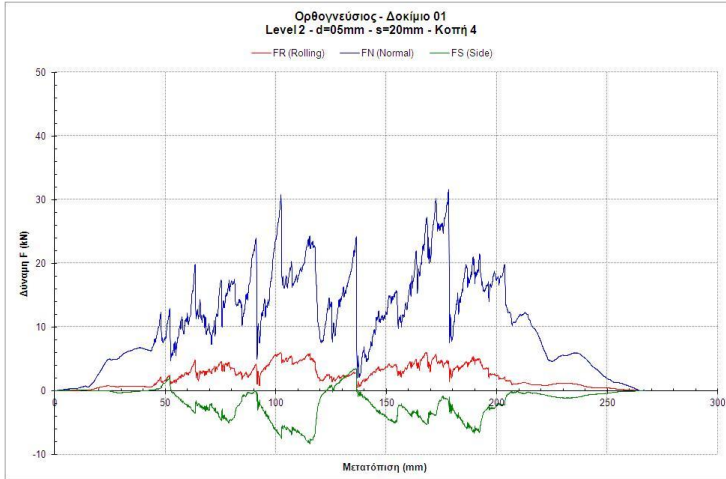
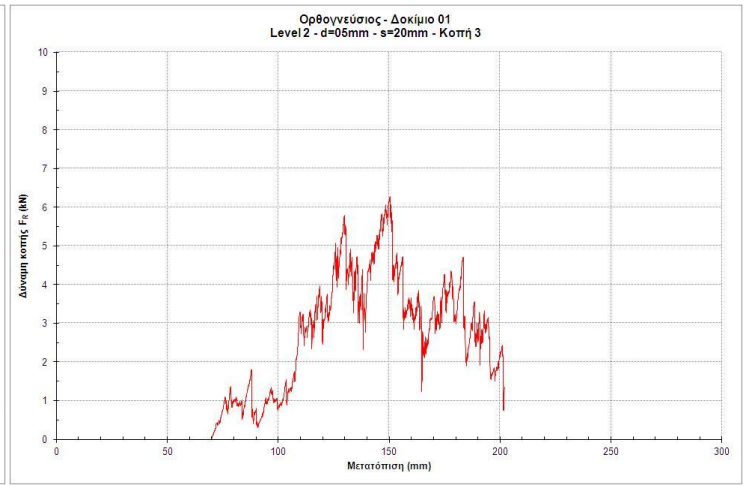
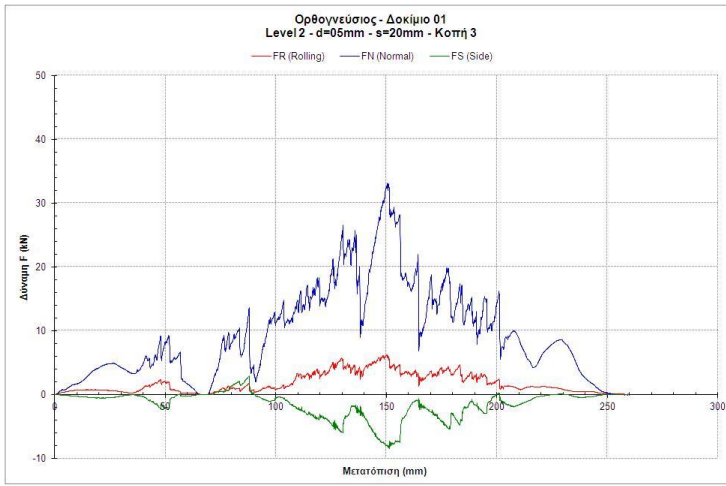




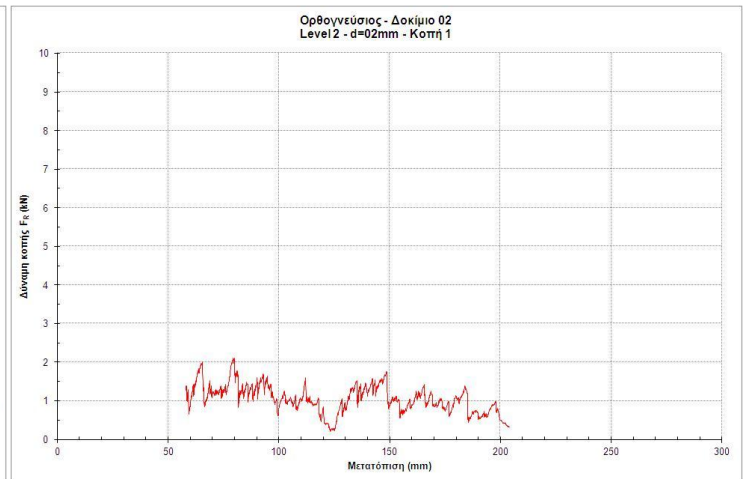
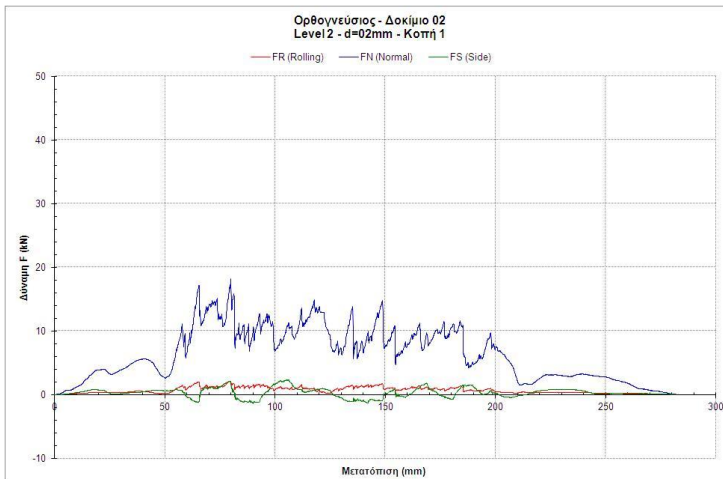
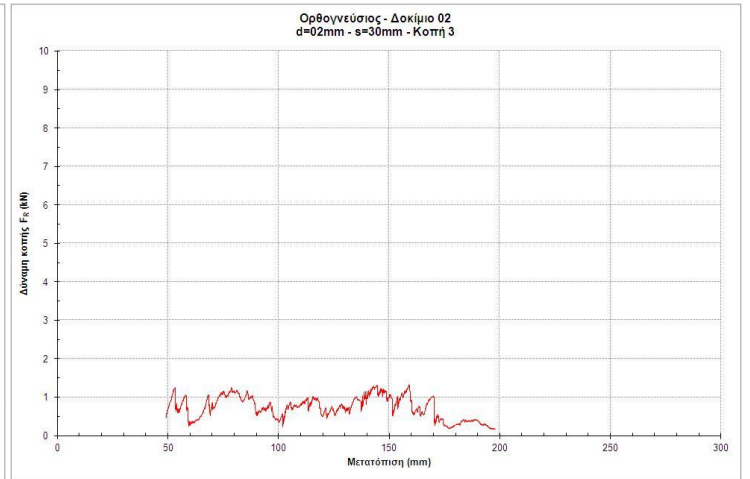
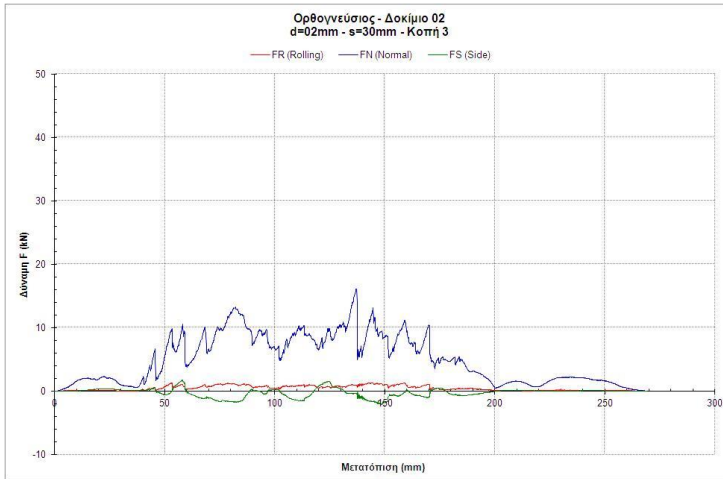
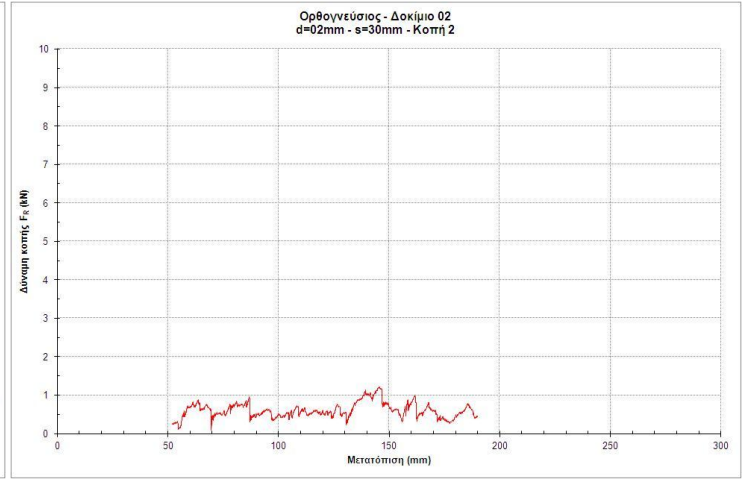
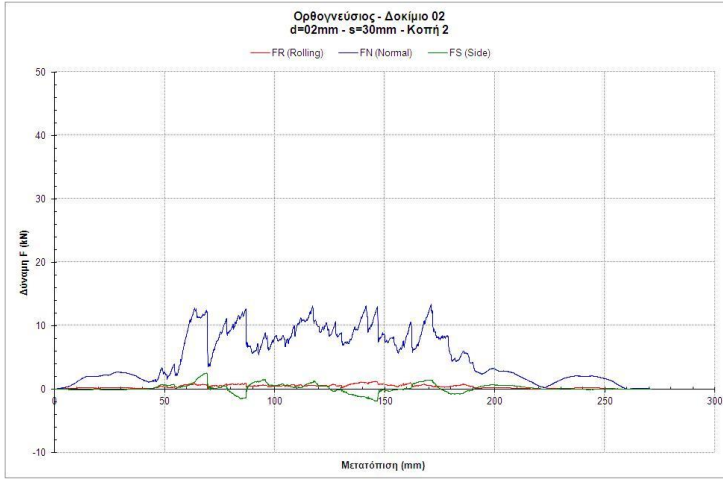
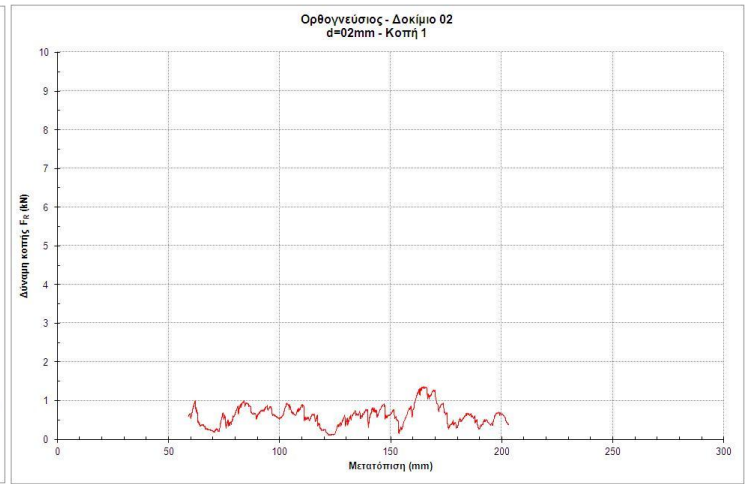
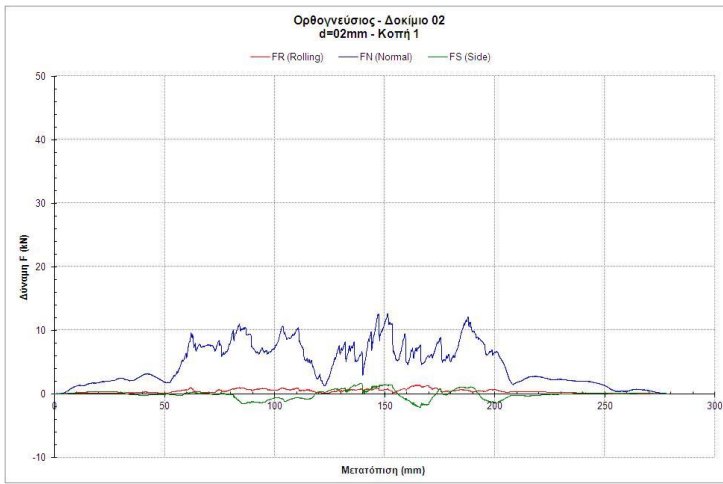


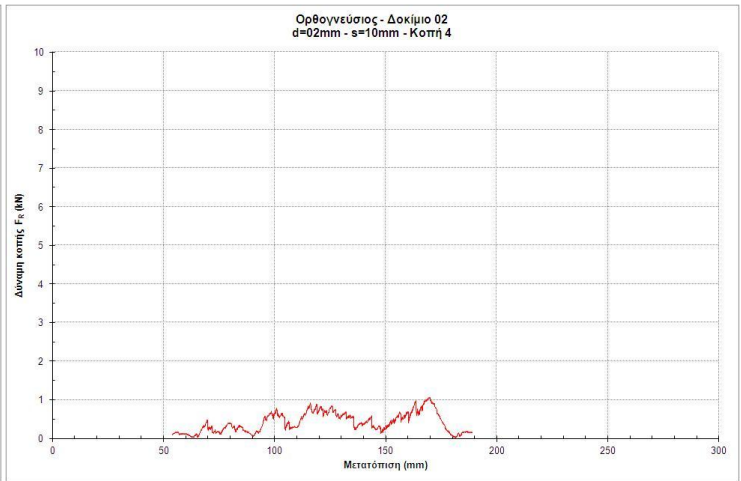
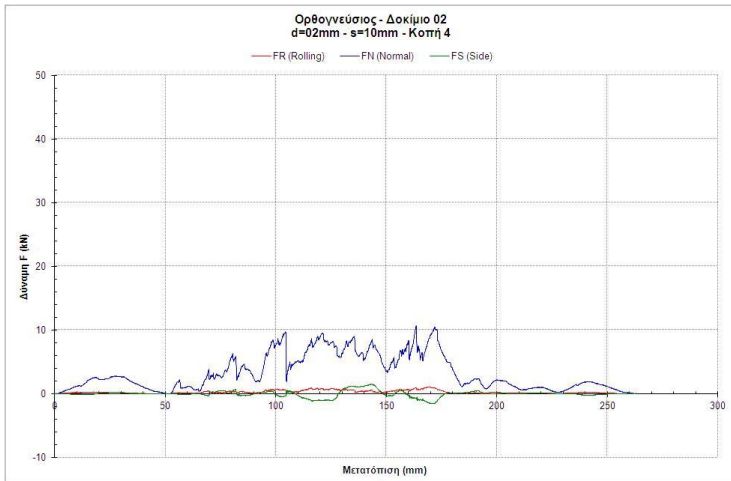
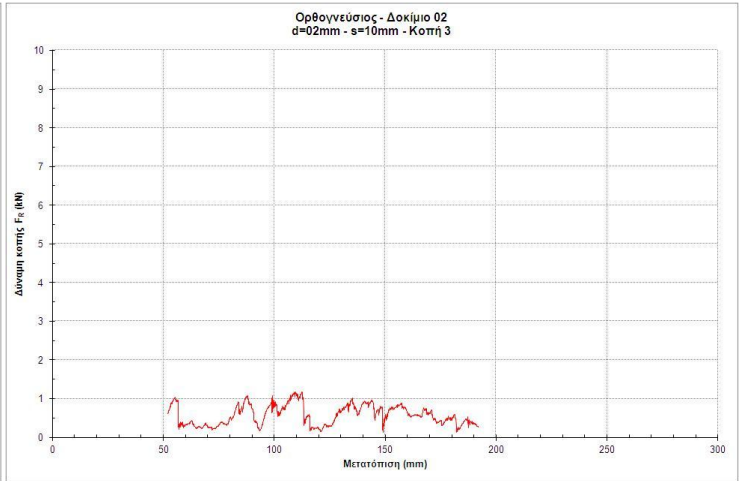
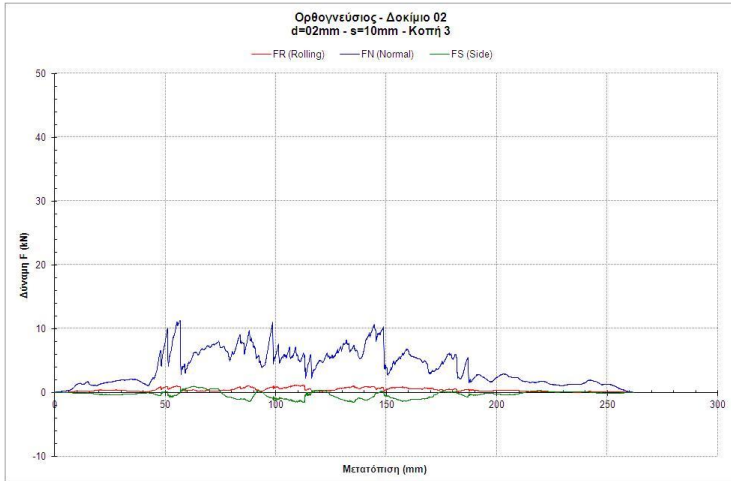
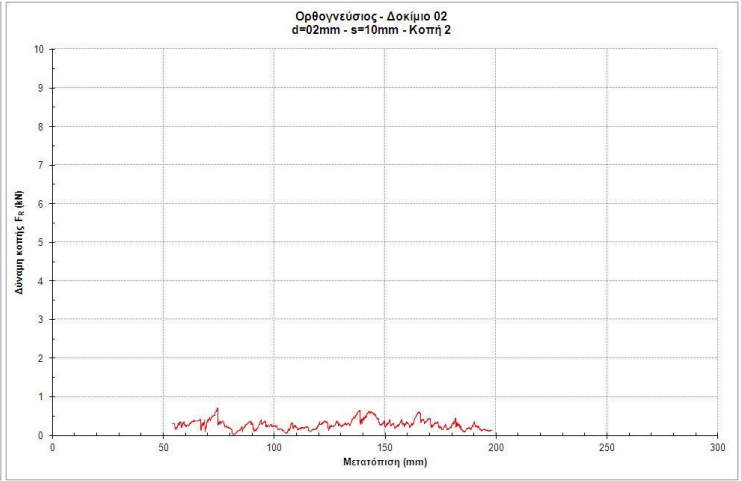
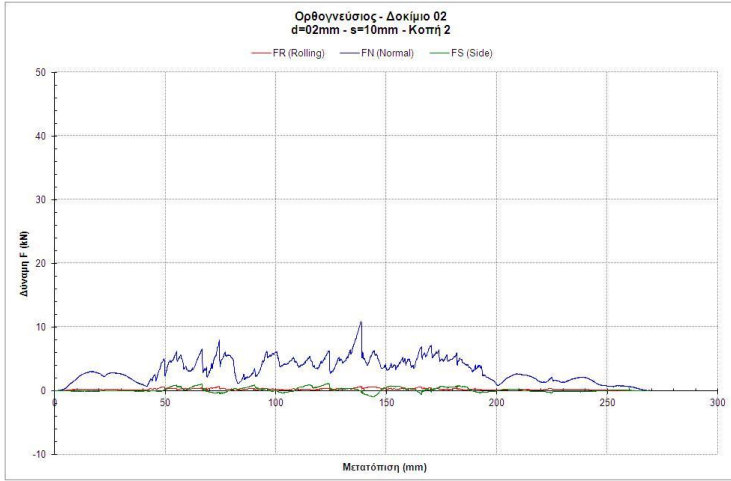
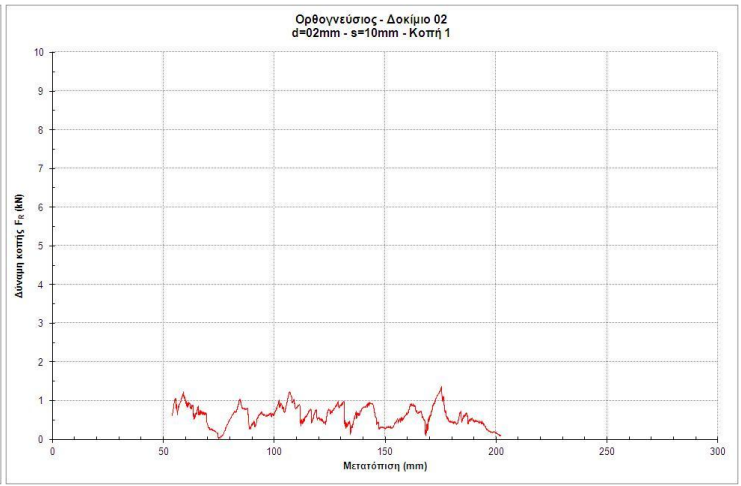
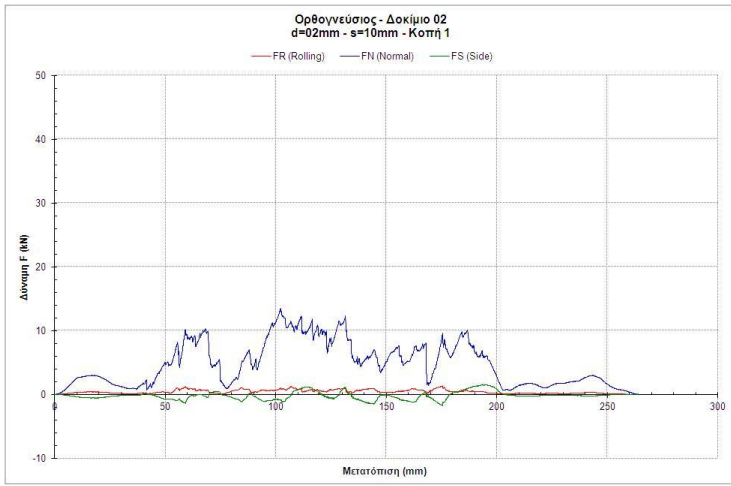


