

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ : " ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ "

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Η φθορά των κοπτικών στην εξόρυξη με
μηχανικά μέσα***

ΔΟΥΚΙΑΝΤΖΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ: " ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ"

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Η φθορά των κοπτικών στην εξόρυξη με
μηχανικά μέσα***

ΔΟΥΚΙΑΝΤΖΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΙΧΑΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 07/11/2014.

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος, Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ:

Παναγιώτου Γεώργιος, Καθηγητής ΕΜΠ:

Νομικός Παύλος, Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ:

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

Copyright © Δουκιαντζάκης Ιωάννης, 2014

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της φθοράς των κοπτικών στην εξόρυξη με μηχανικά μέσα, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο -με την καταγραφή διάφορων, μέχρι σήμερα, ερευνητικών αποτελεσμάτων- όσο και σε εργαστηριακό επίπεδο με την εκτέλεση σχετικών δοκιμών σε δείγματα πετρωμάτων. 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 συμμετέχουν οι σχολές Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών και Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Επίκουρο Καθηγητή Θεόδωρο Μιχαλακόπουλο, για την επίβλεψη, την καθοδήγηση και τις σημαντικές γνώσεις που μου μετέφερε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται και προς τον Υποψήφιο Διδάκτορα Αντώνη Πολίτη για τη συνεισφορά του τόσο σε οργανωτικά όσο και θεωρητικά ζητήματα. Επίσης, προς το προσωπικό του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων για την πολύτιμη βοήθειά τους στην προετοιμασία και εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών.

Νοέμβριος 2014

ΙΔ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την μελέτη της φθοράς των κοπτικών κατά την εξόρυξη με μηχανικά μέσα και εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.

Το αντικείμενο της εργασίας, αν και έχει ως σημείο αναφοράς τη φθορά των κοπτικών, είναι ουσιαστικά διττό.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια εκτενής αναφορά στο αντικείμενο της φθοράς των κοπτικών και των μέχρι τώρα ερευνητικών ευρημάτων. Πιο συγκεκριμένα δίνεται μια εικόνα της συμπεριφοράς του πετρώματος κατά την κοπή και τα είδη των κοπτικών που υπάρχουν. Για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών φθοράς παρατίθενται ορισμένα στοιχεία τριβολογίας, όπως οι διάφοροι τύποι φθοράς των υλικών και οι ιδιότητες των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένα τα κοπτικά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφοροι δείκτες, οι δοκιμές και οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται καθώς και τα μοντέλα εκτίμησης του ρυθμού φθοράς που έχουν αναπτυχθεί.

Στο δεύτερο μέρος έμφαση δίνεται στη δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar. Για την συγκεκριμένη δοκιμή γίνεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση από την πρώτη παρουσίασή της μέχρι σήμερα. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση καταλήγει στην πρόσφατη προτυποποίηση της δοκιμής από την ISRM.

Στη συνέχεια διερευνάται η συσχέτιση της αποξεστικότητας κατά Cerchar με τη δυσθραυστότητα. Για το σκοπό αυτό εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές Cerchar και δυσθραυστότητας σε δίσκο με εγκοπή, τα αποτελέσματα των οποίων συσχετίστηκαν.

Abstract

The subject of this thesis is the investigation on tool wear during mechanical excavation. The thesis has been prepared at the Laboratory of Excavation Engineering of NTUA's School of Mining and Metallurgical Engineering.

The reference point of this thesis is the wear of rock cutting tools and is essentially twofold. The first part is a comprehensive literature review on the subject of wear of the cutting tools and up to date research findings. In the second part, the emphasis is given on testing rock abrasivity and especially on the Cerhar test. First, the evolution of the test from its early introduction to the recent adoption of a suggested method by the ISRM is presented through an extensive literature review.

Then, the correlation of abrasivity to fracture toughness is examined. For this purpose, a sequence of laboratory tests on selected rocks has been performed. The CERCHAR Abrasivity Index (CAI) and the fracture toughness through the edge-notched disc (END) wedge splitting test have been measured. The results have been analyzed and the correlation of the two data sets has been examined.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	1
Περίληψη	2
Abstract.....	3
Λίστα Σχημάτων.....	6
Λίστα Πινάκων	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Η φθορά των κοπτικών στην εξόρυξη με μηχανικά μέσα	12
1.2 Στόχοι της εργασίας.....	12
1.3 Δομή της εργασίας.....	13
1.4 Περιορισμοί της εργασίας	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ.....	15
2.1 Κοπτικά και παρατηρήσεις πεδίου.....	16
2.1.1 Συμπεριφορά του πετρώματος στην κοπή	16
2.1.2 Είδη κοπτικών εργαλείων	18
2.2 Στοιχεία τριβολογίας	22
2.2.1 Φθορά κοπτικών.....	22
2.2.2 Υλικά κοπτικών και ιδιότητες	30
2.3 Εργαστηριακή εκτίμηση αποξεστικότητας πετρωμάτων	33
2.3.1 Δείκτης F κατά Schimazek.....	34
2.3.2 Δείκτης CAI.....	36
2.3.3 Νορβηγικές δοκιμές AV/AVS/SAT	38
2.3.4 Δοκιμή LCPC Abroy	40
2.4 Μοντέλα εκτίμησης χρόνου ζωής κοπτικών.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:Η ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ CERCHAR.....	46
3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	47
3.2 Προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού της αποξεστικότητας πετρωμάτων με τη δοκιμή Cerchar από την ISRM.....	82
3.2.1 Σκοπός της δοκιμής.....	82
3.2.2 Εξοπλισμός δοκιμής	82
3.2.3 Μέτρηση της φθοράς της ακίδας	84
3.2.4 Υπολογισμοί	86
3.2.5 Ταξινόμηση.....	87
3.2.6 Έκθεση δοκιμής.....	88

3.3 Διερεύνηση της συσχέτισης του δείκτη CAI με τη δυσθραυστότητα	89
3.3.1 Δοκιμές προσδιορισμού δυσθραυστότητας	89
3.3.2 Αποτελέσματα Εργαστηριακών δοκιμών	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
Βιβλιογραφία.....	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ CERCHAR.....	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ.....	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	146

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Τύποι απόσπασης του πετρώματος κατά Deketh et al. (Αναγνώστου, 2006).	17
Σχήμα 2.2: Διακύμανση της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου για α) πολύ πλαστικό, β) πλαστικό, γ) ψαθυρό και δ) πολύ ψαθυρό πέτρωμα. (Παναγιώτου, 2006).	18
Σχήμα 2.3: Δυνάμεις που προκαλούν θραύση του πετρώματος για κοπτικά α) συρόμενου τύπου και β) τύπου δίσκου (κατά Hood από Αναγνώστου 2006).	19
Σχήμα 2.4: Κοπτικά συρόμενου τύπου: α), β), γ) κοπτικά τύπου σφήνας δ) κοπτικό σημειακής προσβολής. (κατά Nishimatsu από Αναγνώστου 2006).	19
Σχήμα 2.5: Κοπτικά συρόμενου τύπου: α) τύπου σφήνας β) σημειακής προσβολής (Μιχαλακόπουλος 2013)	20
Σχήμα 2.6: Κοπτικά τύπου δίσκου: α) κοπτικό δίσκου β) κοπτικό οδοντωτού δίσκου γ) κοπτικό περιστρεφόμενου τυμπάνου με κομβία (κατά Roxborough από Αναγνώστου 2006).	21
Σχήμα 2.7: Συστατικά μέρη ενός τριβοσυστήματος (Φαφούτης 2008)	23
Σχήμα 2.8: Κατηγορίες φθοράς διεπιφανειών ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης (Φαφούτης 2008).	23
Σχήμα 2.9: Μηχανισμοί φθοράς (Φαφούτης 2008)	24
Σχήμα 2.10: Περιπτώσεις φθοράς εκτριβής (Deketh 1995).	25
Σχήμα 2.11: Τύποι φθοράς κοπτικών (Deketh 1995)	27
Σχήμα 2.12: Η φθορά ως συνάρτηση του μήκους κοπής (Bhusan 2013).	27
Σχήμα 2.13: Φθορά κοπτικών δίσκου (Frenzel 2009)	28
Σχήμα 2.14: Φθορά κοπτικών σημειακής προσβολής (Bilgin et al. 2014)	29
Σχήμα 2.15: Φθορά ακτινικών κοπτικών (Atkinson et al. 1986).	29
Σχήμα 2.16: Συνάρτηση αντοχής σε κρούση-περιεκτικότητας σε Co (Clark 1987).	30
Σχήμα 2.17: Συνάρτηση σκληρότητας-κόκκου WC και περιεκτικότητα σε Co (Clark 1987)	31
Σχήμα 2.18: Σχέση σκληρότητας- δυσθραυστότητας για διάφορα υλικά (Zum Gahr 1987)	32
Σχήμα 2.19: Κοπτικά δίσκου (www.rock-cutters.com 2014)	32
Σχήμα 2.20: Δοκιμή ακίδας-δίσκου (Verhoef 1997)	34
Σχήμα 2.21: Πρωτότυπη συσκευή Cerchar (δεξιά) και Τροποποιημένη συσκευή "West" (αριστερά) (Plinninger 2008).	37
Σχήμα 2.22: Τυπικές τιμές CAI (Plinninger 2008)	38
Σχήμα 2.23: Απεικόνιση της δοκιμής αποξεστικότητας NTNU (Nilsen 2006).	39
Σχήμα 2.24: Εικόνα κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Jakobsen et al. 2012)	39
Σχήμα 2.25: Συσκευή LCPC Abroy (Plinninger 2008)	41
Σχήμα 2.26: Διάρκεια ζωής κοπτικών σε συνάρτηση με τη σκληρότητα πετρωμάτων (Lislerud 1997).	43
Σχήμα 2.27: Ωφέλιμο μήκος κοπήςκοπτικών σε σχέση με τη θέση τους στην κεφαλή ενός TBM (Alber 2008)	45
Σχήμα 3.1: Μετρημένες τιμές CAI για 36 πετρώματα και η ισοδύναμη περιεκτικότητα τους σε χαλαζία (Suana και Peters 1981).	49
Σχήμα 3.2: Μετρημένες τιμές CAI για πετρώματα με διαφορετικό μέγεθος κόκκων και η ισοδύναμη τους περιεκτικότητα σε χαλαζία (Suana και Peters, 1981)	50
Σχήμα 3.3: Συσκευή τύπου West για τη μέτρηση της αποξεστικότητας πετρωμάτων κατά Cerchar. (West 1989)	51