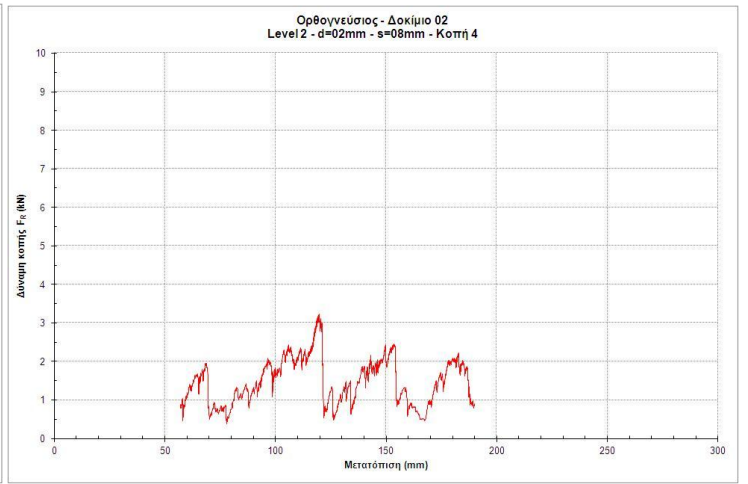
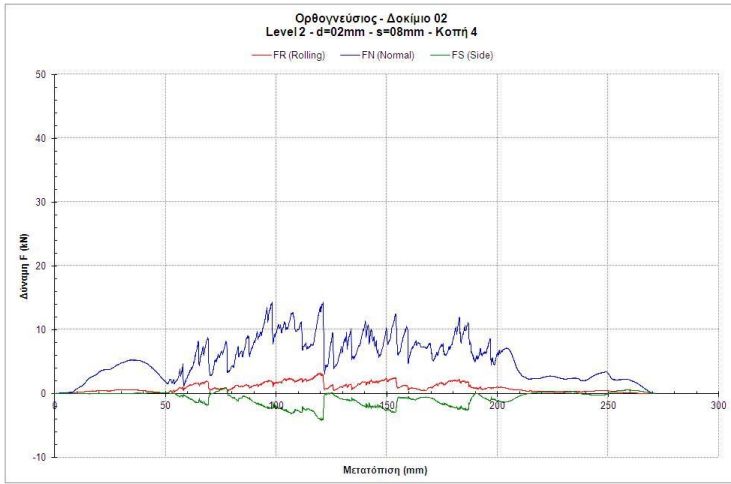
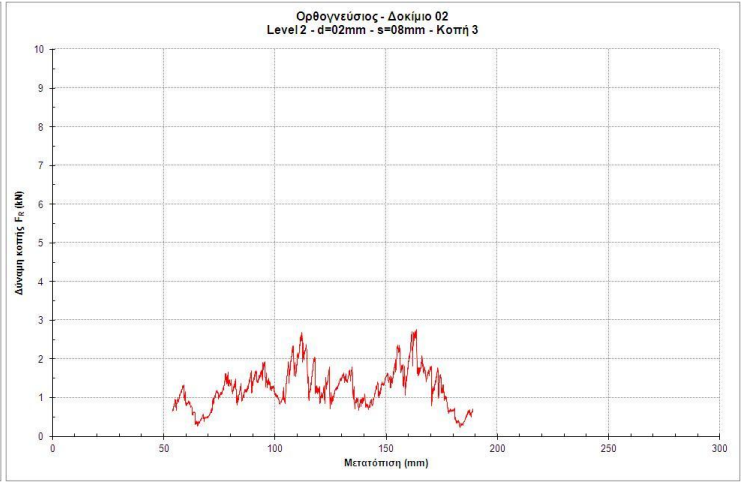
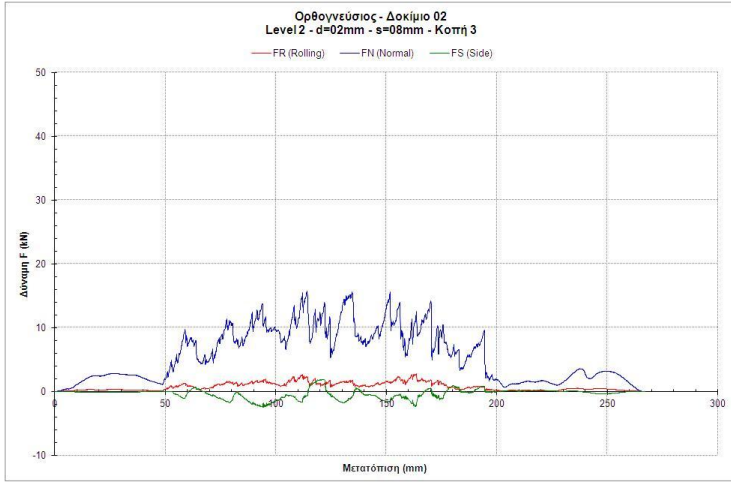
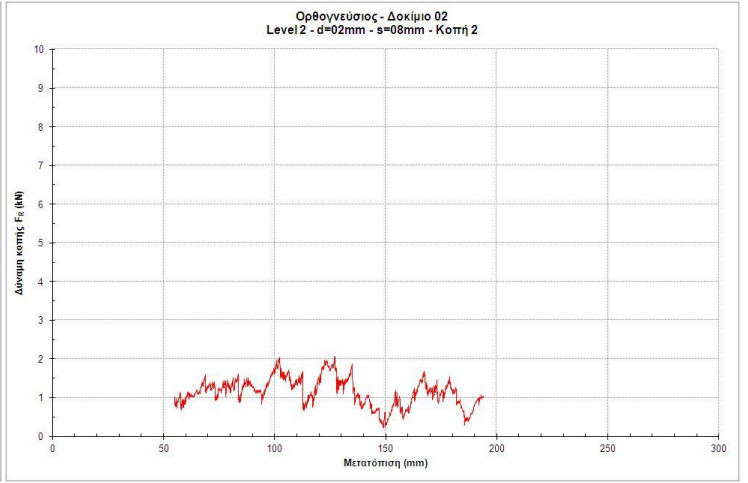
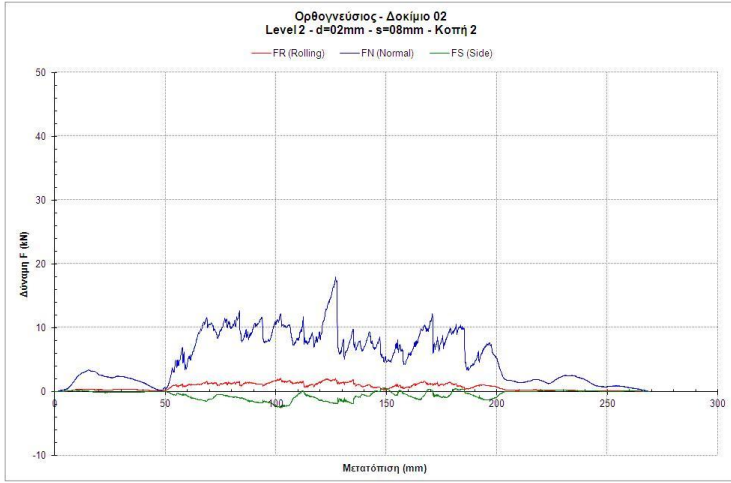
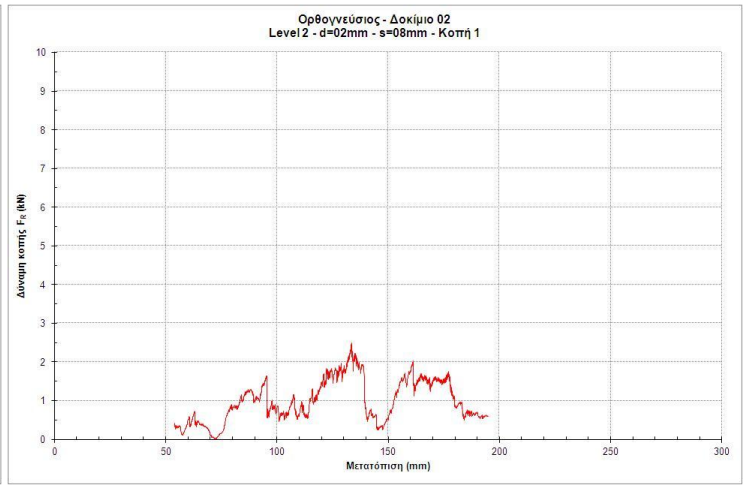
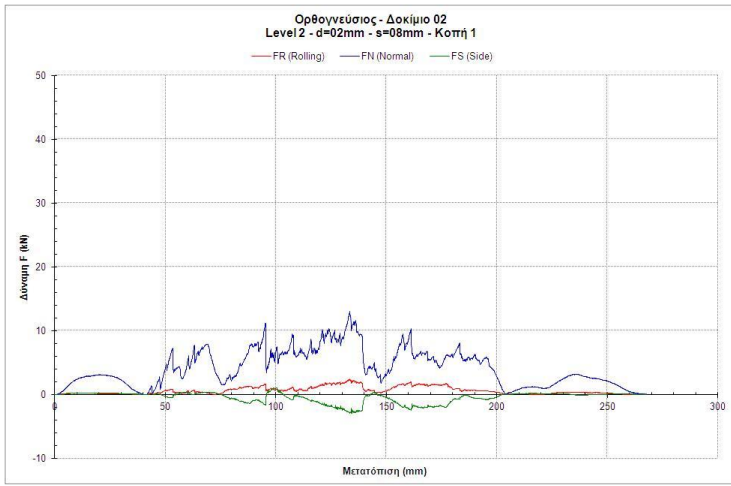


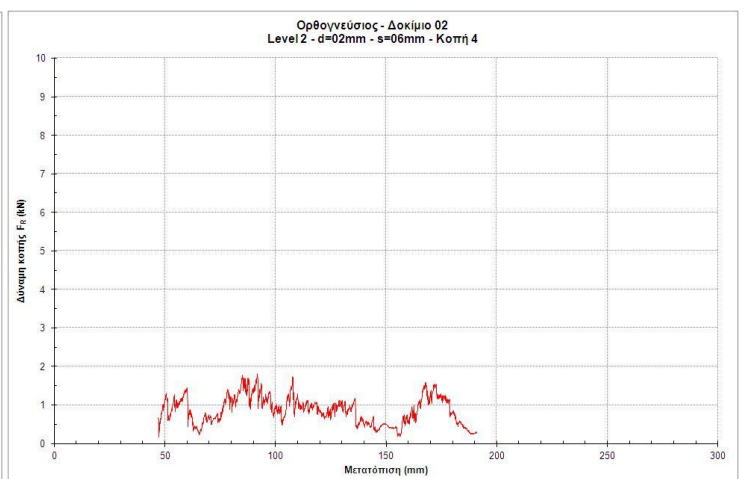
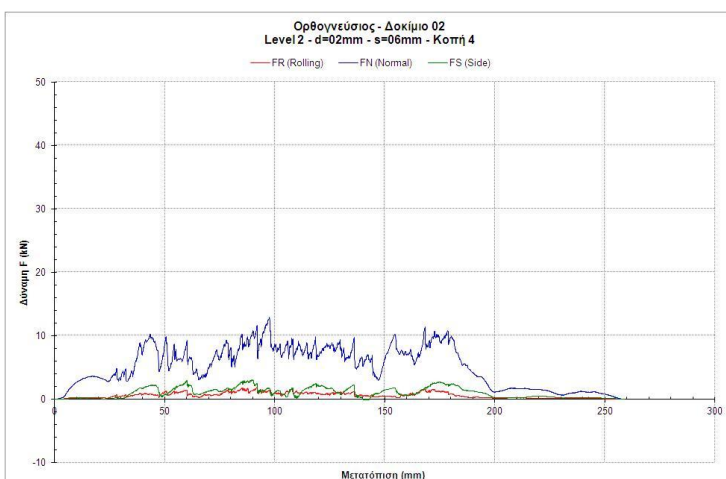
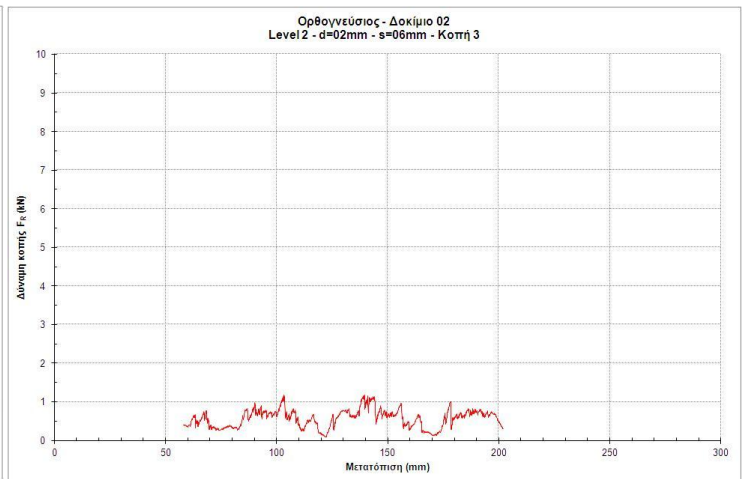
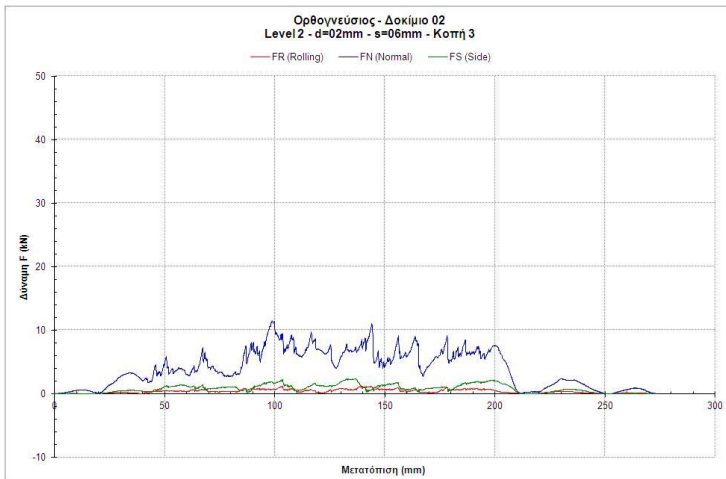
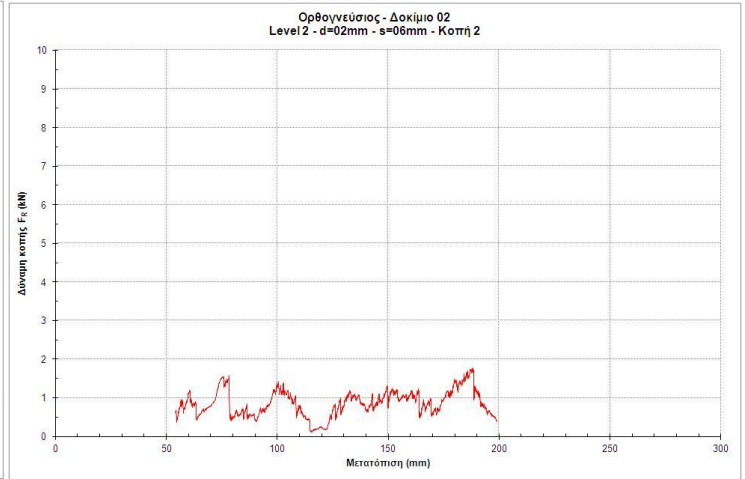
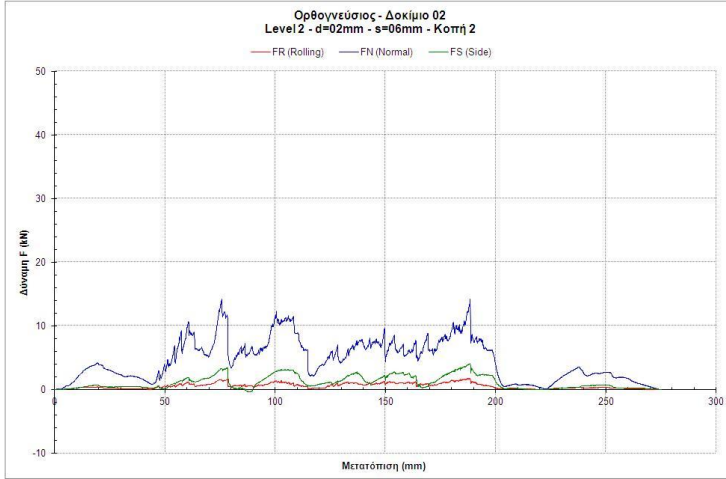
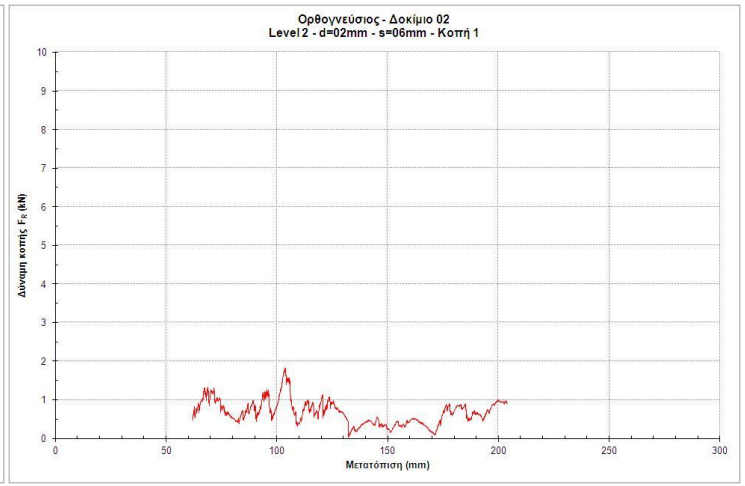
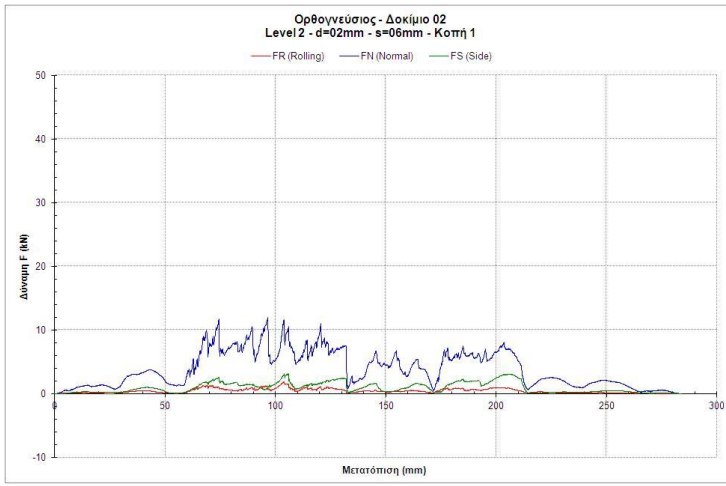