Σχήμα 3.4: Συσχέτιση σκληρότητας κατά Mohs και αποξεστικότητα διάφορων πετρωμάτων (West 1989).....	52
Σχήμα 3.5: Δείκτης CAI για δοκιμή σε λεία και τραχεία επιφάνεια πετρώματος (Plinninger 2004).....	55
Σχήμα 3.6: Δείκτης CAI σε συνάρτηση του μήκους δοκιμής (Plinninger 2004)	56
Σχήμα 3.7: Συσχέτιση της κατανάλωσης κοπτικών σημειακής προσβολής με τον δείκτη CAI (Plinninger 2004)	56
Σχήμα 3.8: Συσχέτιση διάρκειας ζωής κοπτικών, UCS και δείκτη CAI για ορισμένα συνήθη πετρώματα (Plinninger 2004)	57
Σχήμα 3.9: Συγκριτικά αποτελέσματα δοκιμής Cerchar για λείες και τραχείες επιφάνειες (Rostami et al. 2005)	58
Σχήμα 3.10: Μέτρηση φθοράς ακίδας με βάση γνωστή γωνία κορυφής της	59
Σχήμα 3.11: Διασπορά δείκτη CAI για ακίδες σκληρότητας HRC55 και HRC40(Michalakopoulos et al. 2006).....	62
Σχήμα 3.12: Συσχέτιση CAI40 και CAI55	63
Σχήμα 3.13: Συνάρτηση πορώδους με την αύξηση του δείκτη CAI για κάθε επιπλέον 1MPa περιβάλλουσας πίεσης (Alber 2008).....	64
Σχήμα 3.14: Συγκριτικά αποτελέσματα του δείκτη CAI του γρανίτη για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας (Eberl et al. 2008).....	66
Σχήμα 3.15: Συγκριτικά αποτελέσματα του δείκτη CAI του ψαμμίτη για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας (Eberl et al. 2008).....	67
Σχήμα 3.16: Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) και του δείκτη CAI, του γρανίτη και του ψαμμίτη, για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας (Eberl et al. 2008).....	68
Σχήμα 3.17: Συσχέτιση του δείκτη CAI με την περιεκτικότητα σε χαλαζία (Yarali et al. 2008).....	70
Σχήμα 3.18: Συσχέτιση του δείκτη CAI με το ισοδύναμο ποσοστό χαλαζία (Yarali et al. 2008).....	70
Σχήμα 3.19: Συσχέτιση του δείκτη CAI με το βαθμό συγκόλλησης (Yarali et al., 2008)	71
Σχήμα 3.20: Συσχέτιση του δείκτη CAI με την κατανάλωση των κοπτικών (Yarali et al. 2008).....	72
Σχήμα 3.21: Επίδραση του τύπου ακίδας στον δείκτη CAI, διατηρώντας σταθερή τη σκληρότητα (Stanford and Hagan 2009)	74
Σχήμα 3.22: Επίδραση της σκληρότητας της ακίδας στον δείκτη CAI, διατηρώντας σταθερό τον τύπο ακίδας (Stanford and Hagan 2009).....	75
Σχήμα 3.23: Συσχέτιση του δείκτη CAI και της σκληρότητας της ακίδας για κάθε δείγμα (Jacobs and Hagan 2009)	79
Σχήμα 3.24: Συσχέτιση του δείκτη CAI και του εφαρμοζόμενου φορτίου σε δείγμα (Jacobs and Hagan 2009).....	79
Σχήμα 3.25: Επίδραση της διάρκειας της δοκιμής στον δείκτη CAI (Jacobs and Hagan 2009).....	80
Σχήμα 3.26: Επίδραση του μήκους της δοκιμής στον δείκτη CAI (Jacobs and Hagan 2009)	81
Σχήμα 3.27: Επίδραση της υγρασίας στον δείκτη CAI (Jacobs and Hagan 2009)	81
Σχήμα 3.28: Η συσκευή τύπου Cerchar (αριστερά) και η συσκευή τύπου West (δεξιά) (ISRM 2013)	83
Σχήμα 3.29: Μετρήσεις από πλάγια (a) και κατακόρυφη (b) και (c) όψη (ISRM 2013).....	84

Σχήμα 3.30: Περίπτωση σωστής μέτρησης από πλάγια όψη (a) και περίπτωση πιθανής λανθασμένης μέτρησης και υπερεκτίμησης της φθοράς από κατακόρυφη όψη (b) (ISRM 2013).....	85
Σχήμα 3.31: Αποδεκτές όψεις φθοράς (a), (b) και τα αντίστοιχα μήκη φθοράς, μη αποδεκτή όψη φθοράς (c) και απορριπτέα μέτρηση (ISRM 2013).....	86
Σχήμα 3.32: Δοκίμιο δίσκου με εγκοπή και γεωμετρία φόρτισης (Donovan and Karfakis 2004).....	91
Σχήμα 3.33: Δυνάμεις που ασκούνται στη σφήνα (Donovan and Karfakis 2004).....	92
Σχήμα 3.34: Η διάταξη της δοκιμής (Donovan and Karfakis 2004).....	93
Σχήμα 3.35: Διάγραμμα κάθετου φορτίου-ανοίγματος ρωγμής (Donovan and Karfakis, 2004).....	94
Σχήμα 3.36: Φωτογραφία δοκιμίων ασβεστόλιθου Τρικάλων.....	95
Σχήμα 3.37: Φωτογραφία δοκιμίων ασβεστόλιθου Τρίπολης.....	96
Σχήμα 3.38: Φωτογραφία δοκιμίων λατερίτη Βοιωτίας.....	97
Σχήμα 3.39: Φωτογραφία δοκιμίων ασβεστόλιθου Τιτάν Α.Ε.....	98
Σχήμα 3.40: Αποδεκτή όψη φθοράς.....	99
Σχήμα 3.41: Αποδεκτή όψη φθοράς.....	100
Σχήμα 3.42: Μη αποδεκτή όψη φθοράς.....	100
Σχήμα 3.43: Συσχέτιση των CAI40 και CAI55.....	103
Σχήμα 3.44: Δημιουργία εγκοπής.....	104
Σχήμα 3.45: Διάταξη συσκευής.....	104
Σχήμα 3.46: Διάγραμμα κάθετου φορτίου-ανοίγματος ρωγμής και φωτογραφία μετά το πέρας της δοκιμής του δοκιμίου KY_05.....	105
Σχήμα 3.47: Συσχέτιση δυσθραυστότητας K _{1c} και δείκτη CAI.....	107
Σχήμα 4.1: Συσχέτιση των CAI40 και CAI55.....	112
Σχήμα 4,2: Συσχέτιση δυσθραυστότητας K _{1c} και δείκτη CAI.....	113

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Καταλληλότητα κοπτικών εργαλείων βάσει της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη.....	22
Πίνακας 2.2: Σκληρότητα ορυκτών.....	33
Πίνακας 2.3: Ισοδύναμη περιεκτικότητα χαλαζία.....	35
Πίνακας 2.4: Η κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων σύμφωνα με την τιμή F αλλά και η εκτίμηση την κατανάλωσης των κοπτικών.....	35
Πίνακας 2.5: Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον δείκτη αποξεστικότητας.....	37
Πίνακας 2.6: Κατάταξη της αποξεστικότητας των πετρωμάτων με βάση το AV.....	40
Πίνακας 2.7 Κατάταξη της αποξεστικότητας των πετρωμάτων με βάση το AVS.....	40
Πίνακας 2.8: Ταξινόμηση αποξεστικότητας βασισμένη στη δοκιμή LCPC.....	42
Πίνακας 3.1: Δείκτης CAI για διάφορα ορυκτά και μονοκρυσταλλικά πετρώματα.....	48

Πίνακας 3.2: Αναλογία δείκτη CAI διάφορων πετρωμάτων με δείκτη CAI χαλαζία.....	48
Πίνακας 3.3: Το εύρος των τιμών CAI για διαφορετικές ακίδες σε διάφορα πετρώματα....	54
Πίνακας 3.4: Συστάσεις χαρακτηριστικών της ακίδας.....	61
Πίνακας 3.5: Τιμές των παραμέτρων αποξεστικότητας των δοκιμών.....	69
Πίνακας 3.6: Ιδιότητες και σύσταση ακίδων προς δοκιμή.....	73
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα των δοκιμών των διαφορετικών ακίδων.....	73
Πίνακας 3.8: Ιδιότητες δειγμάτων.....	77
Πίνακας 3.9: Τιμές δείκτη CAI των δειγμάτων για διάφορες τιμές σκληρότητας της ακίδας.....	78
Πίνακας 3.10: Παράδειγμα αποτελεσμάτων δοκιμής Cerchar, πλάγιας όψης, 5 επαναλήψεων και υπολογισμός δείκτη CAI.....	87
Πίνακας 3.11: Ταξινόμηση αποξεστικότητας με βάση τον δείκτη CAI.....	88
Πίνακας 3.12: Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων.....	98
Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα δοκιμών Cerchar.....	101
Πίνακας 3.14: Αποτελέσματα δοκιμών Cerchar και συσχετίσεις των CAI ₄₀ και CAI ₅₅	102
Πίνακας 3.15: Αποτελέσματα δοκιμής δυσθραυστότητας.....	106
Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα δοκιμής Cerchar και δοκιμής δυσθραυστότητας...	107
Πίνακας 4.1: Κατάταξη δοκιμών με βάση την αποξεστικότητα.....	109
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα δοκιμών Cerchar και συσχετίσεις των CAI ₄₀ και CAI ₅₅	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η φθορά των κοπτικών στην εξόρυξη με μηχανικά μέσα

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ραγδαία αύξηση της μηχανικής όρυξης, τόσο στον κατασκευαστικό όσο και στον μεταλλευτικό κλάδο, έναντι συμβατικών μεθόδων. Στην μηχανοποιημένη εξόρυξη βασική παράμετρος για την ομαλή διενέργεια ενός εξορυκτικού κύκλου είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών. Η φθορά των κοπτικών επηρεάζει τόσο την απόδοση των μηχανημάτων και την δυνατότητα κοπής πετρωμάτων όσο και τον ρυθμό εκσκαφής, ο οποίος εξαρτάται από τη συχνότητα αντικατάστασης τους.

1.2 Στόχοι της εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της φθοράς των κοπτικών κατά την εξόρυξη με μηχανικά μέσα.

Κατά την κοπή και εξόρυξη του πετρώματος οι διάφοροι τύποι κοπτικών παρουσιάζουν ορισμένους μηχανισμούς φθοράς, που εξαρτώνται κυρίως από το υλικό κατασκευής τους και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με το πέτρωμα. Για τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κοπτικών, τη μέτρηση της φθοράς και την εκτίμηση του ρυθμού φθοράς χρησιμοποιούνται διάφορες δοκιμές και δείκτες.

Σημαντικός παράγοντας για τη φθορά των κοπτικών είναι η αποξεστικότητα του πετρώματος, καθώς πέτρωμα με υψηλή αποξεστικότητα προκαλεί μεγάλη φθορά στα κοπτικά και απαιτείται η συχνή αντικατάσταση τους. Η δοκιμή Cerchar και ο δείκτης CAI που προκύπτει από αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες τόσο του πετρώματος όσο και των συνθηκών κατά τη διαδικασία της δοκιμής. Βασικός παράγοντας για τα αποτελέσματα της δοκιμής Cerchar είναι η σκληρότητα της ακίδας που χρησιμοποιείται κατά τη δοκιμή. Για την παραγωγή αντιπροσωπευτικών και συγκρίσιμων αποτελεσμάτων της δοκιμής Cerchar υπάρχουν διάφορα πρότυπα εκτέλεσης και μέτρησης, με τελευταίο αυτό της ISRM(2013).

Η δυσθραυστότητα αποτελεί μέτρο της δυνατότητας διάδοσης ρωγμής σε ένα πέτρωμα και επομένως υποδεικνύει το φορτίο που απαιτείται από το κοπτικό για τη θραύση του πετρώματος.

1.3 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια και 3 παραρτήματα.

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά διάφορες πληροφορίες για τα κοπτικά όπως τα είδη που χρησιμοποιούνται και τη συμπεριφορά που έχει το έδαφος κατά την κοπή από αυτά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια στοιχεία τριβολογίας όπως οι διάφοροι τύποι φθοράς των υλικών και ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων για εξόρυξη. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται αναφορά των δοκιμών και των δεικτών εκτίμησης της αποξεστικότητας των πετρωμάτων και παρουσιάζονται ορισμένα μοντέλα εκτίμησης του χρόνου ζωής των κοπτικών.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στη δοκιμή αποξεστικότητας Cerchar. Αρχικά γίνεται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση στις έρευνες και δημοσιεύσεις που καταπιάνονται με αυτή τη δοκιμή και αναδεικνύονται οι αμφισημίες αλλά και οι βελτιώσεις διαχρονικά της δοκιμής, οι οποίες οδήγησαν στην πρόσφατη προτυποποίηση της από την ISRM. Έπειτα διερευνάται η συσχέτιση του δείκτη CAI με τη δυσθραυστότητα μέσω εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια τεσσάρων διαφορετικών πετρωμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται.

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

Τέλος, τα παραρτήματα περιλαμβάνουν τα διαγράμματα δυσθραυστότητας, τα αποτελέσματα της δοκιμής Cerchar καθώς και διάφορα στοιχεία για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

1.4 Περιορισμοί της εργασίας

Κατά την εργασία χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από τέσσερα είδη πετρωμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν σε άλλες διπλωματικές εργασίες στο Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.

Οι ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που δεν μετρήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ελήφθησαν από τις προαναφερθείσες διπλωματικές εργασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

2.1 Κοπτικά και παρατηρήσεις πεδίου

Η ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για αποδοτικότερη εξόρυξη των πετρωμάτων έχει οδηγήσει σε ανάπτυξη τη μελέτη τόσο της μηχανικής της κοπής των πετρωμάτων όσο και της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

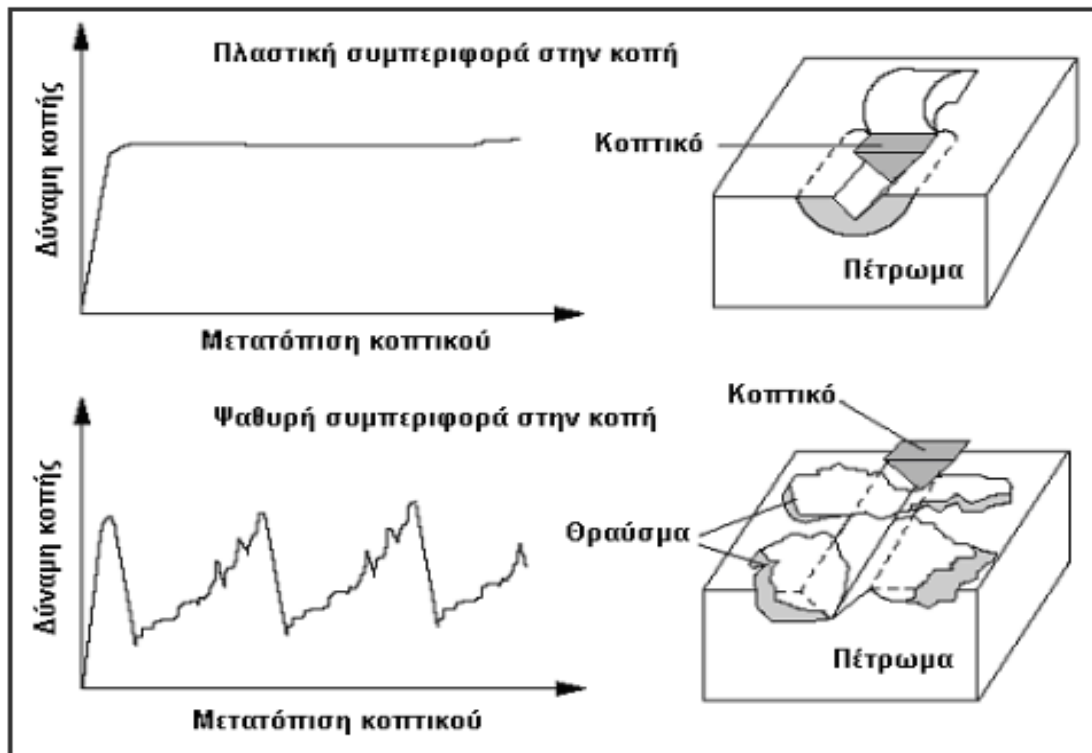
Από την μελέτη κοπής των πετρωμάτων προέκυψαν οι θεωρίες κοπής που σκοπό έχουν την ερμηνεία του μηχανισμού κοπής των πετρωμάτων και την πρόβλεψη των δυνάμεων και κατά συνέπεια των ενεργειακών απαιτήσεων για την αποσύνθεση των πετρωμάτων.

Η κατάλληλη επιλογή των κοπτικών μέσων αλλά και η εκτίμηση της φθοράς τους έχει μεγάλο αντίκτυπο για οποιαδήποτε εξορυκτική διαδικασία με μηχανικά μέσα, είτε πρόκειται για κατασκευαστικό έργο είτε πρόκειται για ορυχείο. Οι οικονομικές επιπτώσεις της φθοράς των κοπτικών είναι άμεσες με την ανάγκη αντικατάστασης των παλιών με καινούρια, αλλά και έμμεσες με τον σωρευτικά απαιτούμενο χρόνο που απαιτείται για την αντικατάστασή τους, που είναι μη παραγωγικός χρόνος, και τις ενεργειακές απώλειες εξαιτίας της χαμηλότερης απόδοσής τους.

Παρακάτω δίνεται μια εικόνα της συμπεριφοράς του πετρώματος κατά την κοπή, των ευρέως διαδεδομένων κοπτικών εργαλείων, του τρόπου φθοράς τους αλλά και των διαφόρων θεωριών κοπής.

2.1.1 Συμπεριφορά του πετρώματος στην κοπή

Κατά την κοπή των πετρωμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, εμφανίζονται δύο κύρια είδη αστοχίας: α) η πλαστική διαρροή και β) η ψαθυρή αστοχία. Υπάρχουν και ενδιάμεσες περιπτώσεις, οι οποίες συνήθως είναι δυσδιάκριτες.



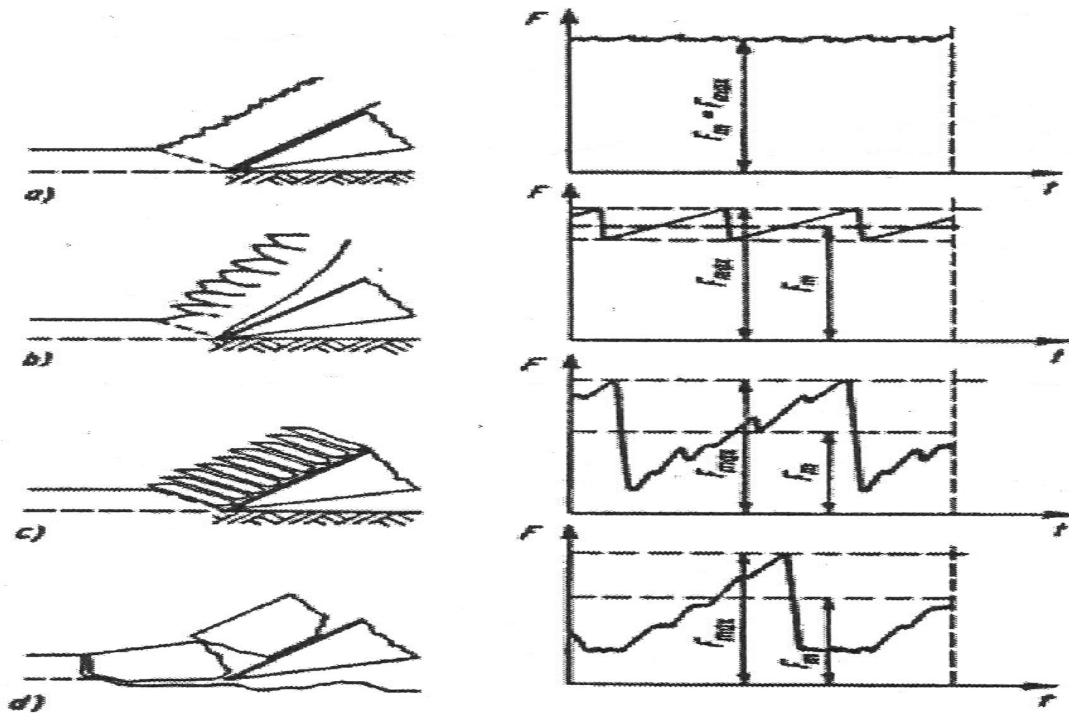
Σχήμα 2.1: Τύποι απόσπασης του πετρώματος κατά Deketh et al. (Αναγνώστου, 2006).

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

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

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

Βάσει των παραπάνω θα μπορούσαμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά ενός πετρώματος στην κοπή γνωρίζοντας πόσο ψαθυρό ή πλαστικό είναι. Αυτό είναι σημαντικό γιατί όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.2 όσο περισσότερο ψαθυρό είναι ένα πέτρωμα τόσο μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρατηρούνται στο μέγεθος της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου. Οι διακυμάνσεις αυτές γίνονται αντιληπτές ως δονήσεις στο μηχανικό μέσο εξόρυξης.



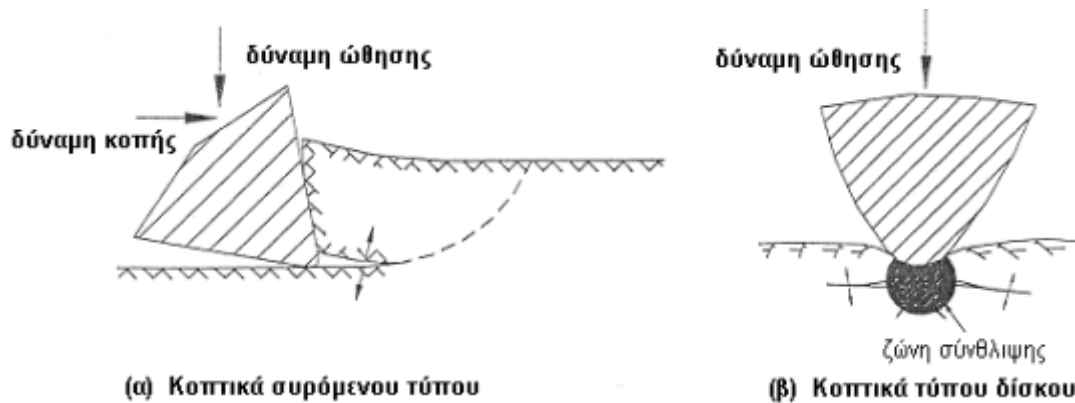
Σχήμα 2.2: Διακύμανση της δύναμης κοπής συναρτήσει του χρόνου για α) πολύ πλαστικό, β) πλαστικό, γ) ψαθυρό και δ) πολύ ψαθυρό πέτρωμα. (Παναγιώτου, 2006).

2.1.2 Είδη κοπτικών εργαλείων

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες κοπτικών εργαλείων για την μηχανική όρυξη πετρωμάτων: α) τα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου (drag picks) και β) τα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου (disc cutters). Η διαφορά τους πέραν της γεωμετρίας τους βρίσκεται στον τρόπο προσβολής του πετρώματος και συνεπώς στον μηχανισμό κοπής του. Για το λόγο αυτό αναλύονται με διαφορετικές θεωρίες κοπής.

Τα κοπτικά εργαλεία συρόμενου τύπου θραύουν το πέτρωμα εφαρμόζοντας σε

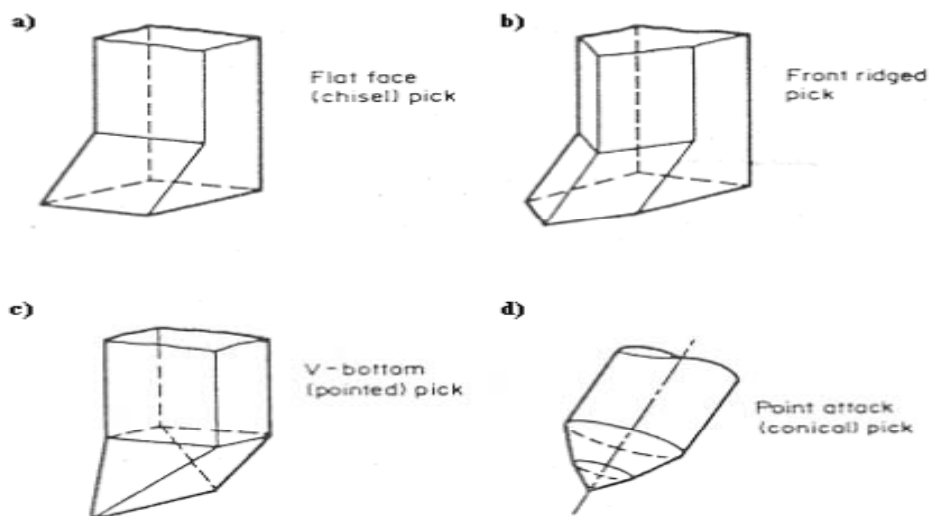
αυτό δύναμη η οποία είναι παράλληλη στην επιφάνεια του (δύναμη κοπής), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.α. Η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια του πετρώματος (ώθηση) διατηρεί το κοπτικό στο επιθυμητό βάθος κοπής. Αντίθετα στα κοπτικά εργαλεία τύπου δίσκου η κύρια δύναμη που προκαλεί τη θραύση του πετρώματος είναι η ώθηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.β.