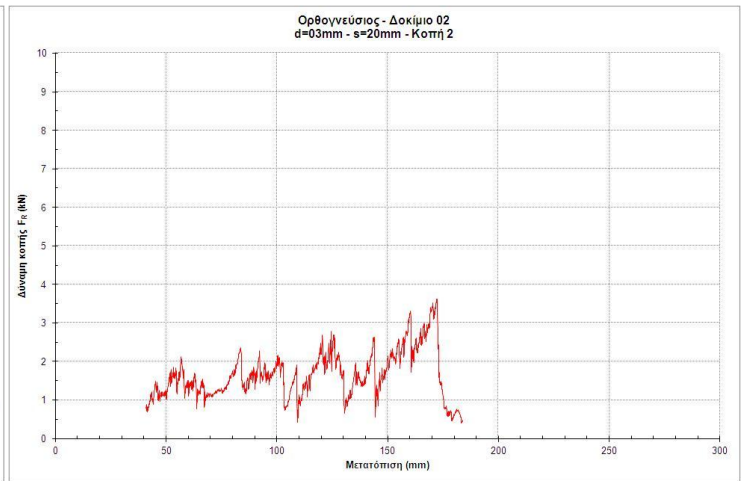
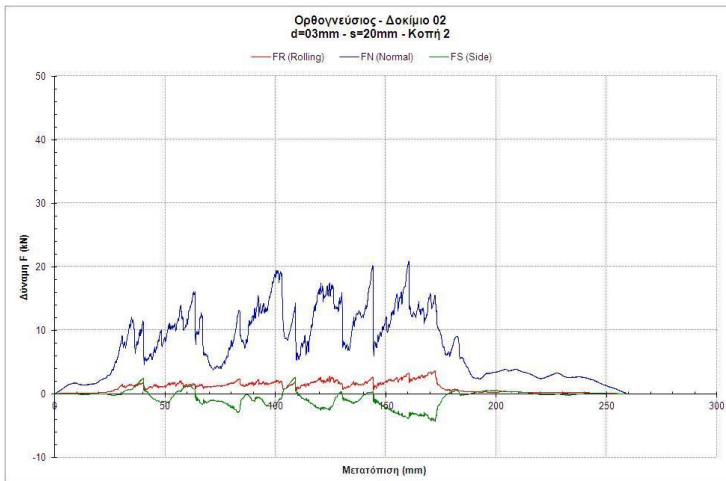
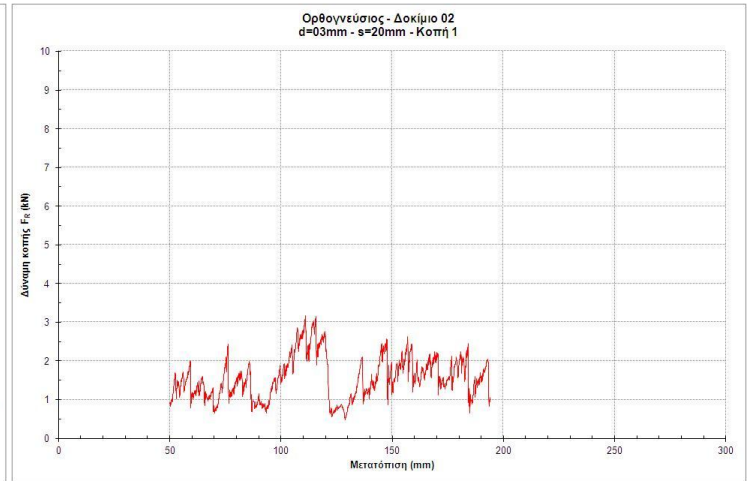
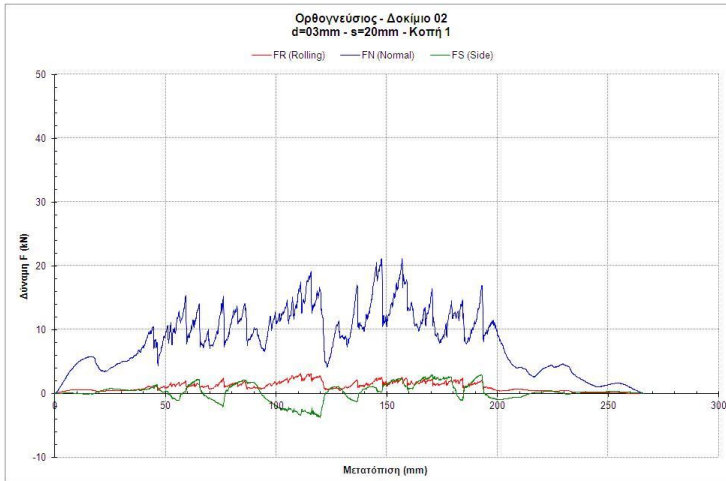
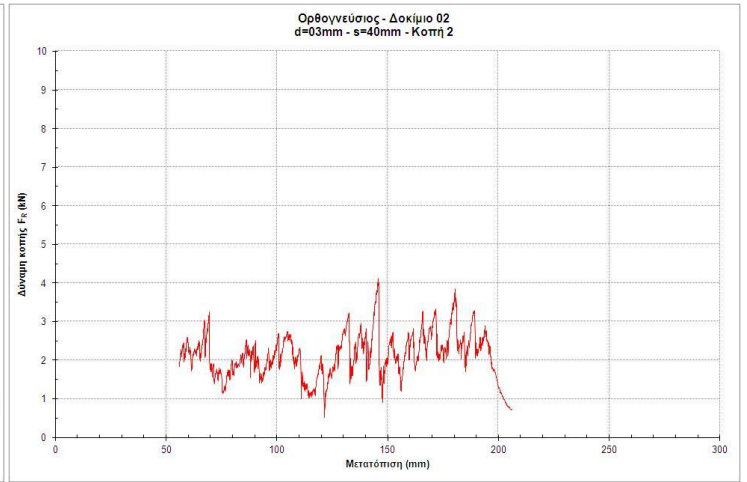
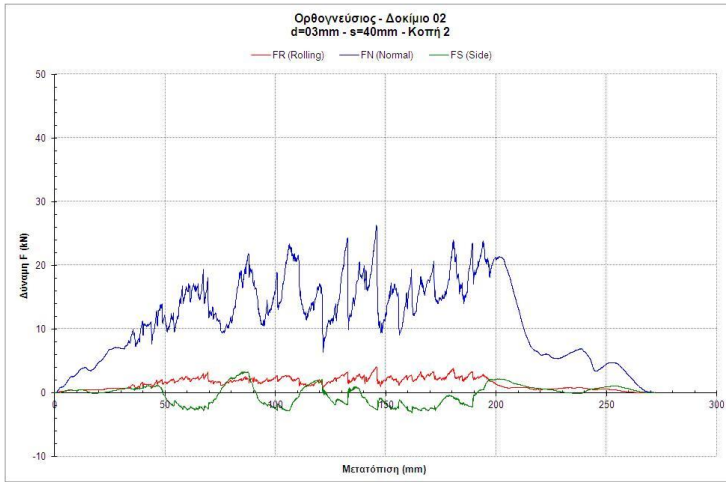
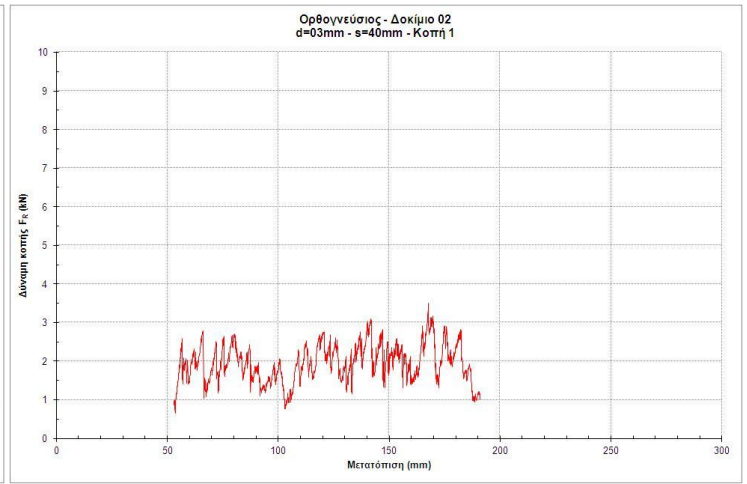
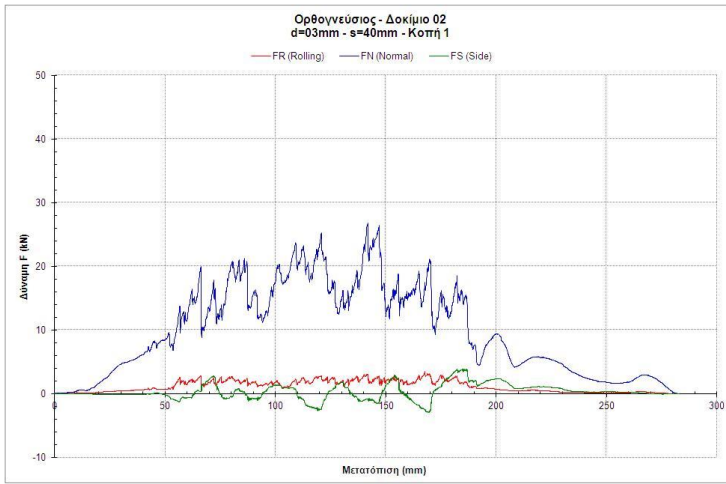
**β) Διαγράμματα δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό τύπου δίσκου
Ορθογνεύσιου Ικαρίας Α
Δοκίμιο 02 (\perp)**

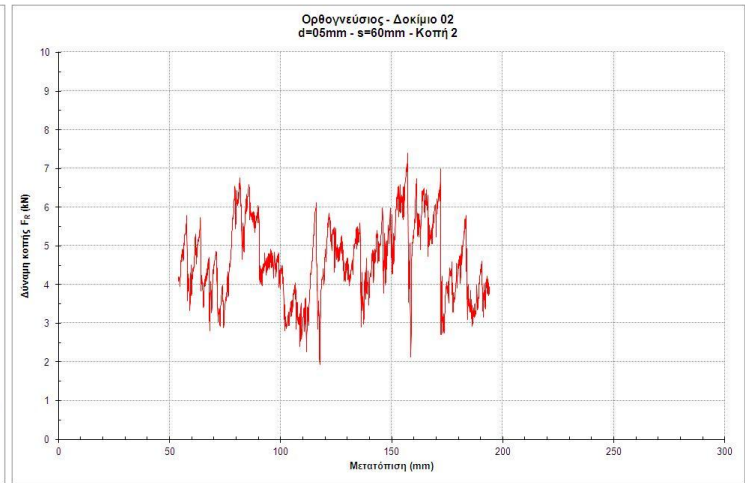
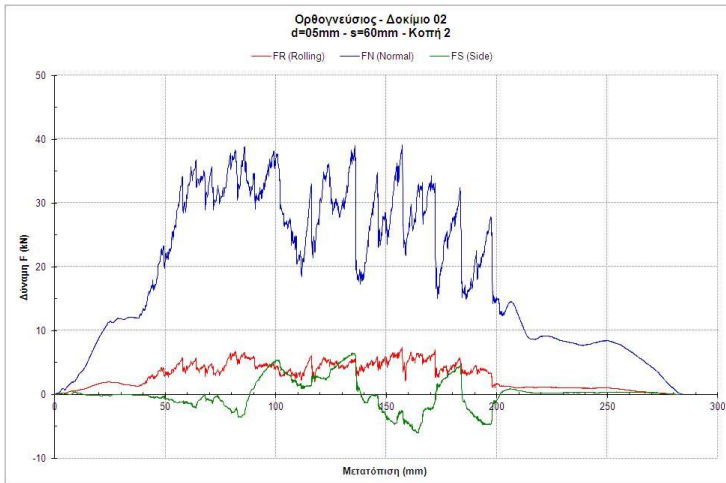
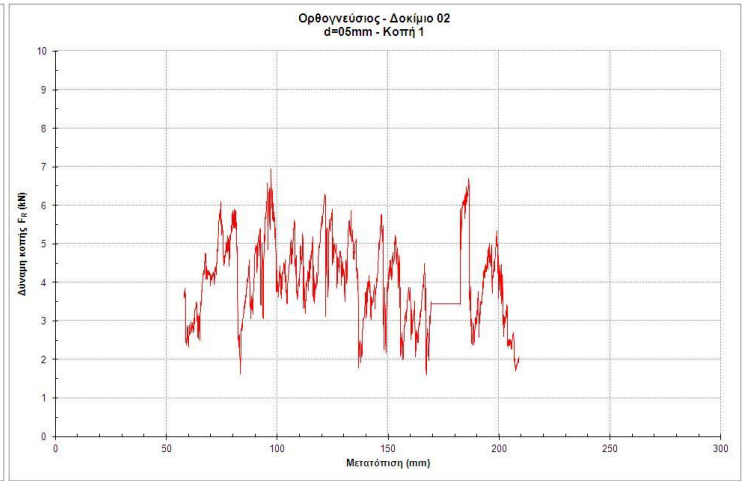
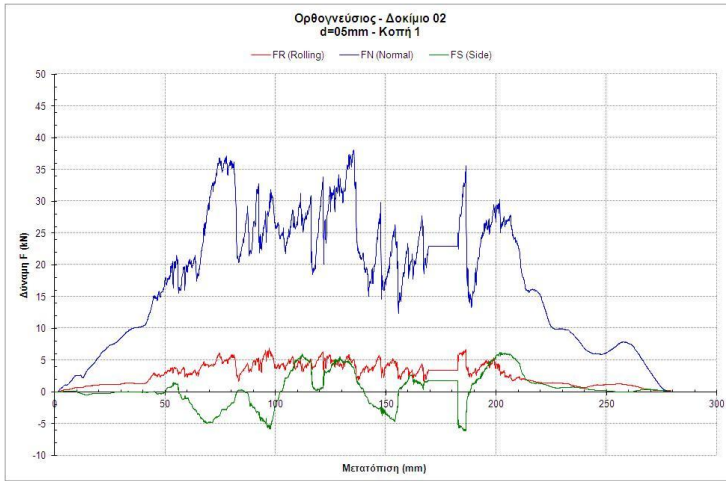
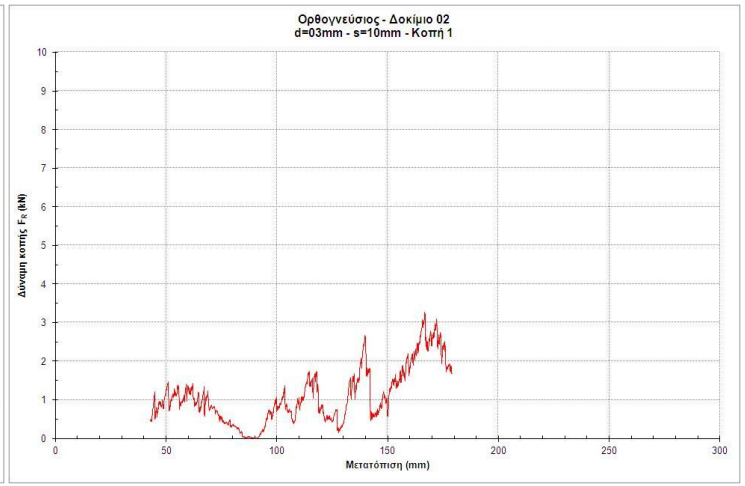
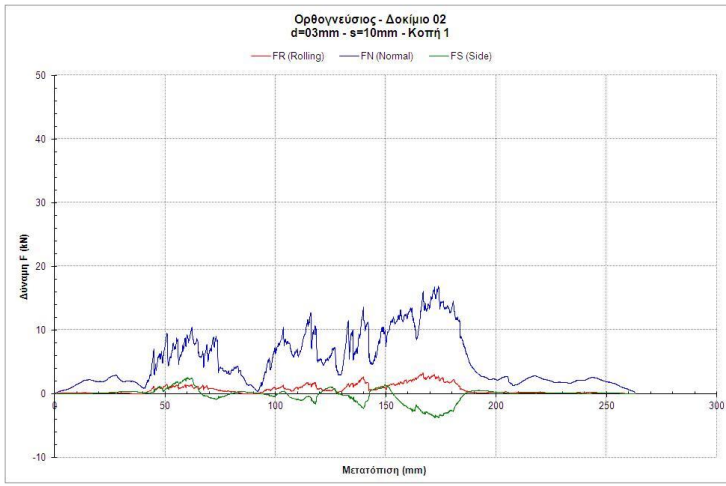