Σχήμα 2.3: Δυνάμεις που προκαλούν θραύση του πετρώματος για κοπτικά α) συρόμενου τύπου και β) τύπου δίσκου (κατά Hood από Αναγνώστου 2006).

Τα κοπτικά συρόμενου τύπου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.4 και 2.5, διακρίνονται σε:

- κοπτικά τύπου σφήνας (chisel picks)
- κοπτικά σημειακής προσβολής (point attack picks)



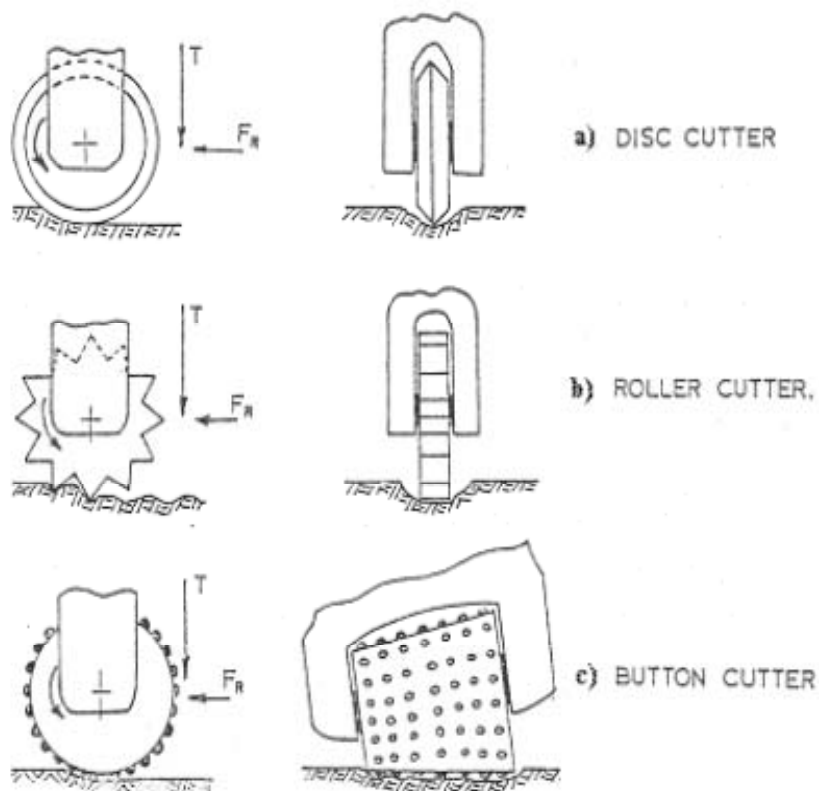
Σχήμα 2.4: Κοπτικά συρόμενου τύπου: a), b), c) κοπτικά τύπου σφήνας d) κοπτικό σημειακής προσβολής. (κατά Nishimatsu από Αναγνώστου 2006)



Σχήμα 2.5: Κοπτικά συρόμενου τύπου: α) τύπου σφήνας
β) σημειακής προσβολής (Μιχαλακόπουλος 2013)

Τα κοπτικά τύπου δίσκου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, διακρίνονται σε :

- κοπτικά δίσκου (disc cutters)
- κοπτικά οδοντωτού δίσκου (disc rollers)
- κοπτικά περιστρεφόμενου τυμπάνου με κομβία (button cutters)



Σχήμα 2.6: Κοπτικά τύπου δίσκου: a) κοπτικό δίσκου b) κοπτικό οδοντωτού δίσκου c) κοπτικό περιστρεφόμενου τυμπάνου με κομβία (κατά Roxborough από Αναγνώστου 2006)

Μια γενική κατηγοριοποίηση της εφαρμογής του κάθε τύπου κοπτικού, με βάση την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος το οποίο μπορούν αποτελεσματικά να προσβάλλουν, δείχνει ο Πίνακας 2.1. Η αποτελεσματικότητα ενός κοπτικού σχετίζεται τόσο με την απόδοση του (ενέργεια για την εξόρυξη μονάδας όγκου πετρώματος) όσο και με τη διατήρηση των χαρακτηριστικών (γεωμετρία, μάζα) κατά τη διάρκεια της χρήσης του.

Γενικά τα κοπτικά συρόμενου τύπου είναι αποδοτικότερα έναντι των κοπτικών τύπου δίσκου. Αυτό οφείλεται στον αποδοτικότερο μηχανισμό με τον οποίο προκαλούν αστοχία στο πέτρωμα. Σε υψηλές όμως αντοχές του πετρώματος φθείρονται ευκολότερα, χάνουν τα αρχικά τους χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν αποδοτικά και επομένως γίνονται μη αποτελεσματικά.

Πίνακας 2.1: Καταλληλότητα κοπτικών εργαλείων βάσει της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (κατά Kramadibrata από Αναγνώστου 2006).

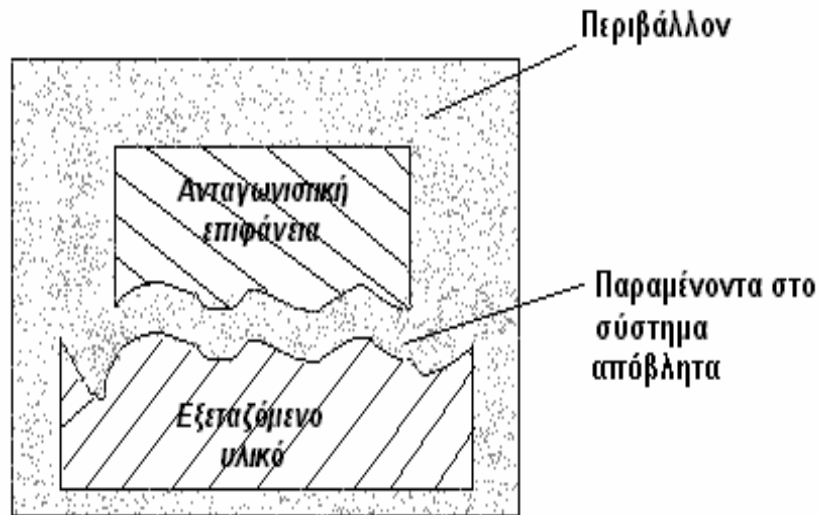
Κοπτικό εργαλείο	UCS (MPa)
Τύπου σφήνας	<20
Σημειακής προσβολής	<125
Τύπου δίσκου	125-240
Τύπου δίσκου με κομβία	>240

2.2 Στοιχεία τριβολογίας

Τριβολογία ονομάζεται η επιστήμη που μελετά τα φαινόμενα και τους μηχανισμούς που αναπτύσσονται κατά τη σχετική κίνηση δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Ασχολείται κυρίως με τρία θέματα: την τριβή, τη φθορά και τη λίπανση. Η πρώτη είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αντιμετωπίζεται από τη μηχανική και έγκειται στο γεγονός ότι οι πραγματικές επιφάνειες παρουσιάζουν ανωμαλίες (εξοχές και εσοχές) οι οποίες εκφράζονται συνήθως με τον όρο της τραχύτητας. Η λίπανση στον τομέα εξόρυξης πετρωμάτων δεν αποτελεί κύριο παράγοντα. Αντίθετα η αντοχή στη φθορά λόγω τριβής ενός υλικού αποτελεί τον κύριο παράγοντα μελέτης.(Φαφούτης, 2008)

2.2.1 Φθορά κοπτικών

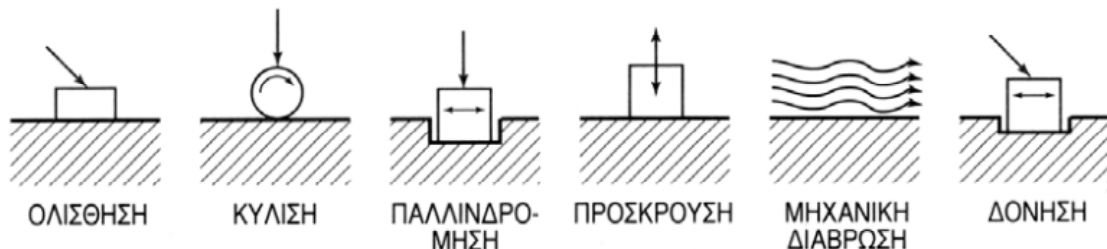
Με τον όρο φθορά περιγράφεται η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού από το ένα ή και από τα δύο σώματα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση. Η φθορά ενός υλικού οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό ενός υλικού. Η φθορά ενός υλικού εξαρτάται από όλα τα στοιχεία του τριβοσυστήματος τα οποία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, είναι: α) το εξεταζόμενο υλικό, β) το υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) ως προς το οποίο μελετάται η φθορά του εξεταζόμενου, γ) τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα της φθοράς και δ) το περιβάλλον (υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση κλπ.)



Σχήμα 2.7: Συστατικά μέρη ενός τριβοσυστήματος (Φαφούτης 2008)

Οι κύριες ομάδες τύπων φθοράς των υλικών είναι οι εξής:

- Ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, διακρίνονται σε:



Σχήμα 2.8: Κατηγορίες φθοράς διεπιφανειών ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης (Φαφούτης 2008).

α) φθορά λόγω ολίσθησης παρατηρείται όταν οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη με ή χωρίς την παρουσία στη διεπιφάνεια αποξεστικών σωματιδίων ή λιπαντικού.

β) φθορά λόγω κύλισης συναντάται κατά την κύλιση μιας σφαίρας ή ενός κυλίνδρου σε μια στερεή επιφάνεια

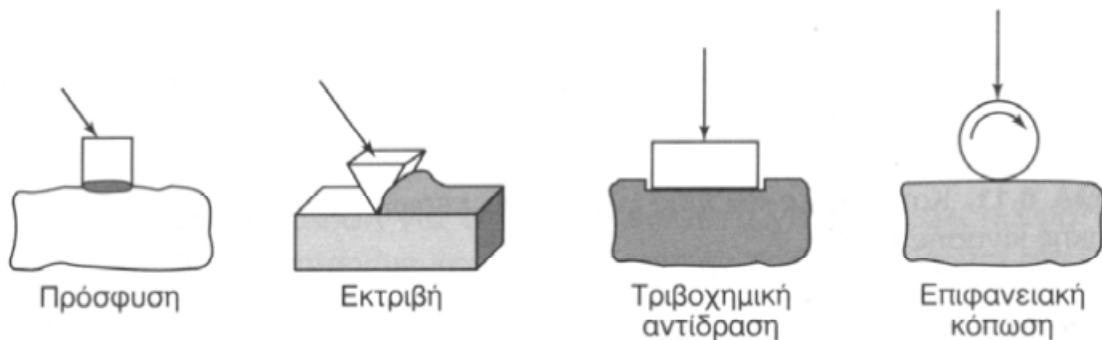
γ) Η φθορά λόγω παλινδρόμησης οφείλεται σε παλινδρομικές κινήσεις υψηλής συχνότητας και μικρής έντασης.

δ) Η φθορά λόγω πρόσκρουσης προκαλεί καταστροφή της επιφάνειας, λόγω πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων, σταγόνων ή υγρών εκτοξευμάτων. Η παρουσία ηλεκτρολυτών επιταχύνει τη φθορά του μεταλλικού υλικού, λόγω της σύνδρομης δράσης φαινομένων χημικής διάβρωσης.

ε) Η φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης προκαλείται στην επιφάνεια του υλικού από στερεά σωματίδια, μεταφερόμενα από κάποιο ρευστό, υγρό ή αέριο.

στ) Η φθορά λόγω δόνησης προκαλείται στις διεπιφάνειες των υλικών σε επαφή όταν αυτά υποβάλλονται σε ταυτόχρονη φόρτιση παλινδρόμησης και ολίσθησης. Στις κατ' αυτόν τον μηχανισμό φθειρόμενες επιφάνειες εμφανίζονται εσοχές και κοιλότητες οι οποίες περιβάλλονται από τα προϊόντα της φθοράς.

- Ανάλογα με το μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς διακρίνονται οι εξής τύποι φθοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9 :

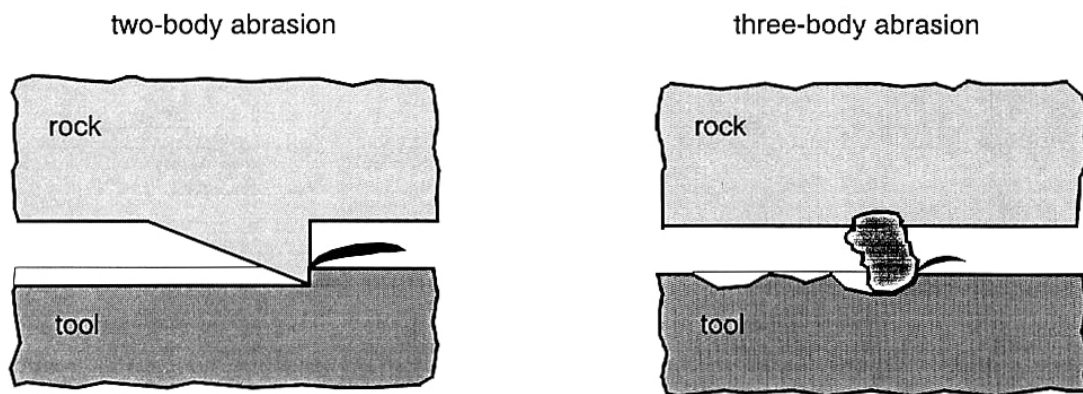


Σχήμα 2.9: Μηχανισμοί φθοράς (Φαφούτης 2008)

α) Φθορά λόγω πρόσφυσης παρατηρείται όταν δύο ομαλές επιφάνειες ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη, ενώ τμήματα της μιας αποκόβονται και προσφύονται στην άλλη. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, μεταξύ των ατόμων στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που βρίσκονται σε επαφή, εμφανίζονται δυνάμεις πρόσφυσης και αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί, οι οποίοι καταστρέφονται και επαναδημιουργούνται. Με τον τρόπο αυτό, τμήματα του ενός υλικού μεταφέρονται

στο άλλο και στη συνέχεια αποβάλλονται ως παραπροϊόντα της διεργασίας επαφής.

β) Φθορά λόγω εκτριβής προκαλείται όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια, τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό υλικό, είτε τα προϊόντα φθοράς των δύο επιφανειών. Πιο αναλυτικά, υπάρχουν δύο γενικές περιπτώσεις φθοράς εκτριβής, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.10. Στην πρώτη περίπτωση η σκληρή επιφάνεια είναι αυτή με την υψηλότερη σκληρότητα μεταξύ δύο επιφανειών τριβής (εκτριβή δύο σωμάτων). Στη δεύτερη περίπτωση, η σκληρή επιφάνεια είναι ένα τρίτο σώμα (σωματίδιο), που βρίσκεται μεταξύ των δύο άλλων επιφανειών και είναι αρκετά σκληρό ώστε να προκαλέσει εκτριβή σε τουλάχιστον μία από τις επιφάνειες (εκτριβή τριών σωμάτων).



Σχήμα 2.10: Περιπτώσεις φθοράς εκτριβής (Deketh 1995)

γ) Λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων, είναι δυνατόν να παραχθούν στη διεπιφάνεια επαφής προϊόντα διαφορετικής χημικής σύστασης από τα υλικά που βρίσκονται σε επαφή.

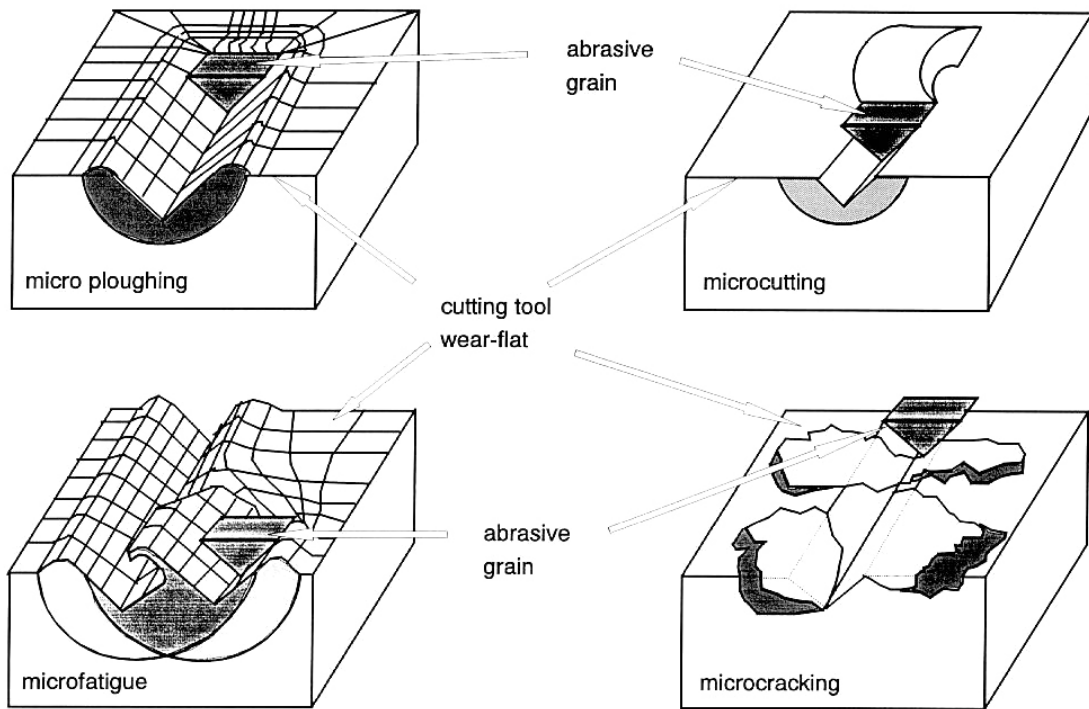
δ) Ο μηχανισμός της επιφανειακής κόπωσης οδηγεί σε επιφανειακή ρωγμάτωση του υλικού, εξαιτίας κυκλικών φορτίσεων.

Οι μηχανισμοί φθοράς, που μόλις αναφέρθηκαν, παρατηρούνται εύκολα εξετάζοντας ένα χρησιμοποιημένο κοπτικό, αν και πολλές φορές ένας μηχανισμός φθοράς είναι δυνατόν να καλύπτει άλλους. Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι, προσπάθειες για μείωση μιας μορφής φθοράς έχει συνήθως ως αποτέλεσμα την εμφάνιση στο κοπτικό μιας άλλης μορφής φθοράς. Επομένως, τα κοπτικά θα

πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, κατά περίπτωση, να επιτυγχάνονται τα βέλτιστα αποτελέσματα.

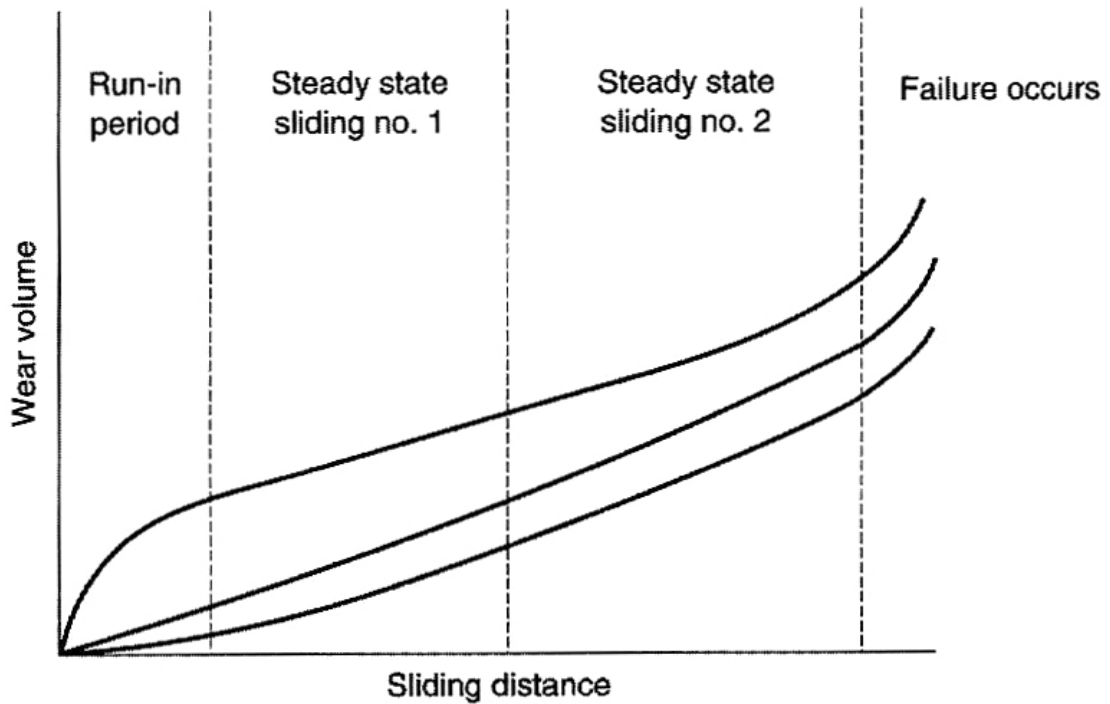
Η φθορά εκτριβής αποτελεί τον συνηθέστερο μηχανισμό φθοράς των κοπτικών, ο οποίος δεν είναι δυνατόν να απομονωθεί αλλά τις περισσότερες φορές υπερισχύει έναντι των άλλων. Η λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11, έχει ως εξής :

- Αρχικά η μαλακότερη επιφάνεια (υλικό κοπτικού) χαράσσεται από το αποξεστικό υλικό (π.χ. κόκκος χαλαζία), το οποίο κατά τη διαδρομή του εκτοπίζει υλικό στις άκρες.
- Στη συνέχεια παρατηρείται επιφανειακή ρωγμάτωση και αποκόλληση μικρών τεμαχίων.
- Εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων που δρουν, οι ρωγμές διευρύνονται και έχουμε αποκόλληση ή και θραύση μεγάλων τεμαχίων μετάλλου.
- Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ολίσθησης προωθούν την περαιτέρω ρωγμάτωση, λόγω κόπωσης, του κοπτικού.