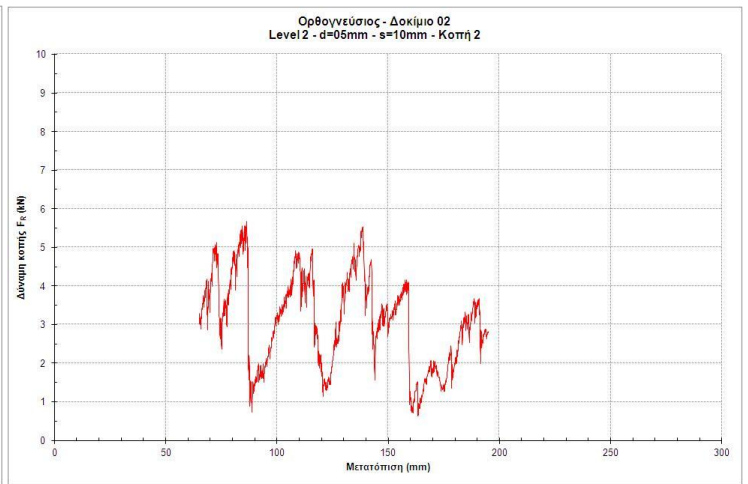
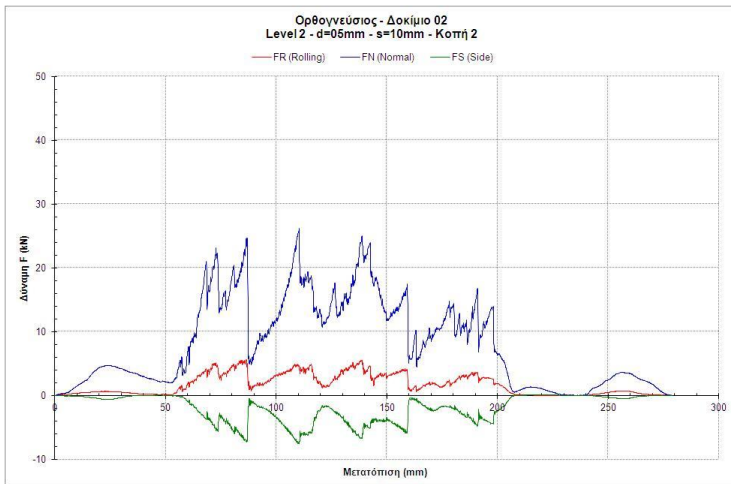
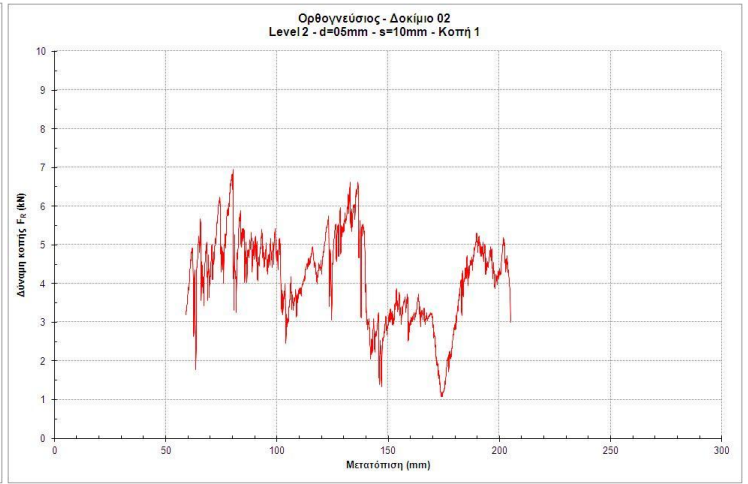
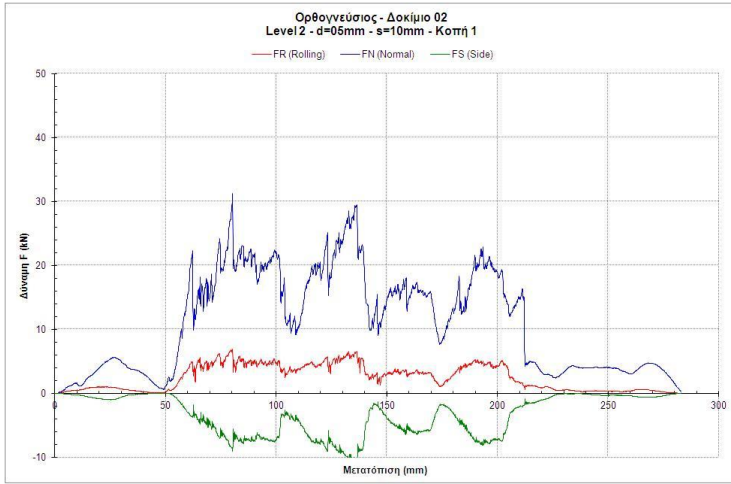
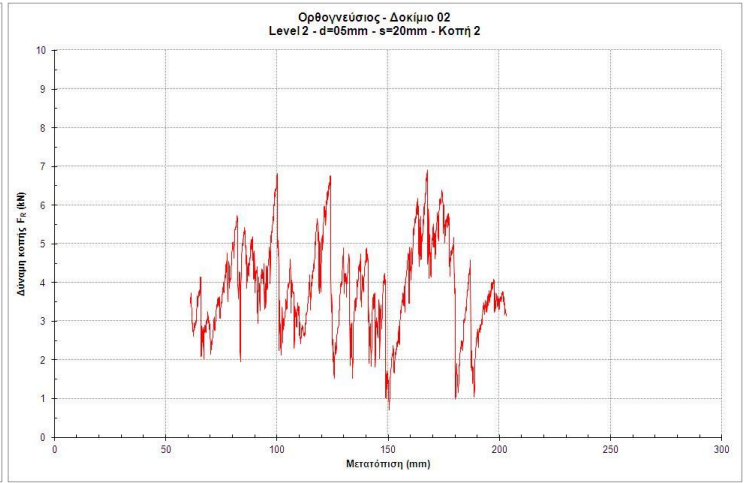
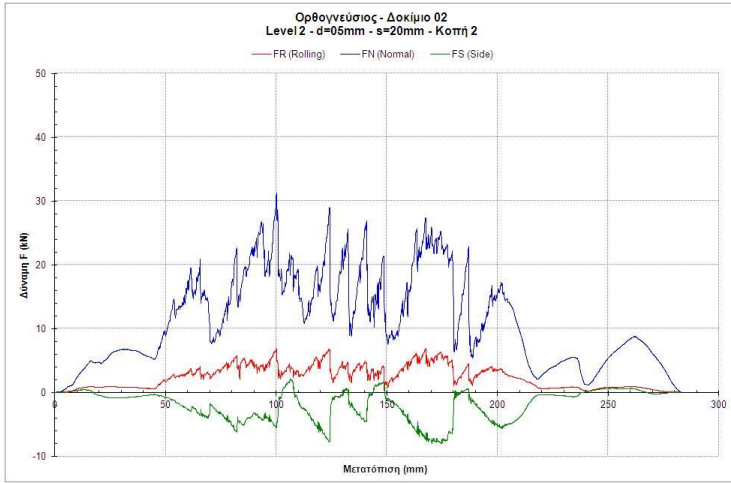
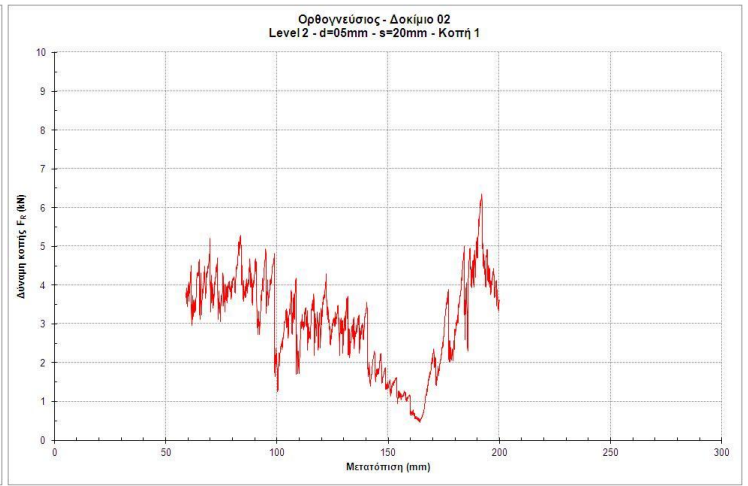
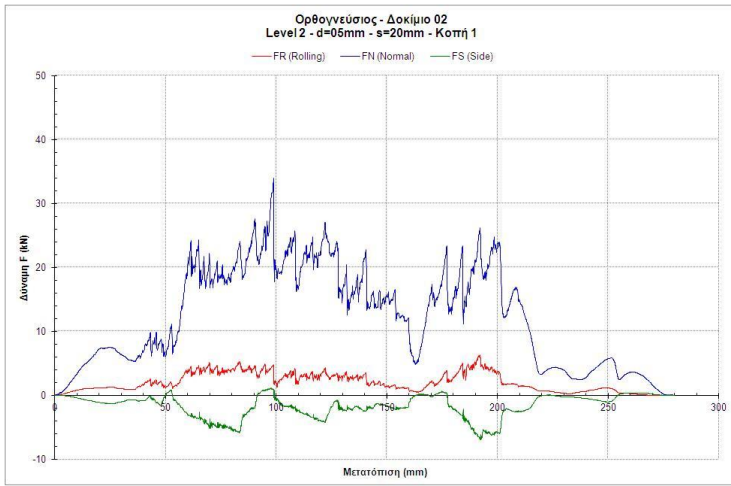






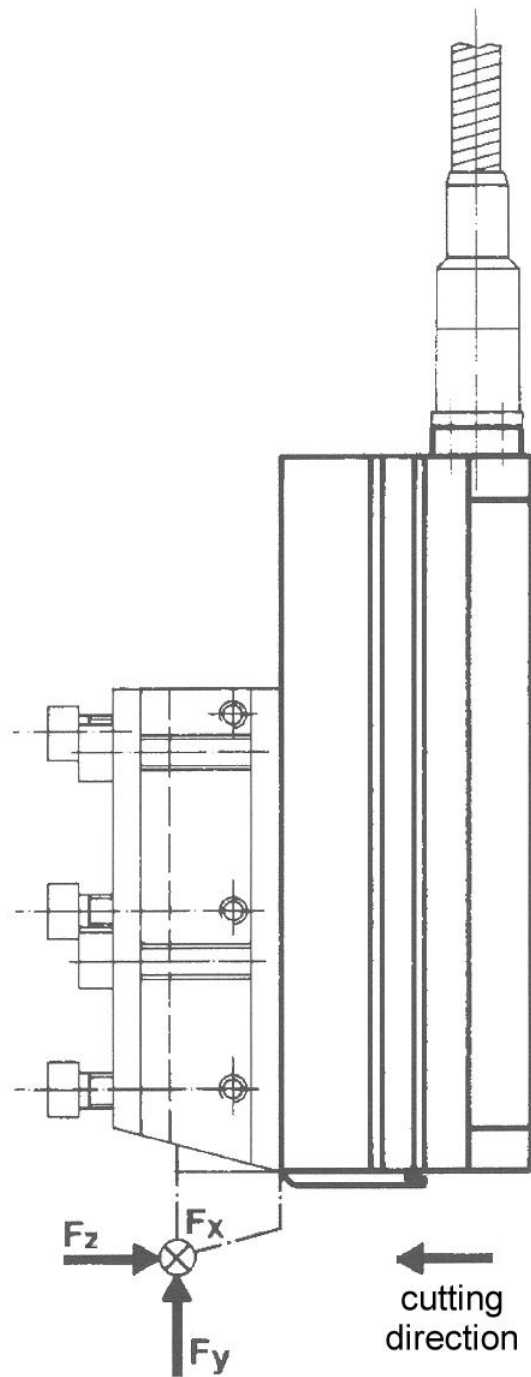






ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

**Διαγράμματα δυνάμεων κατά την κοπή με κοπτικό συρόμενου τύπου
και φωτογραφίες των δοκιμίων μετά την εκτέλεση της δοκιμής.**



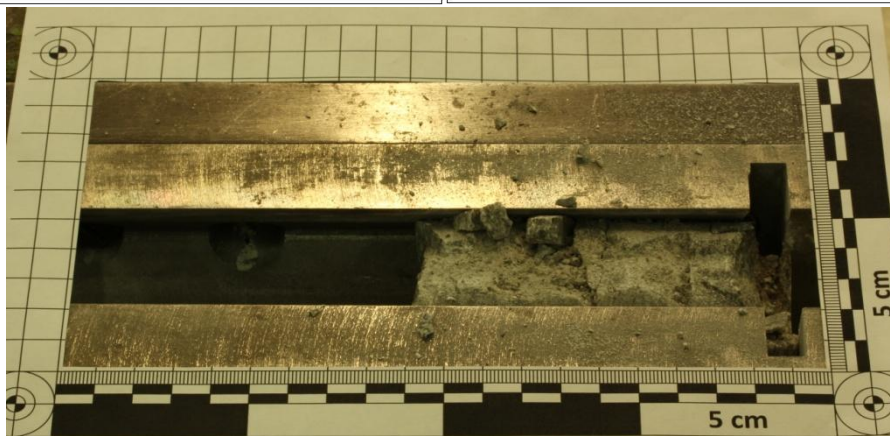
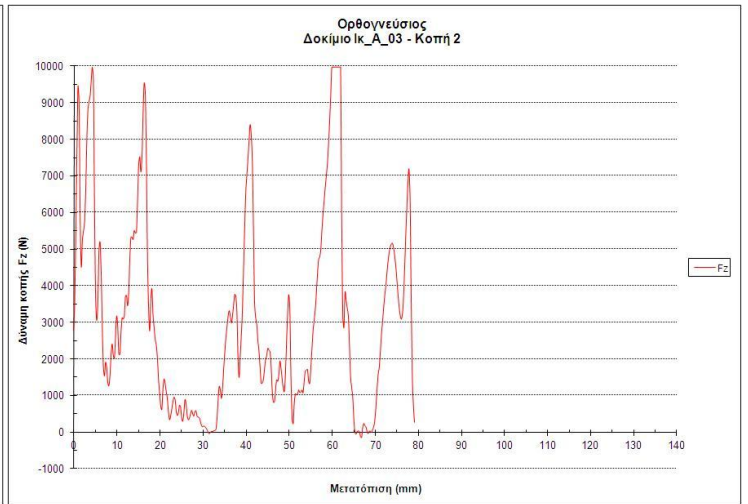
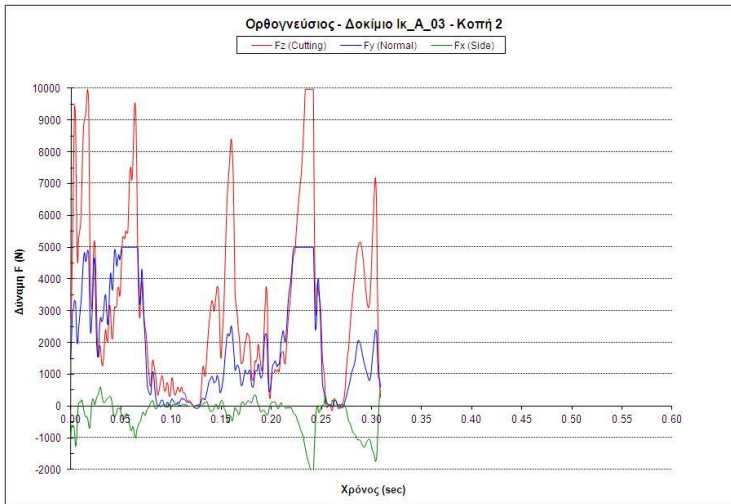
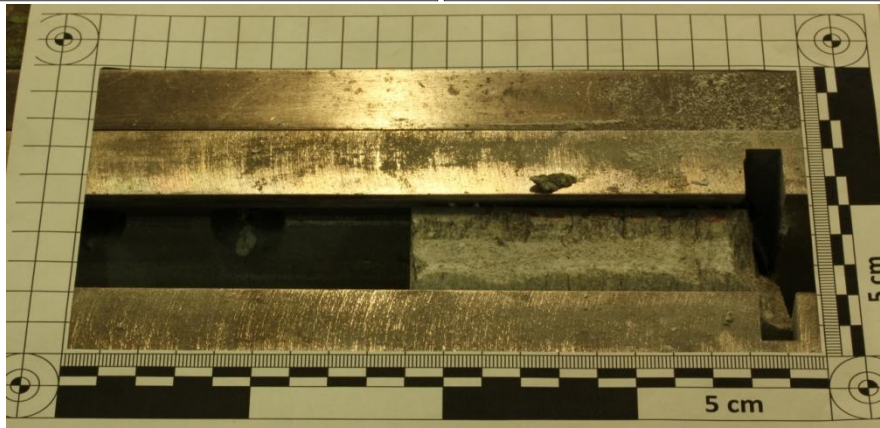
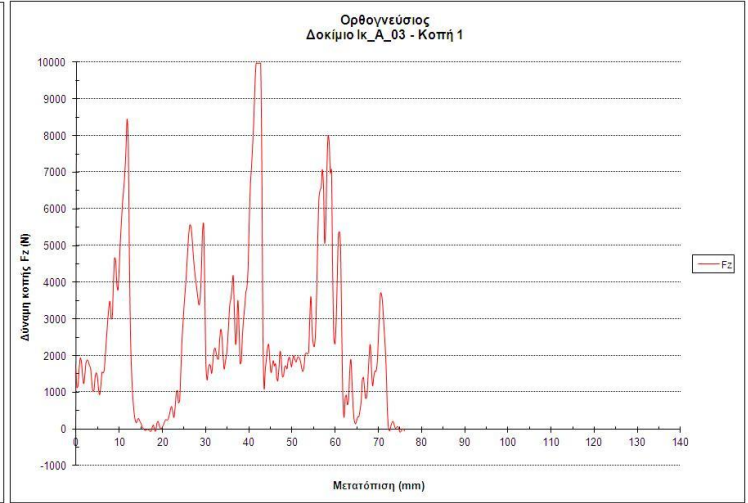
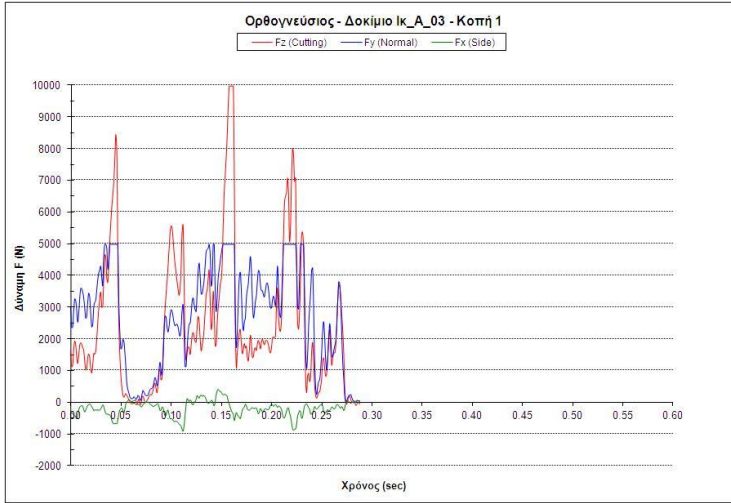
Σχήμα Π1. Διευθύνσεις δυνάμεων στο κοπτικό.