Σχήμα 2.11: Τύποι φθοράς κοπτικών (Deketh 1995)

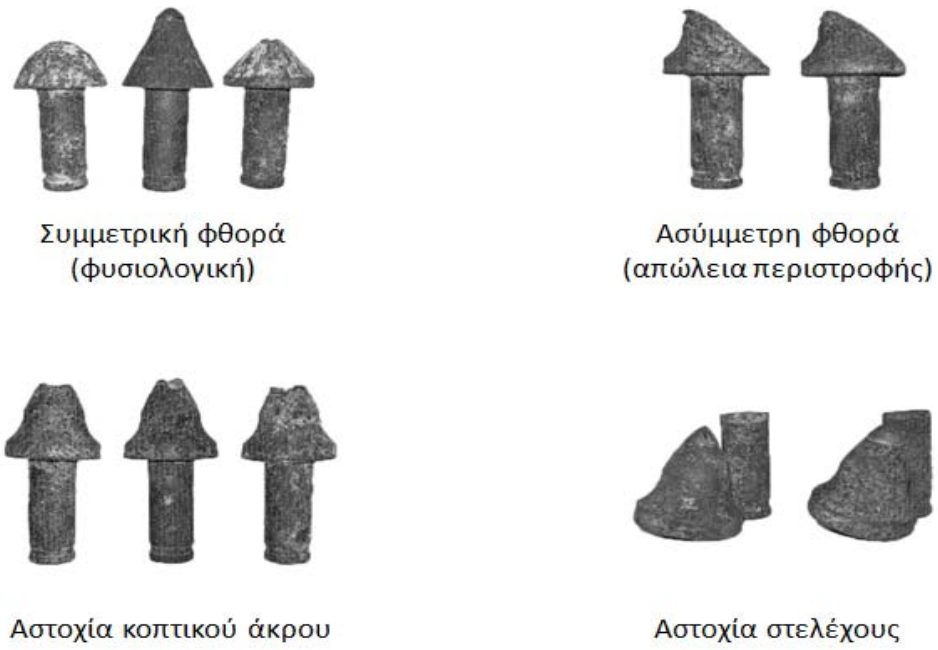
Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται το μέγεθος της φθοράς ως συνάρτηση του μήκους κοπής



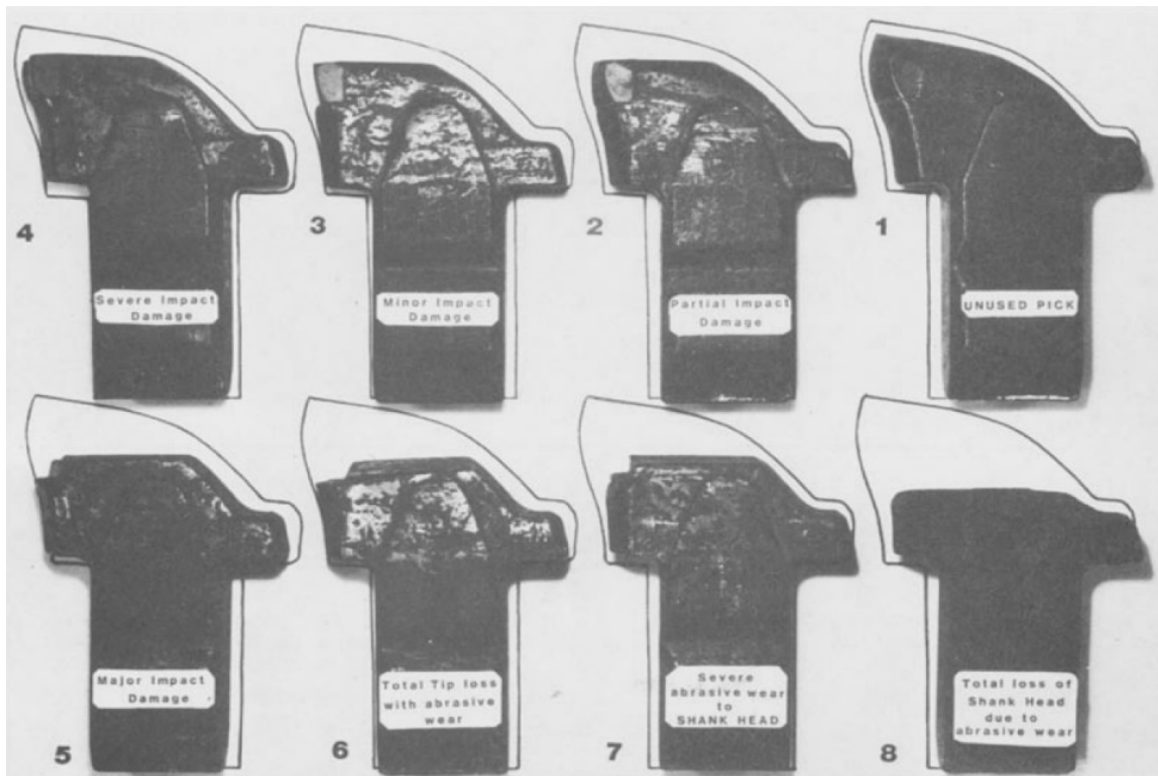
Σχήμα 2.12: Η φθορά ως συνάρτηση του μήκους κοπής (Bhusan 2013).

Στα Σχήματα 2.13, 2.14 και 2.15 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις φθοράς κοπτικών δίσκου, σημειακής προσβολής και ακτινικών κοπτικών αντίστοιχα.

Σχήμα 2.13: Φθορά κοπτικών δίσκου (Frenzel 2009)



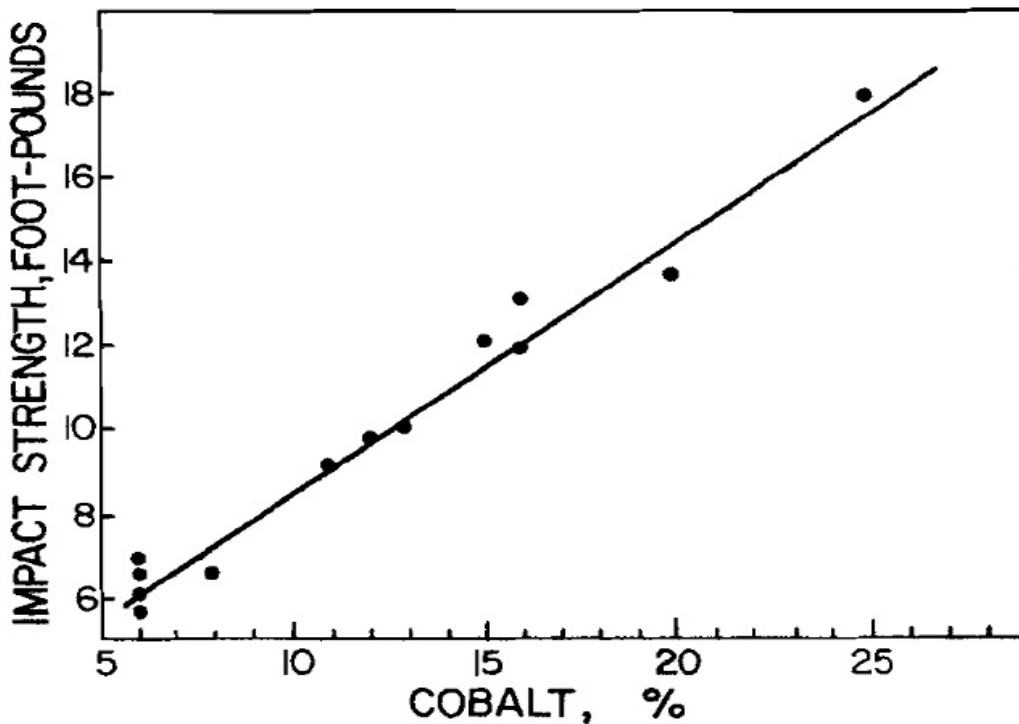
Σχήμα 2.14: Φθορά κοπτικών σημειακής προσβολής (Bilgin et al. 2014)



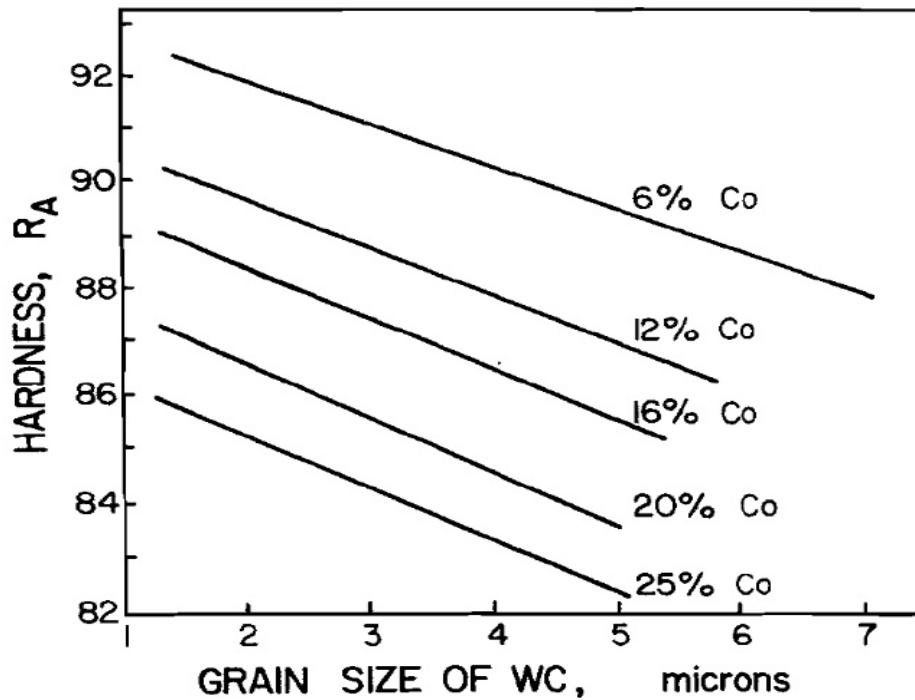
Σχήμα 2.15: Φθορά ακτινικών κοπτικών (Atkinson et al. 1986)

2.2.2 Υλικά κοπτικών και ιδιότητες

Τα κοπτικά συρόμενου τύπου, συνήθως, αποτελούνται από καρβίδιο βολφραμίου (tungsten carbide-WC) το οποίο συνδέεται με ποσότητα κοβάλτιου. Το καρβίδιο βολφραμίου είναι ένα πολύ σκληρό και ψαθυρό υλικό. Χρησιμοποιώντας όμως το κοβάλτιο σαν συνδετικό υλικό των κόκκων WC κατασκευάζονται κοπτικά που συνδυάζουν την σκληρότητα και την ανθεκτικότητα. Η περιεκτικότητα σε κοβάλτιο είναι πολύ σημαντική γιατί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16, να μεν προσδίδει στο κοπτικό εργαλείο την απαραίτητη ανθεκτικότητα αλλά, όπως δείχνει το Σχήμα 2.17, μειώνει εμφανώς τη σκληρότητα. Τα συνήθη κοπτικά περιέχουν 5-12% κατά βάρος Co και 88-95% κατά βάρος κόκκους WC μεγέθους 1-6μm. Κοπτικό που αποτελείται από 6% κατά βάρος Co και 94% κατά βάρος WC έχει σκληρότητα περίπου 1450HV.

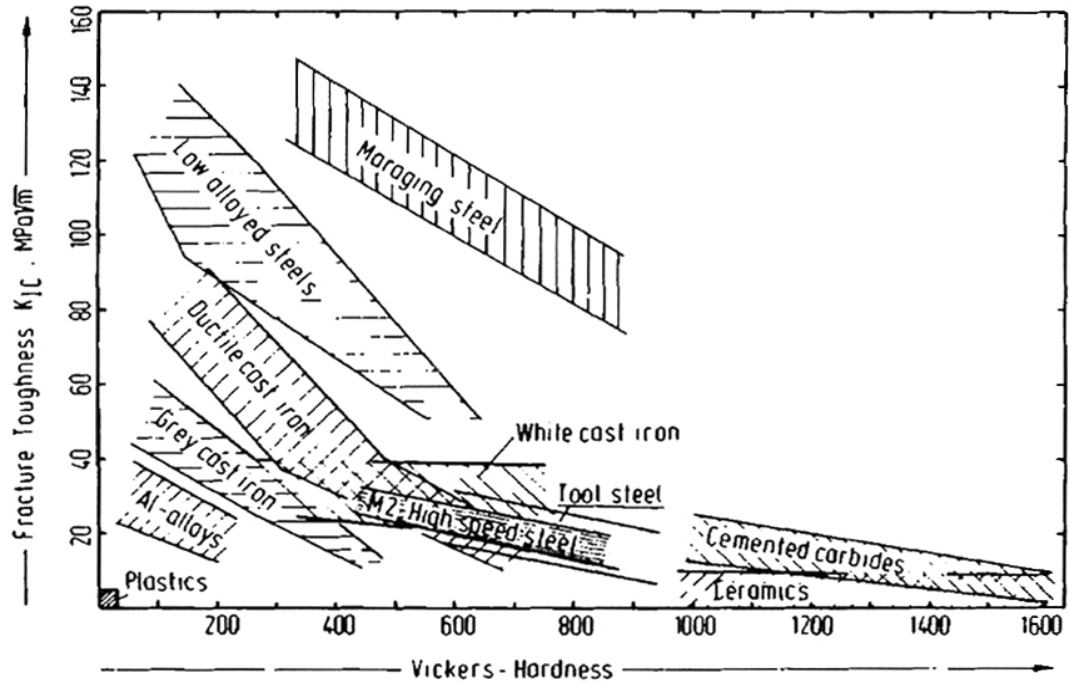


Σχήμα 2.16: Συνάρτηση αντοχής σε κρούση-περιεκτικότητας σε Co (Clark 1987)



Σχήμα 2.17: Συνάρτηση σκληρότητας-κόκκου WC και περιεκτικότητα σε Co (Clark 1987)

Τα κοπτικά δίσκου, συνήθως, είναι κατασκευασμένα από ανοξειδωτους χάλυβες υψηλής σκληρότητας και αντοχής για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες ή αλλιώς High-speed steel (HSS). Μια τυπική σύσταση HSS περιέχει 18% βολφράμιο, 4% χρώμιο, 1% βανάδιο, 0.7% άνθρακα και το υπόλοιπο είναι σίδηρος. Οι χάλυβες HSS έχουν σκληρότητα 62-64 HRC. Η προσθήκη 5-8% κοβάλτιου προσδίδει αντοχή και αντίσταση στη φθορά. Αν και έχουν μικρότερη σκληρότητα έναντι των κοπτικών από καρβίδιο βολφραμίου και του χαλαζία, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.18 και στον Πίνακα 2.2, αντίστοιχα, υπερτερούν στην αντοχή στις δυνάμεις κοπής και έχουν αρκετά χαμηλότερο κόστος. Δύο τυπικά κοπτικά δίσκου φαίνονται στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.18: Σχέση σκληρότητας- δυσθραυστότητας για διάφορα υλικά (Zum Gahr 1987)



Σχήμα 2.19: Κοπτικά δίσκου (www.rock-cutters.com 2014)

Πίνακας 2.2: Σκληρότητα ορυκτών (Deketh 1995)

Mineral	Hardness			
	Vickers	Mohs	Rosival	
Talc	20	1	0.3	
Halite or Gypsum	50	2	1.25-2	softer than fingernail
Calcite	125	3	4.5	harder than fingernail
Fluorite	130	4	5	
Apatite	550	5	6.5-8	equivalent to copper coin
Feldspar	750	6	37	equivalent to windowglass
Quartz	1000	7	120	equivalent to penknife
Topaz	1850	8	175	equivalent to hard file
Corundum	2300	9	1000	
Diamond	10060	10	140000	

2.3 Εργαστηριακή εκτίμηση αποξεστικότητας πετρωμάτων

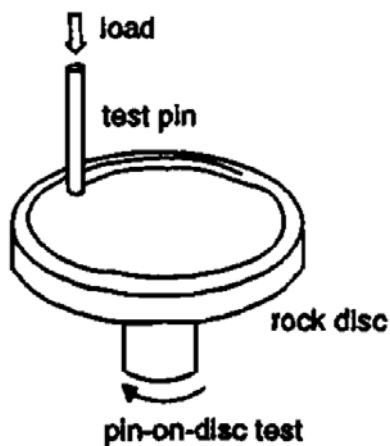
Αν και είναι πολύ σύνηθες να χαρακτηρίζεται ένα πέτρωμα αποξεστικό, η αποξεστικότητα ως μέγεθος μένει πολλές φορές κάπως αόριστο. Η αποξεστικότητα αποτελεί μια ιδιότητα αλληλεπίδρασης. Αν ένα πέτρωμα είναι αποξεστικό εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του πετρώματος όσο και από τις ιδιότητες του κοπτικού εργαλείου και από τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης κατά τη διάρκεια της κοπής.

Ο συνηθέστερος τρόπος προσέγγισης και εκτίμησης της αποξεστικότητας ενός πετρώματος είναι η εκτέλεση δοκιμών σε κατάλληλα δοκίμια του πετρώματος και μέτρηση της φθοράς που προκαλούν στο υλικό των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή. Στη συγκεκριμένη εργασία επικεντρωνόμαστε στις τέσσερις πιο διαδεδομένες δοκιμές:

- Δείκτης F κατά Schimazek
- Δοκιμή Cerchar και δείκτης CAI
- Νορβηγικές δοκιμές AV/AVS/SAT
- Δοκιμή LCPC Abroy και δείκτης ABR

2.3.1 Δείκτης F κατά Schimazek

Το 1970 ο Schimazek με τους συνεργάτες του διεξήγαγαν μια δοκιμή όπου μια ακίδα χάραζε ένα δοκίμιο μορφοποιημένο σε δίσκο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20, και στη συνέχεια υπολογιζόταν το υλικό που έχανε η ακίδα κατά την επαφή της με το πέτρωμα (Bilgin et al 2014).



Σχήμα 2.20: Δοκιμή ακίδας-δίσκου (Verhoef 1997)

Ύστερα από δοκιμές σε τεχνητά υλικά (σκυρόδεμα) αλλά και πετρώματα, συγκρίνοντας την μετρηθείσα απώλεια υλικού της ακίδας με την εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου, το μέγεθος του κόκκου και την περιεκτικότητα σε χαλαζία δεν διαπιστώθηκε κάποια σχέση μεταξύ τους, αλλά παρατηρήθηκε ότι το γινόμενο των παραπάνω παραγόντων έχει γραμμική σχέση με την απώλεια υλικού. Το συγκεκριμένο γινόμενο ονομάστηκε παράγοντας φθοράς "F", ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$F = Q \cdot d \cdot \sigma_t$$

όπου

Q: η ισοδύναμη κ.ο. εκατοστιαία περιεκτικότητα χαλαζία

d: το μέσο μέγεθος των κόκκων χαλαζία (cm)

σ_t : η εφελκυστική αντοχή (kgf/cm²)

Με γνωστή τη σύσταση του πετρώματος, εφαρμόζεται για κάθε συστατικό του το παραπάνω γινόμενο με βάση τον Πίνακα 2.3 και την εφελκυστική αντοχή που προκύπτει από τη δοκιμή Brazilian. Το άθροισμα των γινομένων δίνει την τιμή F του πετρώματος.

Πίνακας 2.3: Ισοδύναμη περιεκτικότητα χαλαζία (Bilgin et al. 2014).

Ισοδύναμη περιεκτικότητα χαλαζία	
1	Χαλαζίας
0.35	Άστριοι
0.04	Αργιλικά ορυκτά
0.03	Ασβεστίτης

Η κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων σύμφωνα με την τιμή F αλλά και η εκτίμηση την κατανάλωσης των κοπτικών φαίνεται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Η κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων σύμφωνα με την τιμή F αλλά και η εκτίμηση την κατανάλωσης των κοπτικών (Bilgin et al. 2014)

Conical Cutter Consumption Based on the Shimazek *F* Index

Schimazek <i>F</i> Value (N/mm)	Rock Abrasiveness	Cutter Consumption (m ³ /cutter)
<i>F</i> less than 0.05	Nonabrasive	90–110
<i>F</i> = 0.05–0.07	Low abrasive	50–90
<i>F</i> = 0.07–1.0	Abrasive	30–50
<i>F</i> = 1.0–1.05	Very abrasive	10–30
<i>F</i> larger than 1.05	Very hard and abrasive	1–10

Οι Schimazek και Knatz προτείνουν μια κρίσιμη ταχύτητα, η οποία έχει σχέση με την τιμή F , πέραν της οποίας παρατηρείται έντονη φθορά του κοπτικού εργαλείου.

Η κρίσιμη ταχύτητα κοπτικού δίνεται από την σχέση:

$$V_{crit} = \frac{k}{e^F}$$

όπου V_{crit} σε m/s και k σταθερά εξαρτώμενη από το κοπτικό (γεωμετρία και κρίσιμη θερμοκρασία) με τυπική τιμή 8.4.

2.3.2 Δείκτης CAI

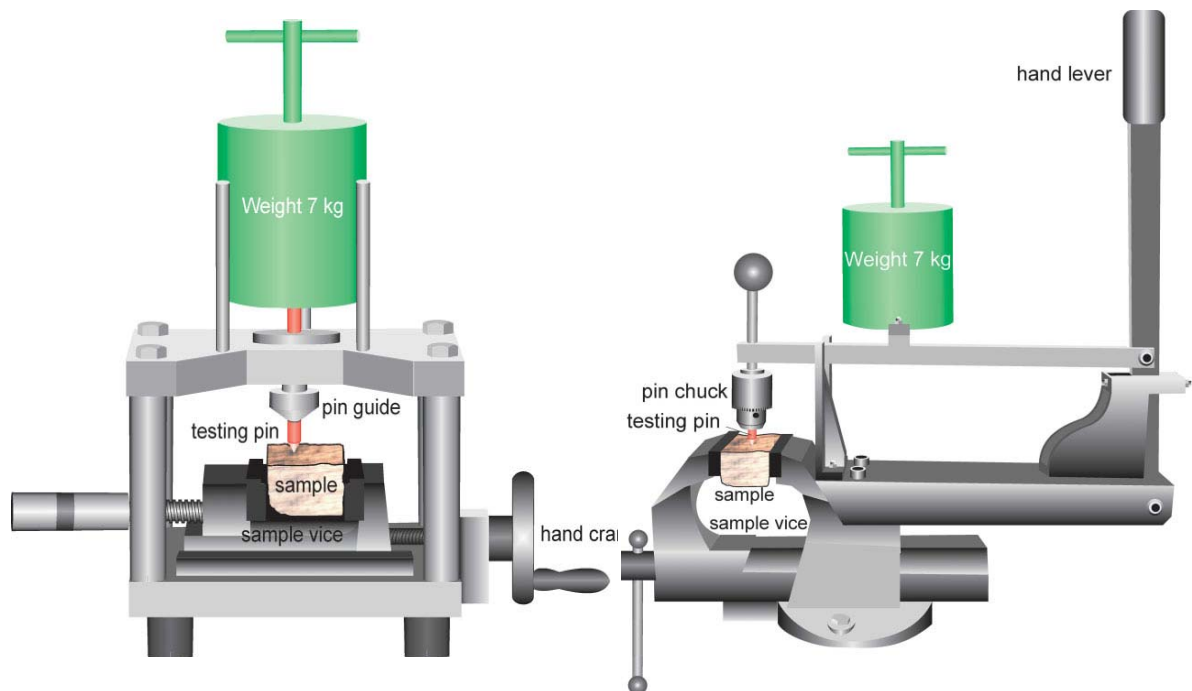
Η δοκιμή Cerchar και ο δείκτης CAI αναπτύχθηκαν πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970 από το Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages (CERCHAR) de France. Μία πρώτη επίσημη περιγραφή δίδεται από το γαλλικό πρότυπο NFP 94-430-1. Ο δείκτης CAI αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε γαλλικά και βρετανικά ανθρακωρυχεία και σταδιακά προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις της κατασκευής σηράγγων.