F_z : δύναμη κοπής (cutting)

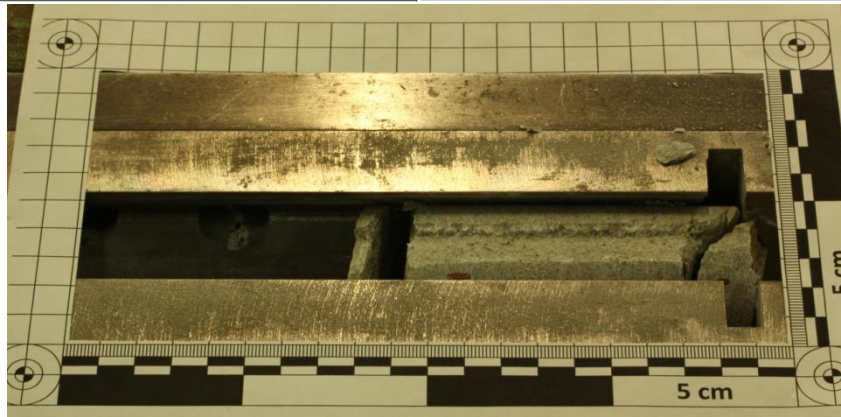
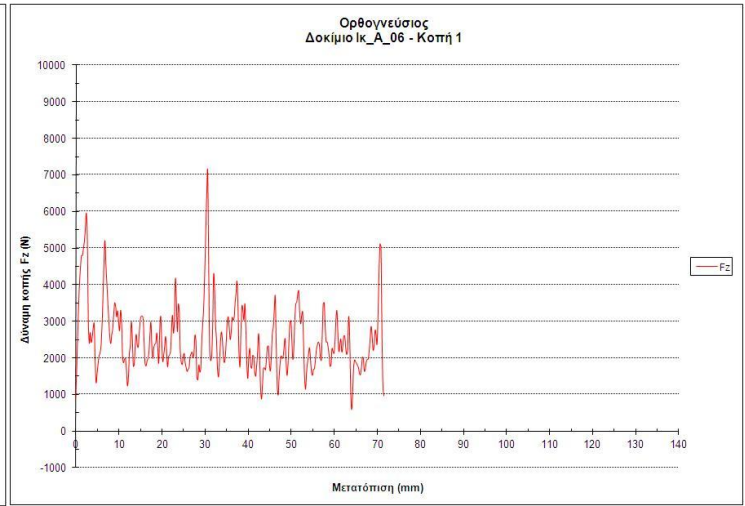
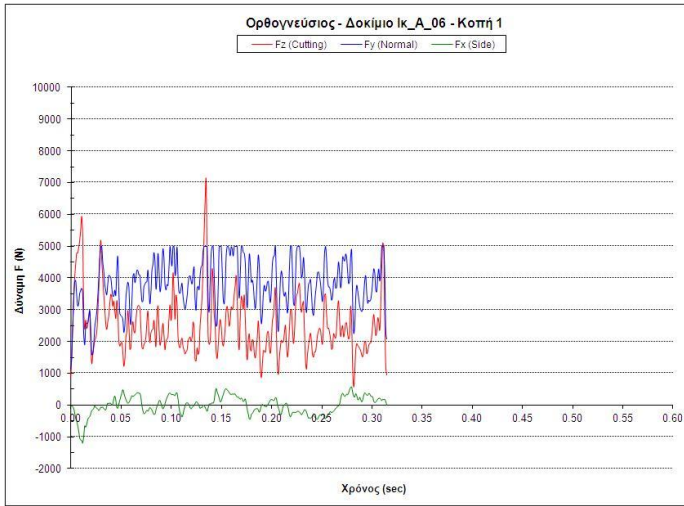
F_y : κατακόρυφη δύναμη (normal)

F_x : πλάγια δύναμη (side)

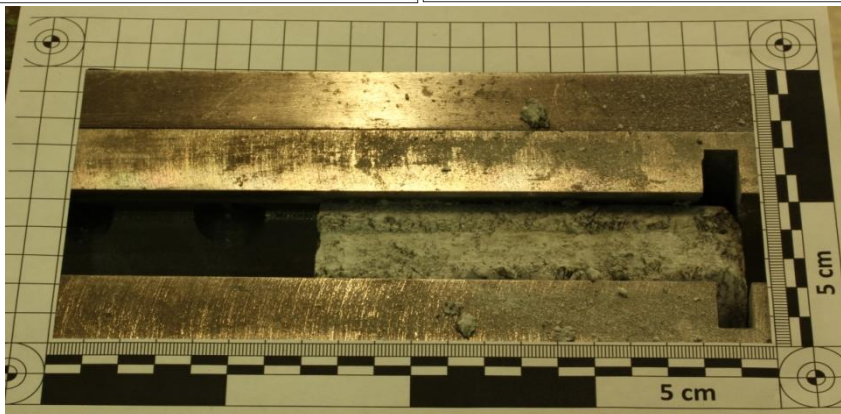
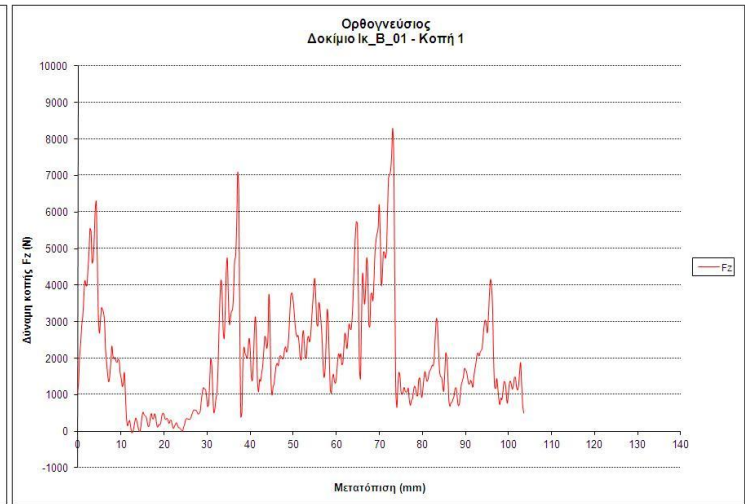
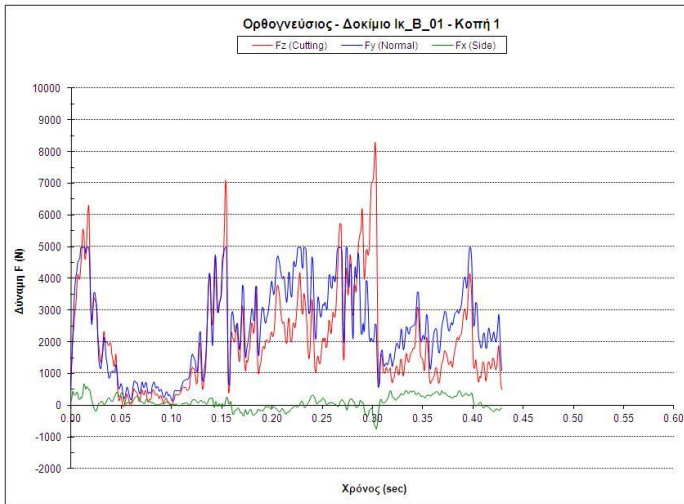
ΔΟΚΙΜΙΟ Ικ_Α_03



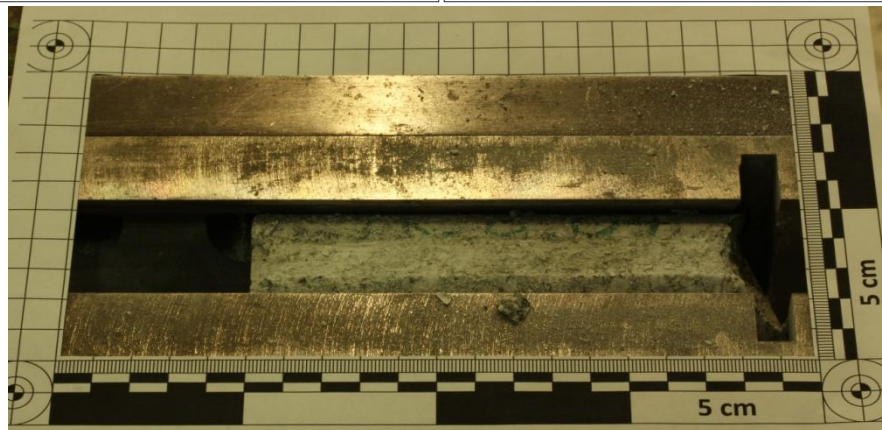
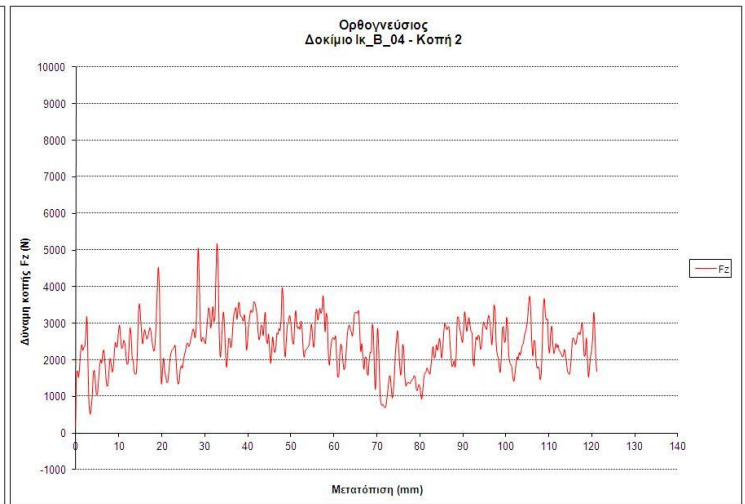
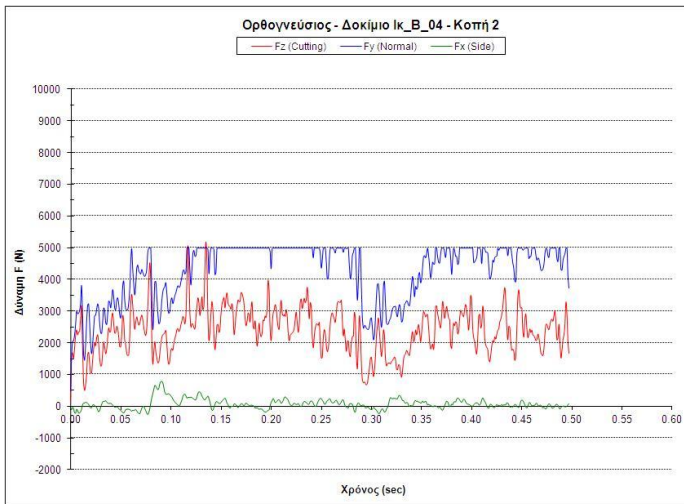
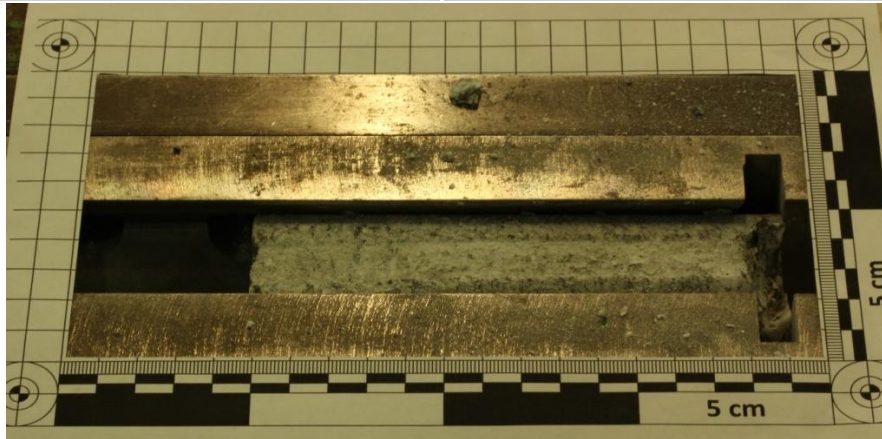
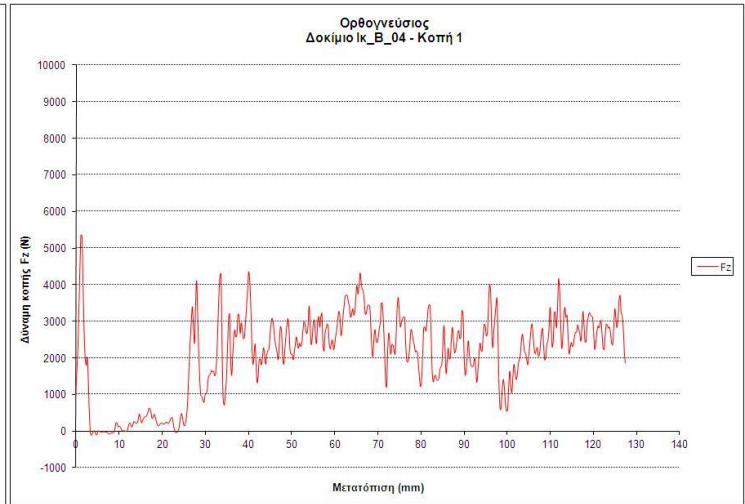
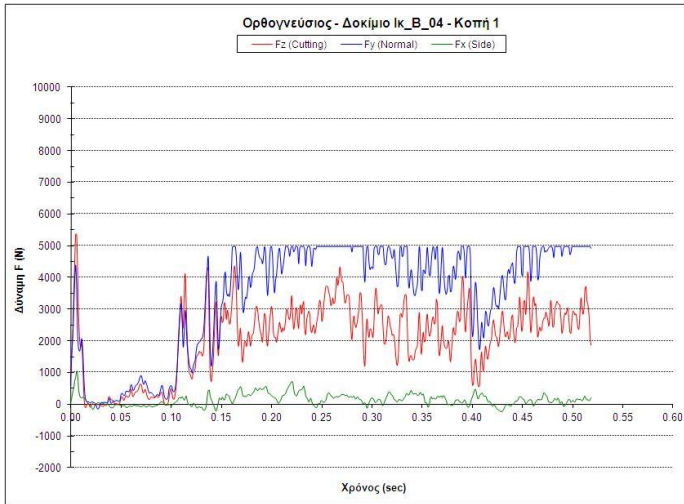
ΔΟΚΙΜΙΟ Ικ_Α_06



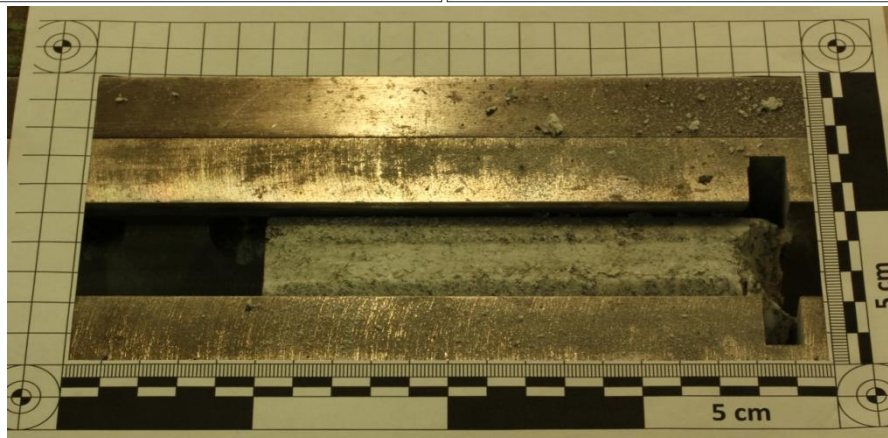
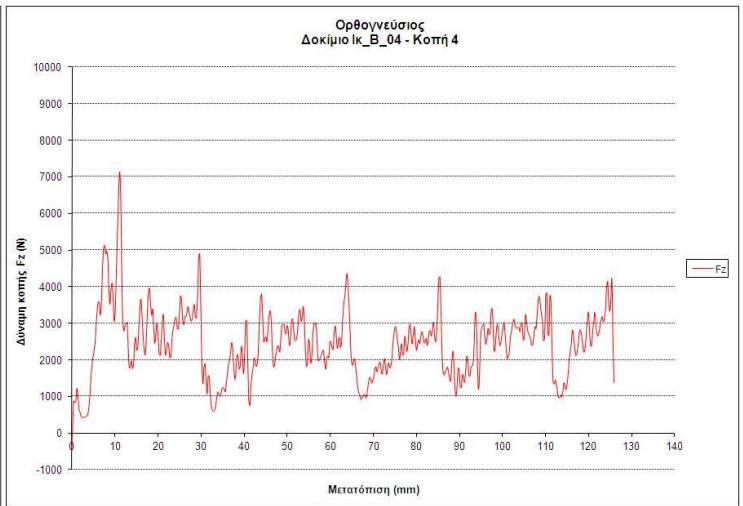
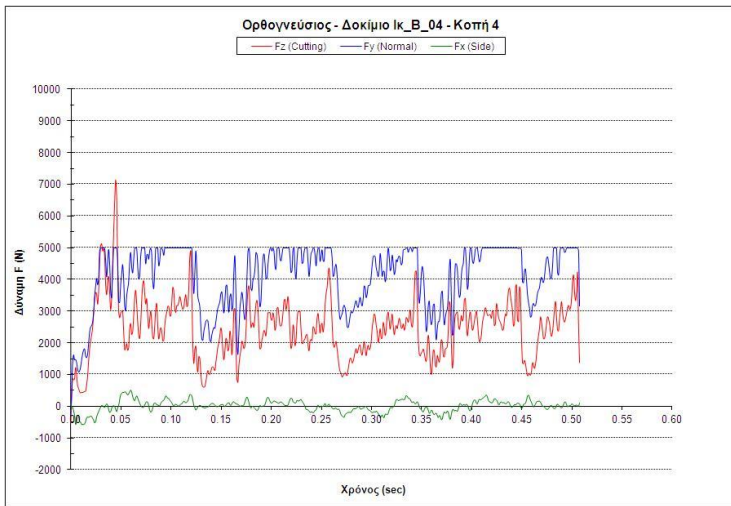
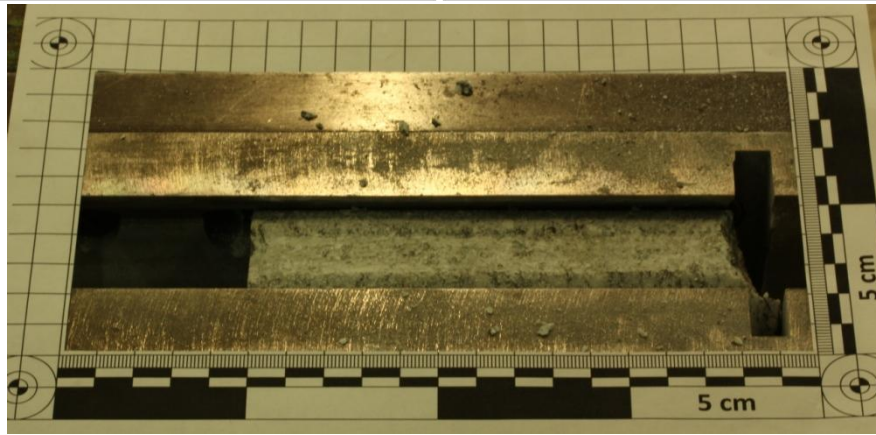
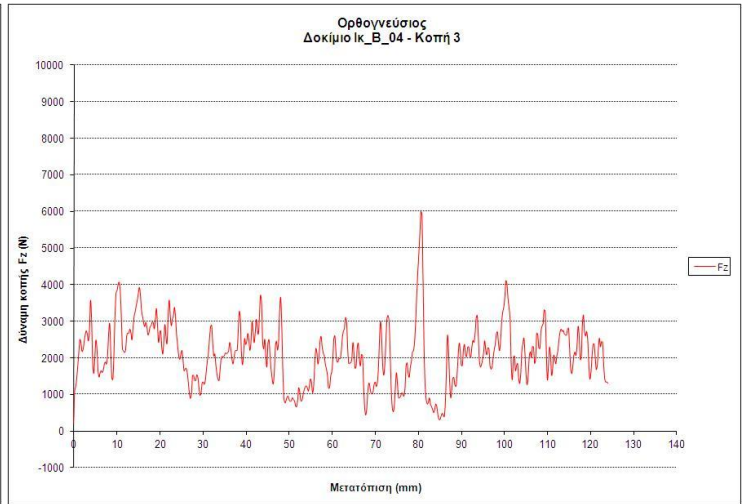
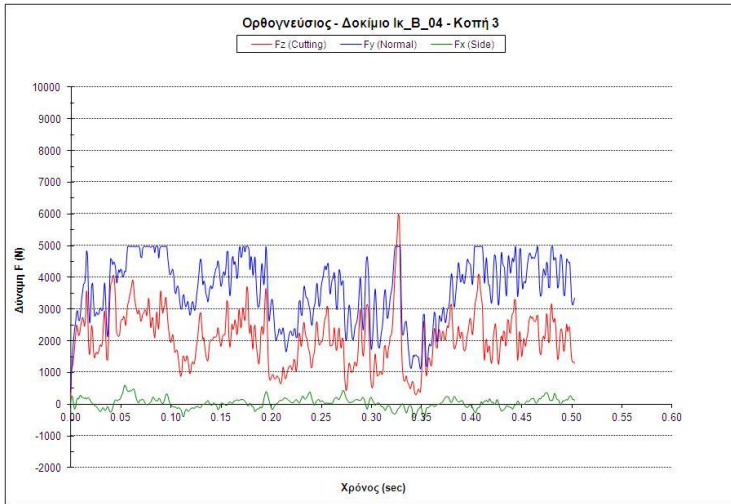
ΔΟΚΙΜΙΟ Ικ_Β_01



ΔΟΚΙΜΙΟ Ικ_B_04

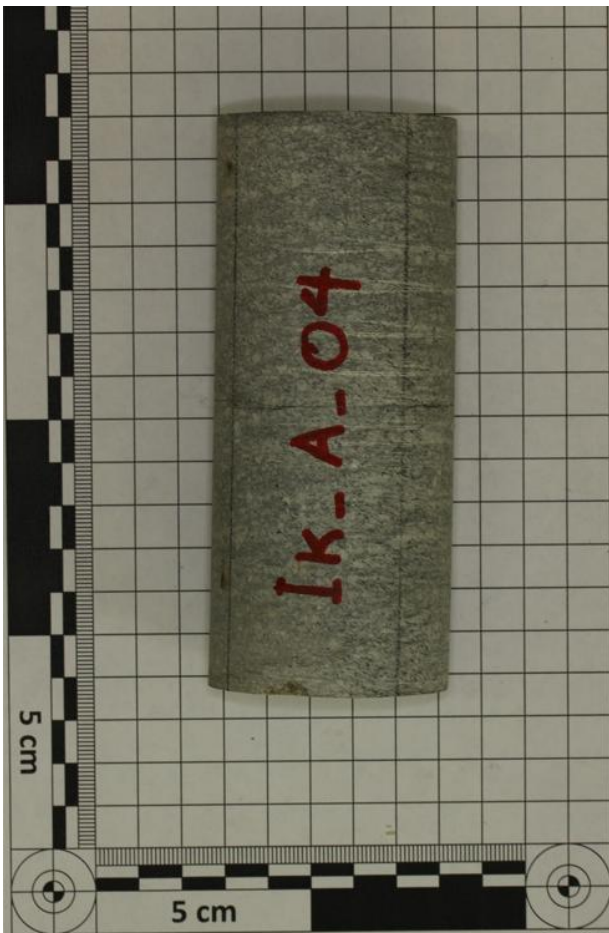
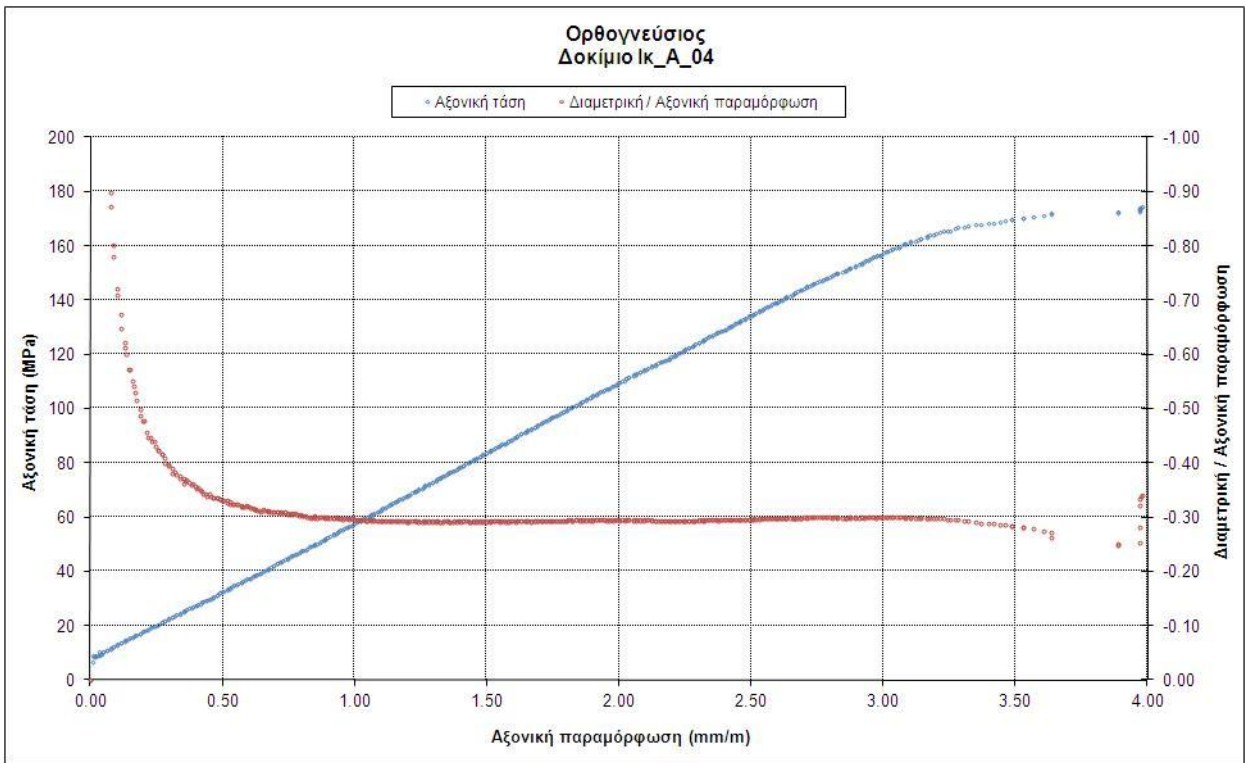


ΔΟΚΙΜΙΟ Ικ_B_04

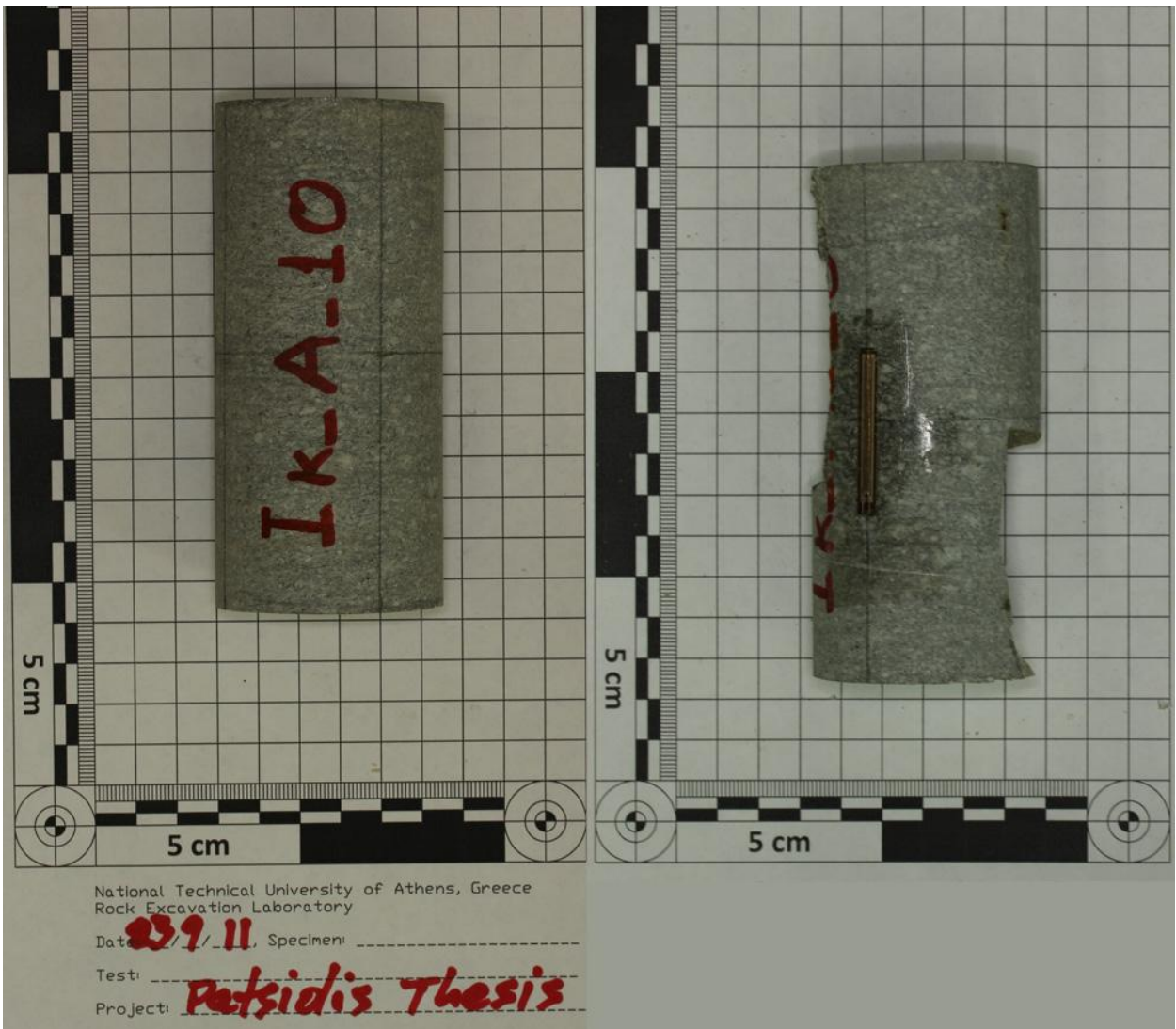
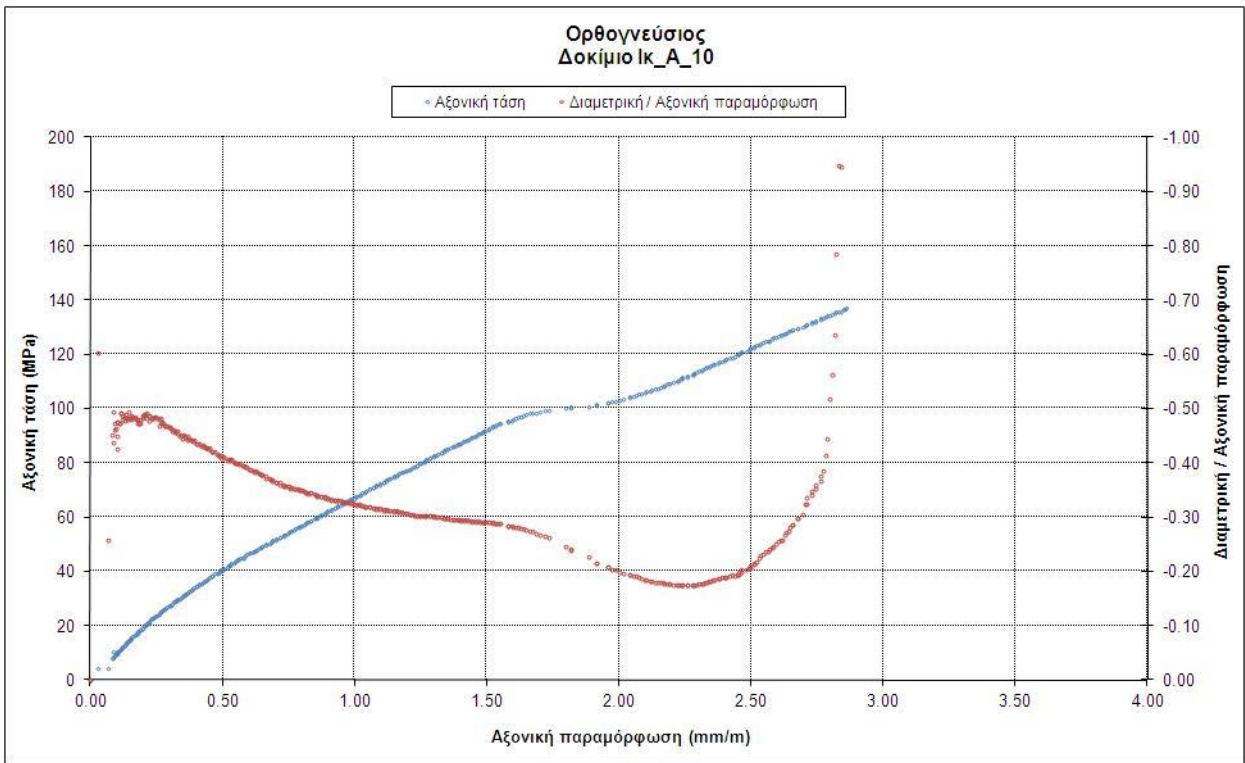


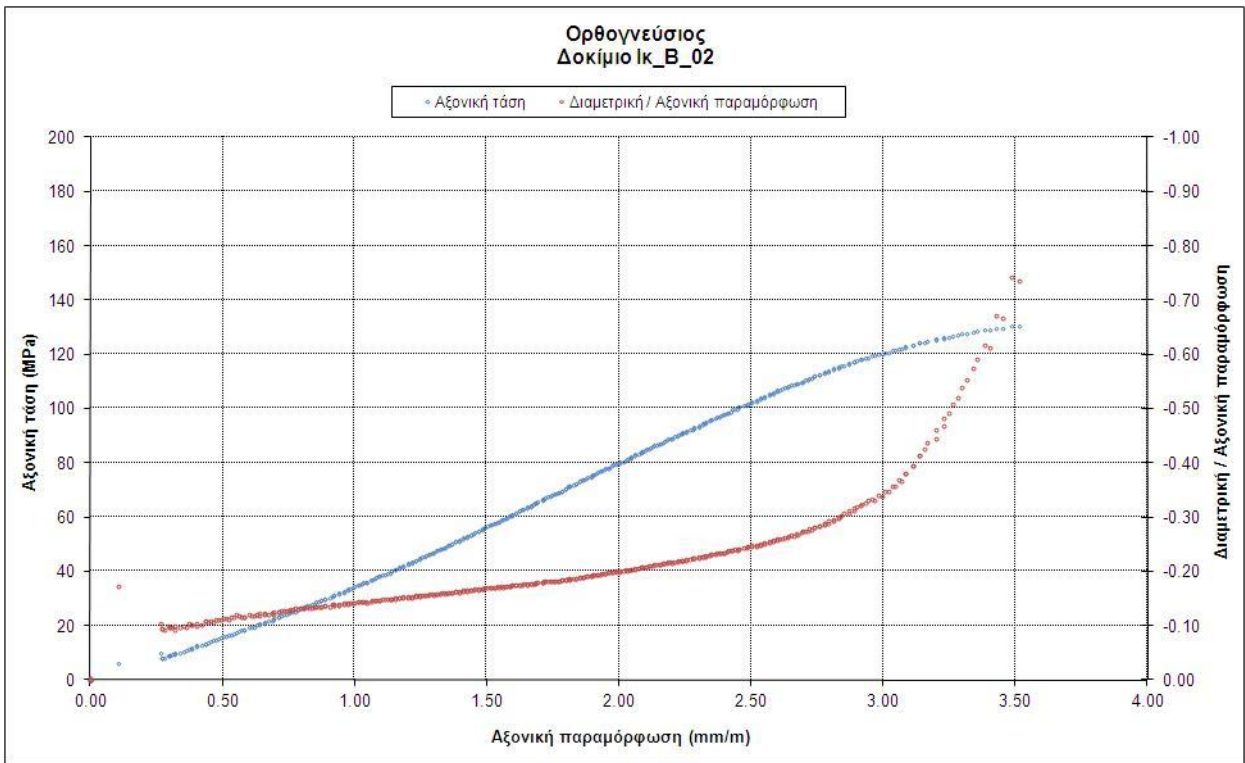
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

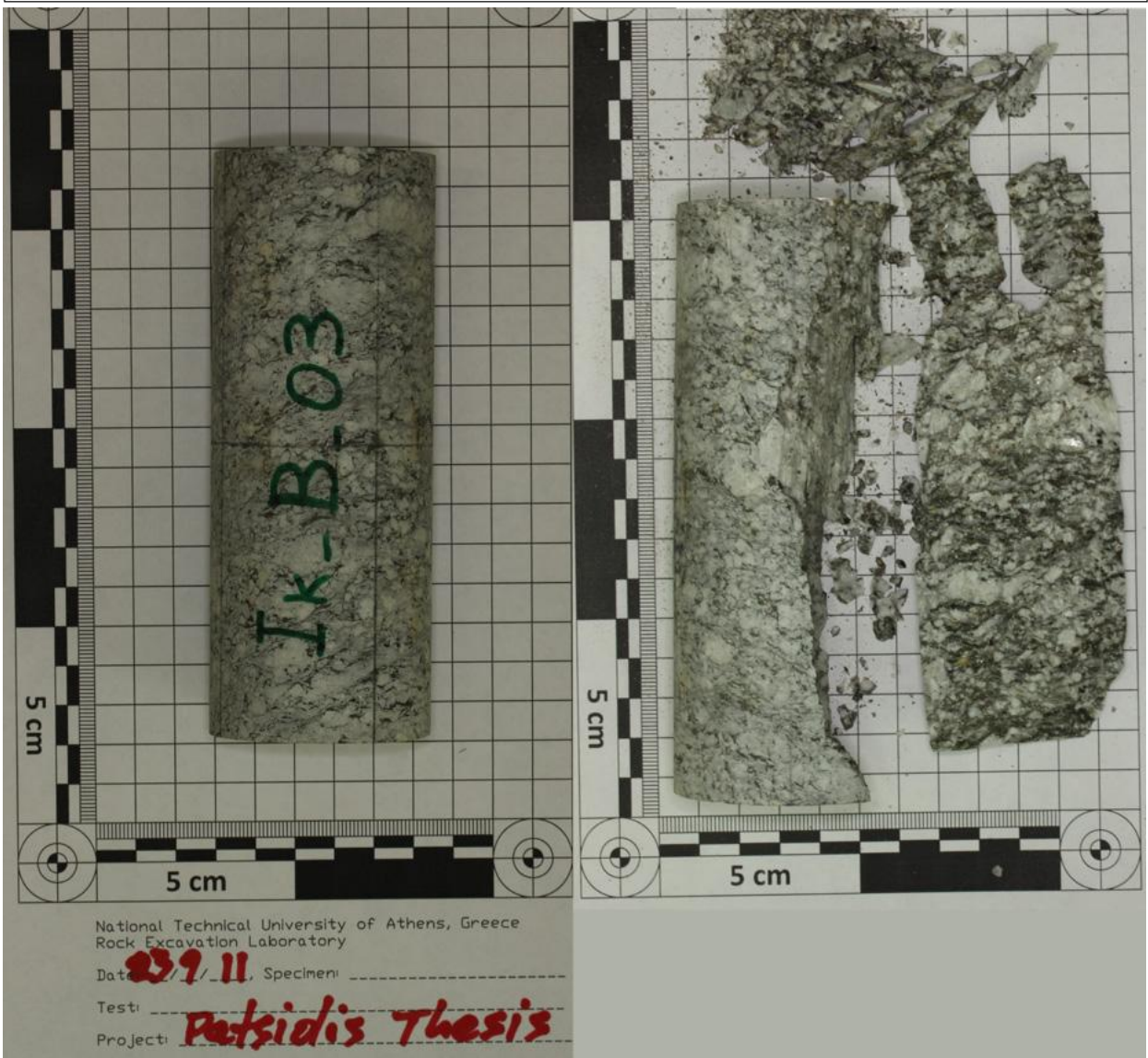
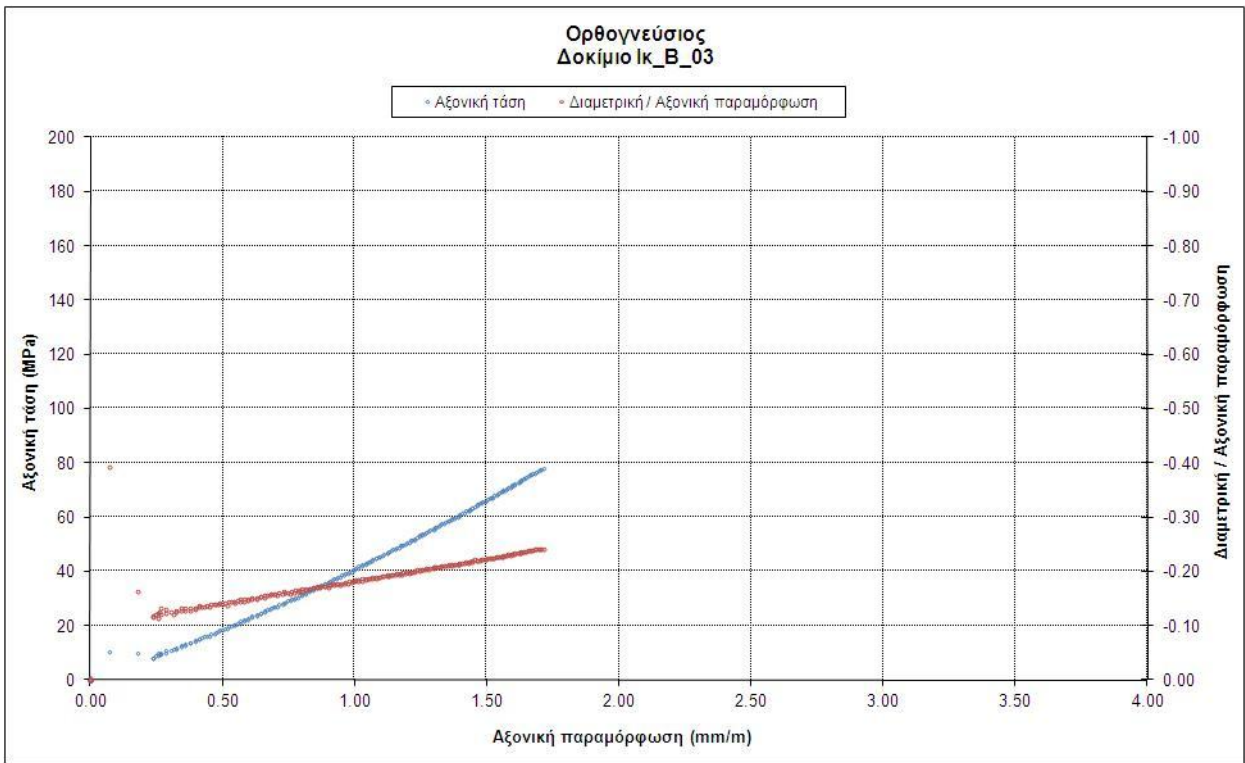
Διαγράμματα τάσης - παραμορφώσεων της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης και φωτογραφίες των δοκιμίων πριν και μετά την εκτέλεση της δοκιμής



National Technical University of Athens, Greece
 Rock Excavation Laboratory
 Date: **25/9/11**, Specimen: _____
 Test: _____
 Project: **Petsidis Thesis**

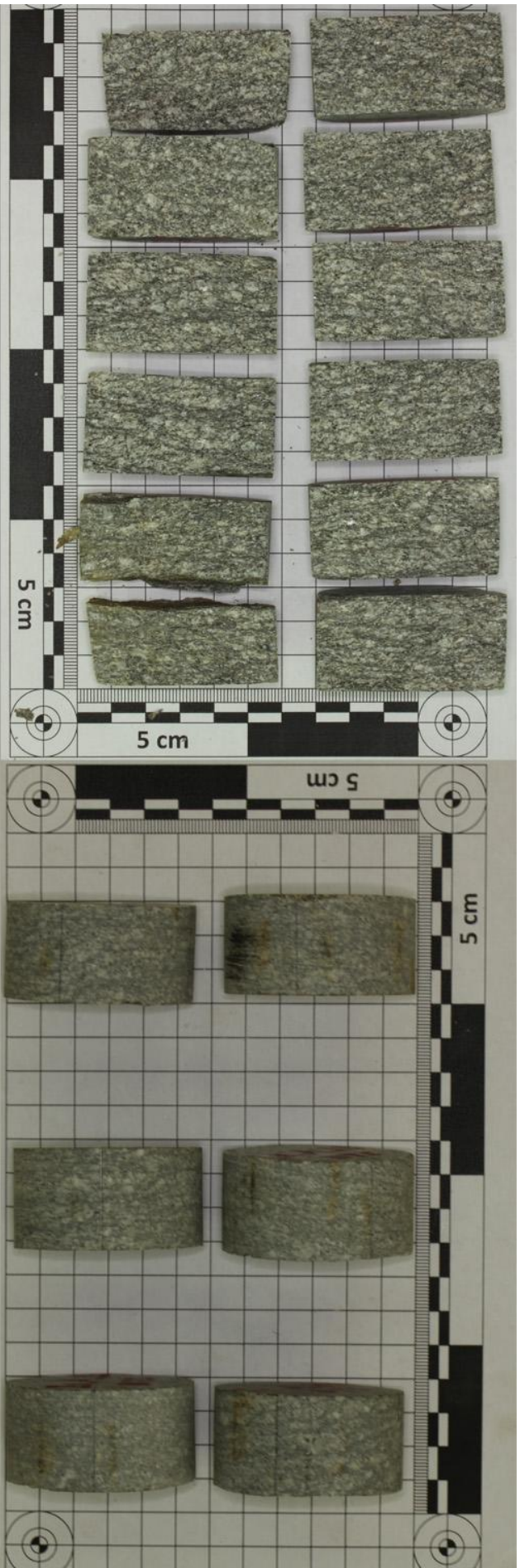
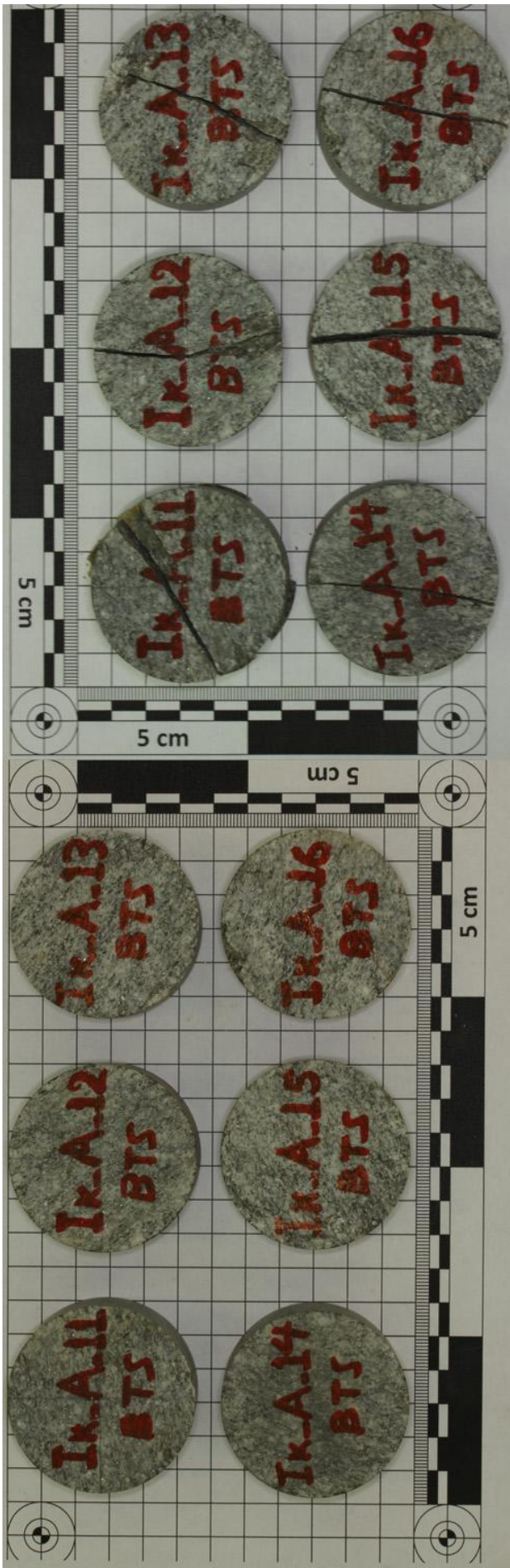






ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

Φωτογραφίες των δοκιμίων της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης

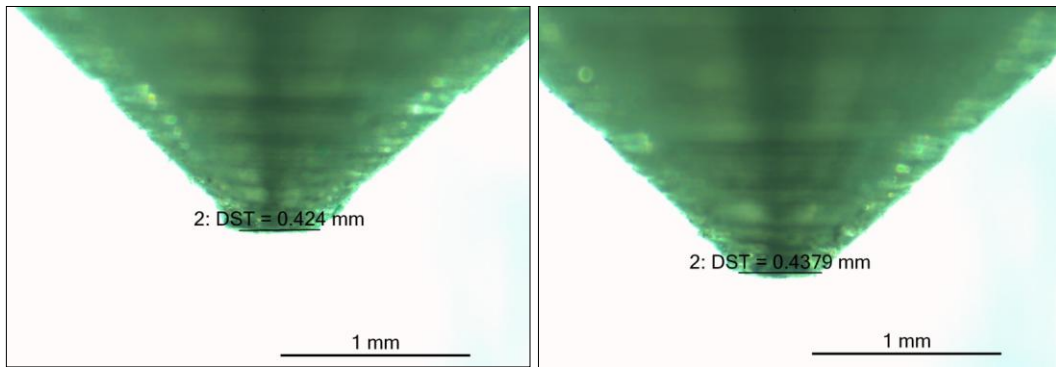




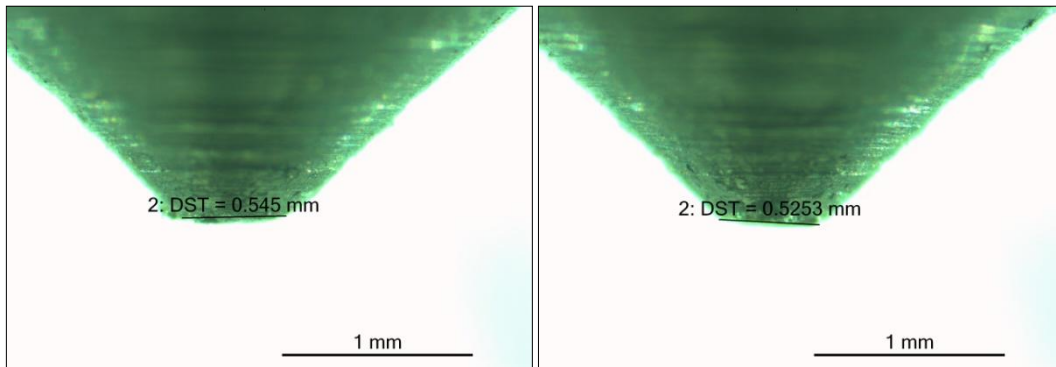
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

**Φωτογραφίες μικροσκοπίου των ακίδων της δοκιμής
αποξεστικότητας Cerchar**

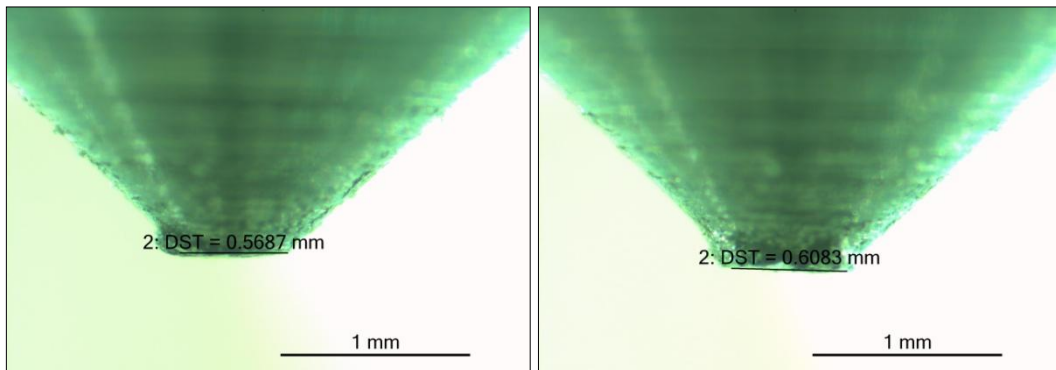
Δοκίμιο Ικ_Α_05 (HRC 40) scratch 1
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2



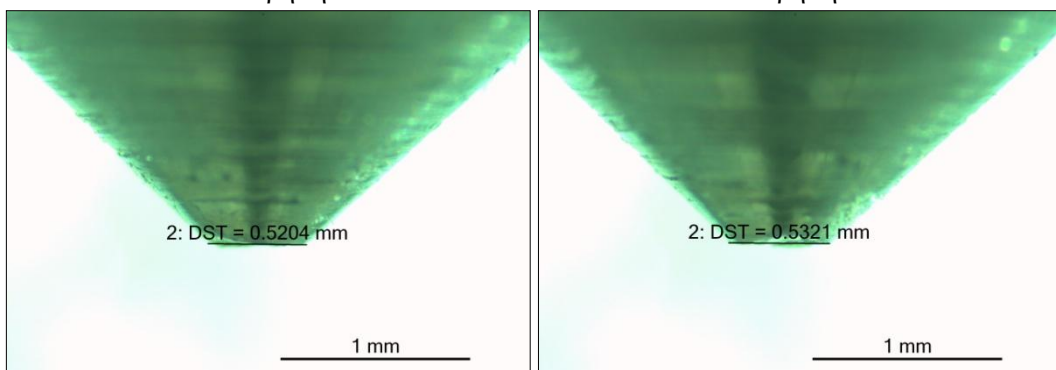
Δοκίμιο Ικ_Α_08 (HRC 40) scratch 5
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2



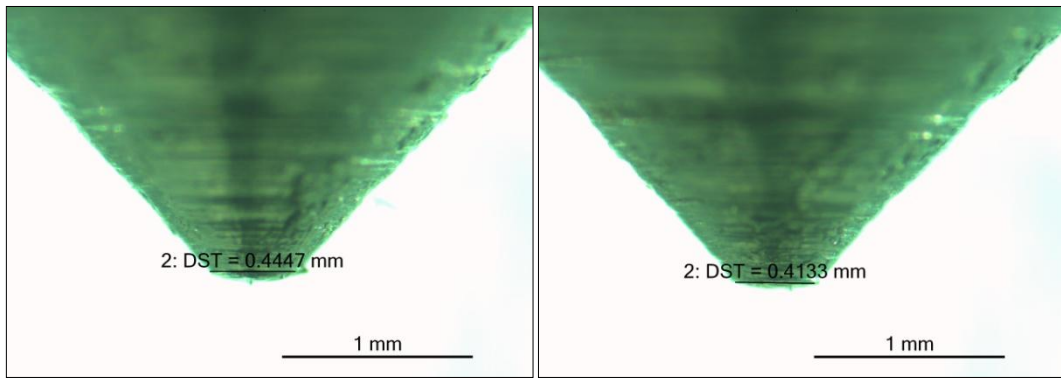
Δοκίμιο Ικ_Β_01 (HRC 40) scratch 4
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2



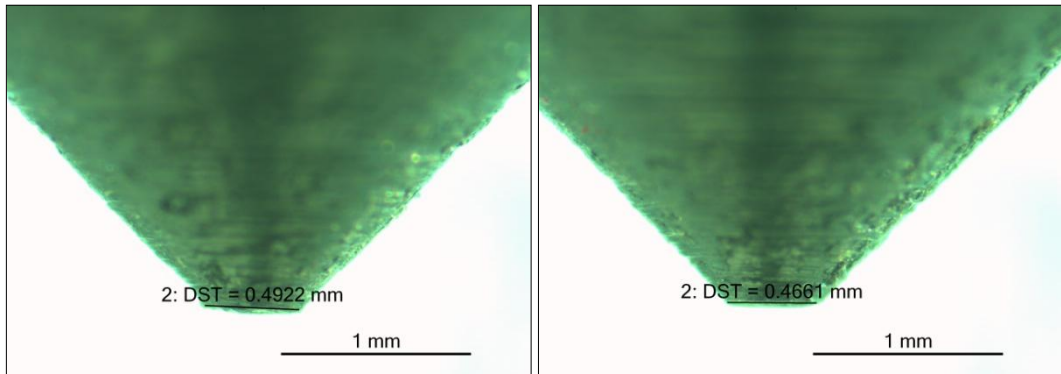
Δοκίμιο Ικ_Β_11 (HRC 40) scratch 4
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2



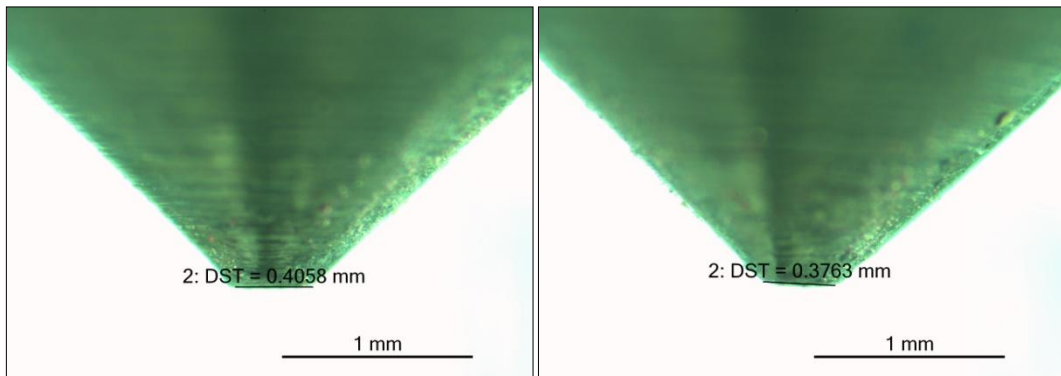
Δοκίμιο Ικ_Α_05 (HRC 55) scratch 1
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2



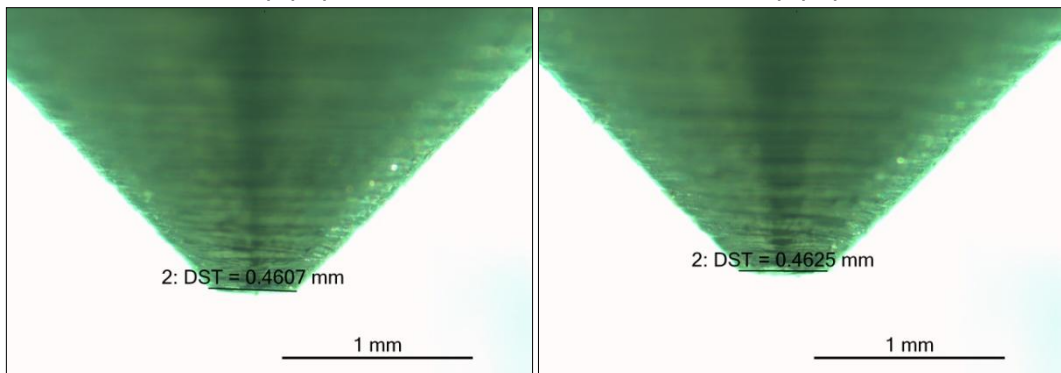
Δοκίμιο Ικ_Α_05 (HRC 55) scratch 2
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2



Δοκίμιο Ικ_Α_05 (HRC 55) scratch 3
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2

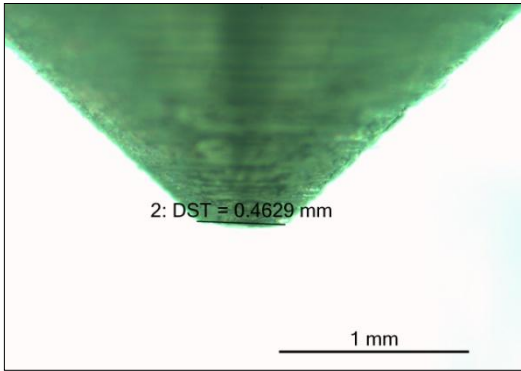


Δοκίμιο Ικ_Α_05 (HRC 55) scratch 4
Μέτρηση 1 Μέτρηση 2

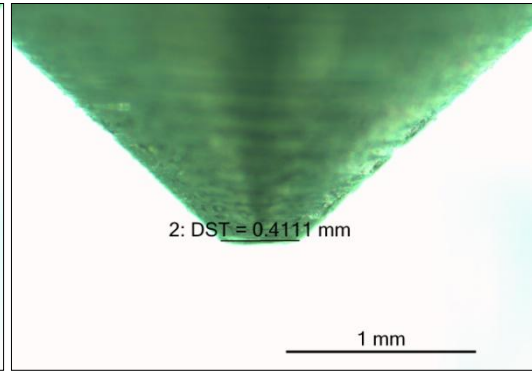


Δοκίμιο Ικ_Α_05 (HRC 55) scratch 5

Μέτρηση 1

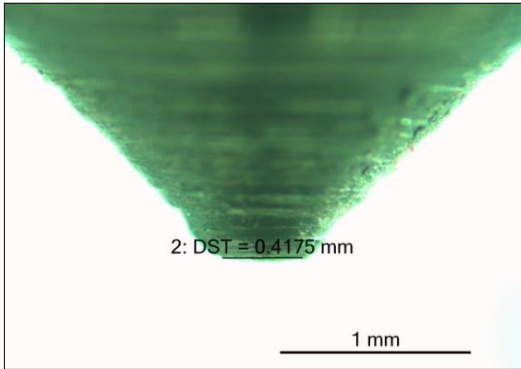


Μέτρηση 2

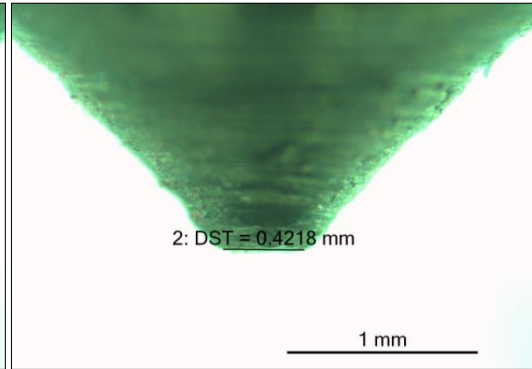


Δοκίμιο Ικ_Α_08 (HRC 55) scratch 1

Μέτρηση 1

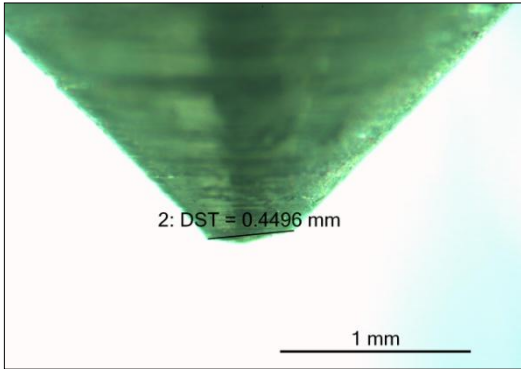


Μέτρηση 2

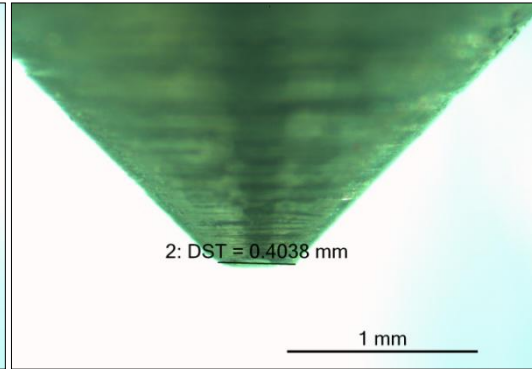


Δοκίμιο Ικ_Α_08 (HRC 55) scratch 2

Μέτρηση 1

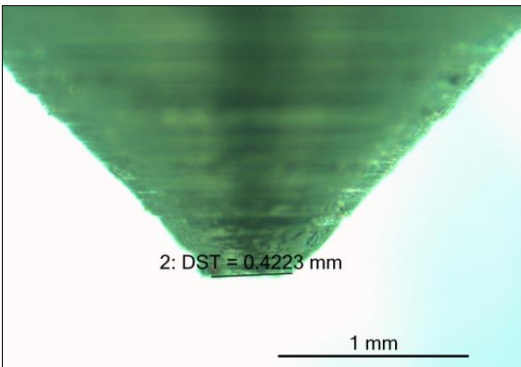


Μέτρηση 2

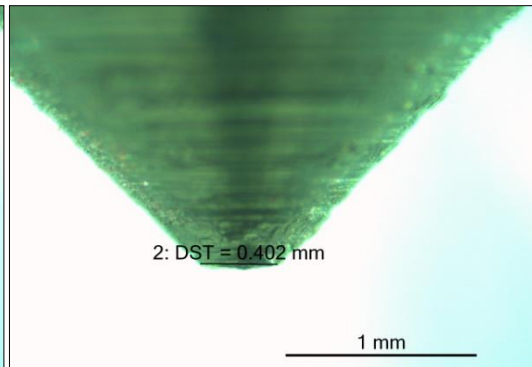


Δοκίμιο Ικ_Α_08 (HRC 55) scratch 4

Μέτρηση 1

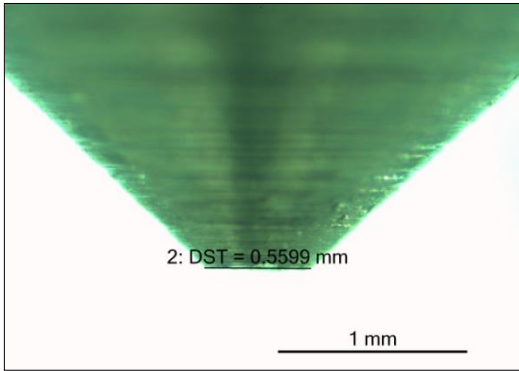


Μέτρηση 2

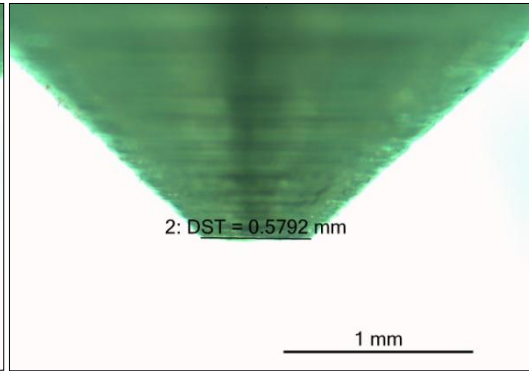


Δοκίμιο Ικ_Α_08 (HRC 55) scratch 5

Μέτρηση 1

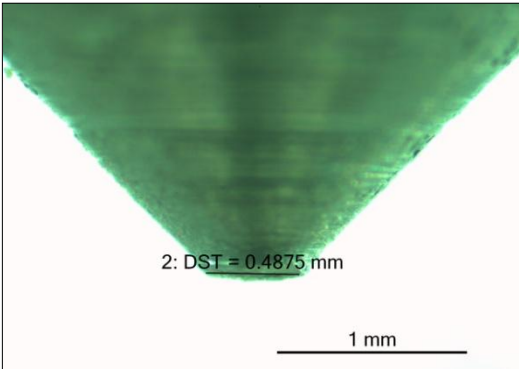


Μέτρηση 2

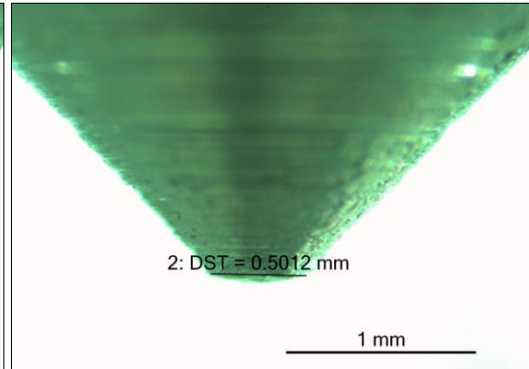


Δοκίμιο Ικ_Β_01 (HRC 55) scratch 3

Μέτρηση 1

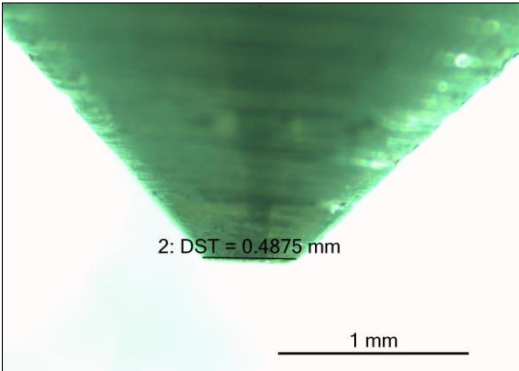


Μέτρηση 2

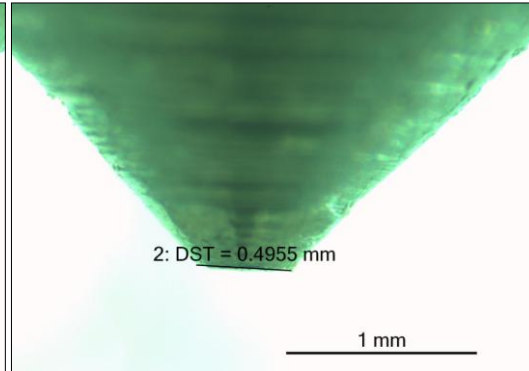


Δοκίμιο Ικ_Β_11 (HRC 55) scratch 2

Μέτρηση 1

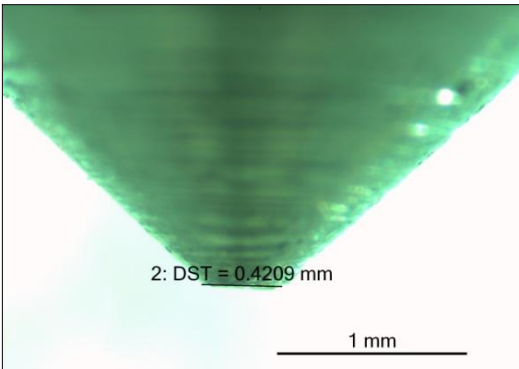


Μέτρηση 2



Δοκίμιο Ικ_Β_11 (HRC 55) scratch 4

Μέτρηση 1



Μέτρηση 2