Διάφορες εκδοχές της δοκιμής Cerchar είναι διαθέσιμες. Σε όλες τις δοκιμές όμως χρησιμοποιούνται μια μέγγενη, η οποία συγκρατεί το δείγμα, ενώ μια ακίδα από χάλυβα και κωνική κεφαλή 90° χαράσσει το δοκίμιο υπό την πίεση φορτίου 70N. Η κίνηση της ακίδας γίνεται με τη βοήθεια ενός μοχλού, ο οποίος επιτρέπει στην ακίδα να χαράξει το δείγμα, υπό συνεχή φόρτιση, για 10mm. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή είναι η πρωτότυπη συσκευή Cerchar και η τροποποιημένη συσκευή "West", οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.21. Με βάση τη φθορά και επομένως την αλλοίωση του σχήματος της κωνικής άκρης της ακίδας υπολογίζεται ο CAI και κατηγοριοποιείται το πέτρωμα με βάση την αποξεστικότητα του, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5. Πιο συγκεκριμένα, ο CAI υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο και μετρώντας την απώλεια υλικού από την άκρη της ακίδας σε 1/10 mm. Χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη CAI παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.22.

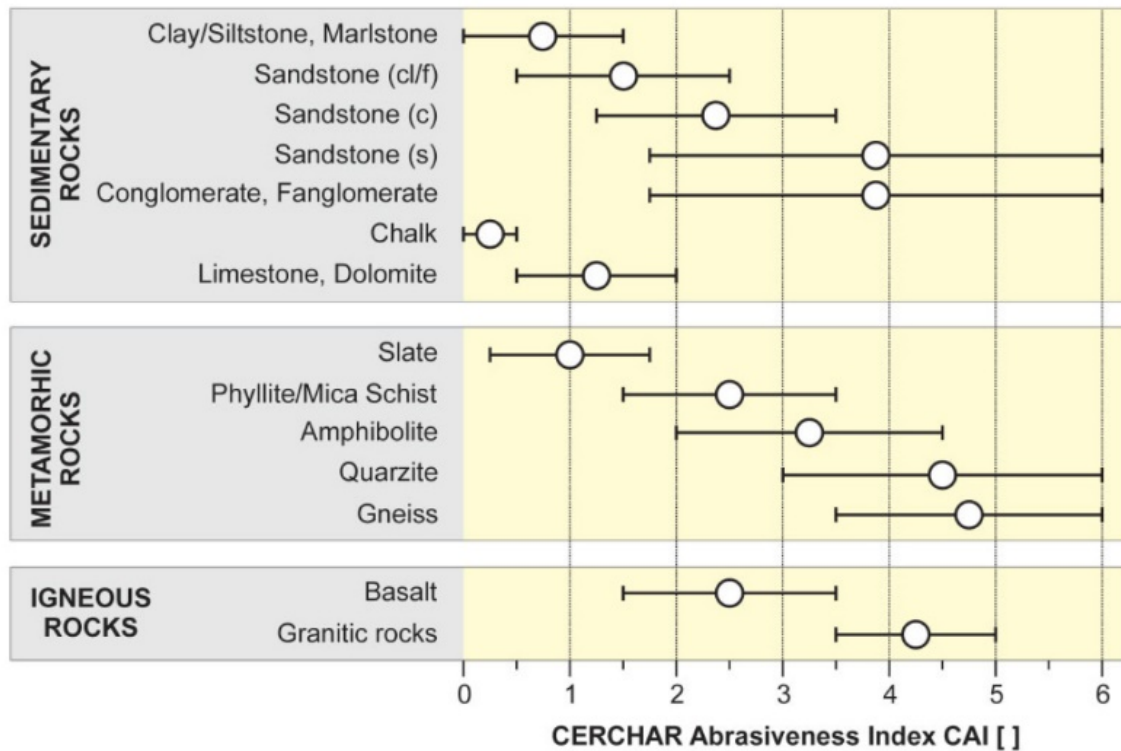
Η δοκιμή είναι πλέον ευρείας αποδοχής καθώς προσομοιώνει την αλληλεπίδραση του βράχου με το κοπτικό εργαλείο στα ίδια επίπεδα τάσης όπως αυτά που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Έτσι λοιπόν συνδυάζει μια σειρά από χαρακτηριστικά όπως η ταχύτητα, η λειτουργικότητα και η αντιπροσωπευτικότητα της εκσκαφής.

Πίνακας 2.5: Κατάταξη πετρωμάτων με βάση τον δείκτη αποξεστικότητας (ISRM 2013)

Κατάταξη	Δείκτης Cerchar (CAI)
Ελάχιστο αποξεστικό	0.1 - 0.4
Πολύ λίγο αποξεστικό	0,5 – 0,9
Λίγο αποξεστικό	1,0 – 1,9
Μετρίως αποξεστικό	2,0 – 2,9
Πολύ αποξεστικό	3,0 - 3,9
Πάρα πολύ αποξεστικό	4,0 - 4,9
Εξαιρετικά αποξεστικό	≥5



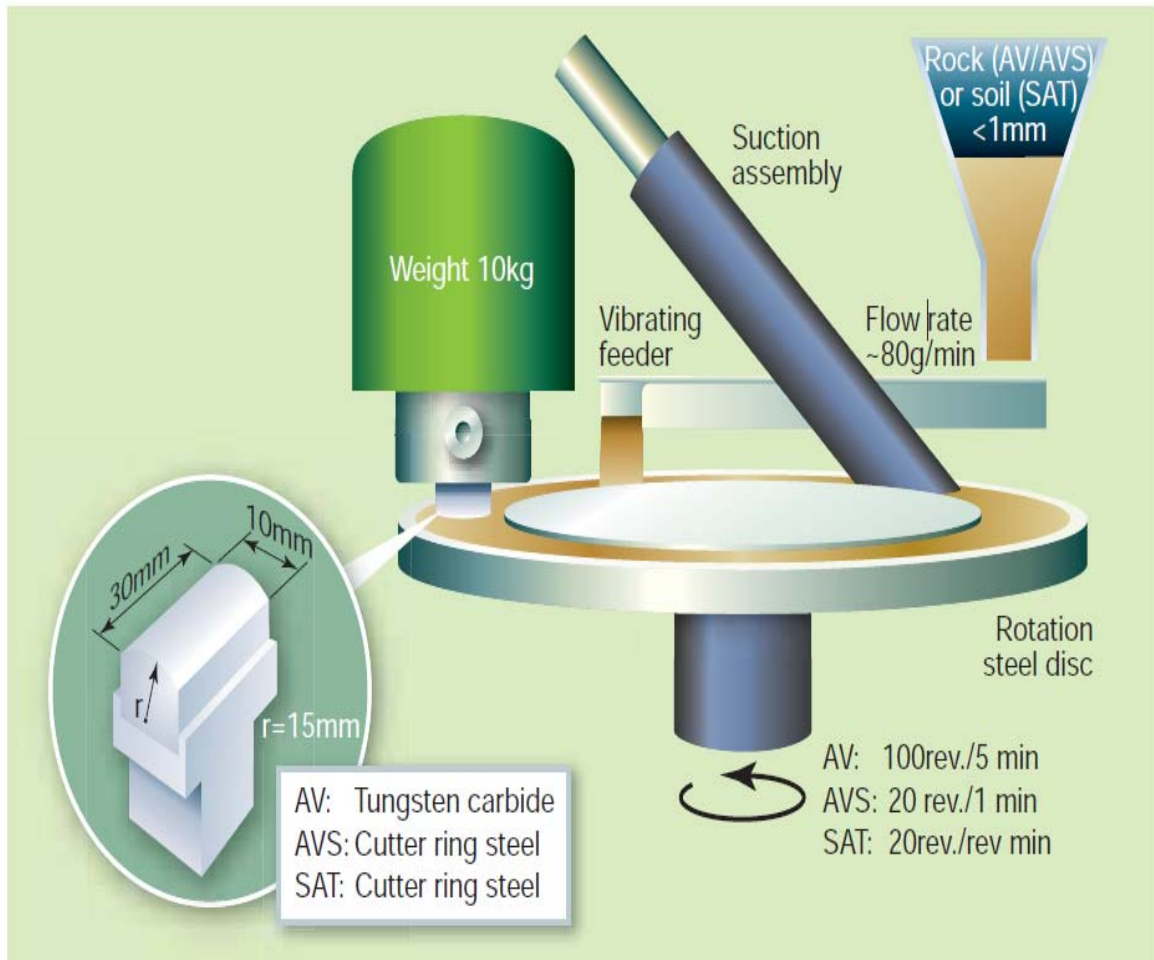
Σχήμα 2.21: Πρωτότυπη συσκευή Cerchar (δεξιά) και Τροποποιημένη συσκευή "West" (αριστερά) (Plinninger 2008)



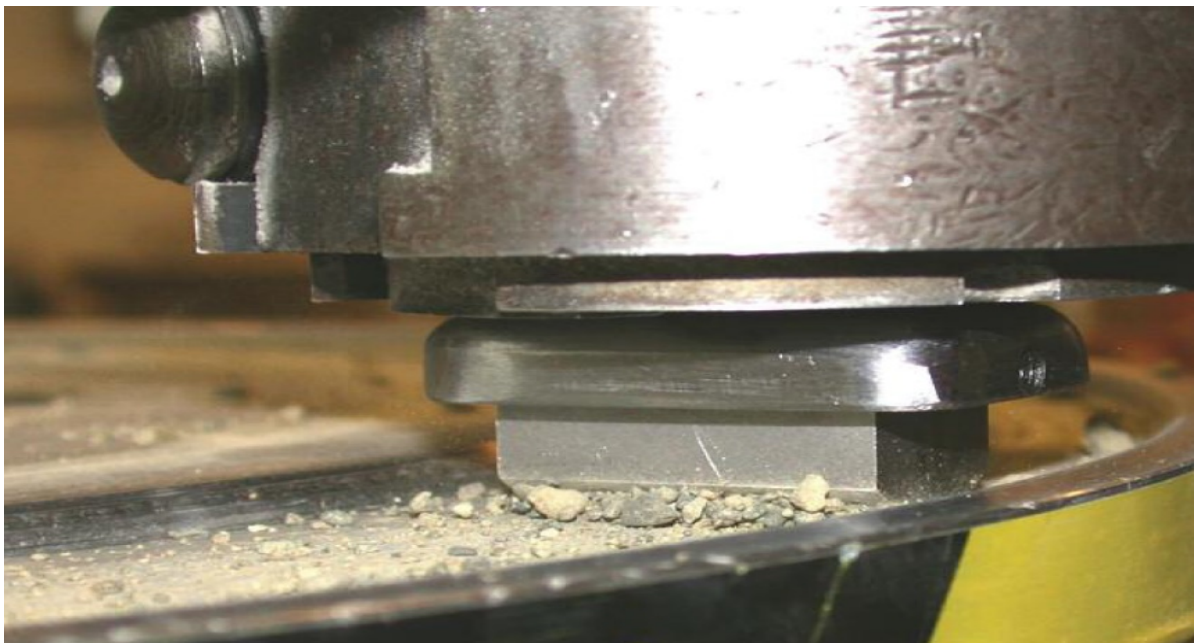
Σχήμα 2.22: Τυπικές τιμές CAI (Plinninger 2008)

2.3.3 Νορβηγικές δοκιμές AV/AVS/SAT

Οι δοκιμές του Norwegian University of Science and Technology NTNU του Trondheim, AV (Abrasion Value), AVS (Abrasion Value Steel) και SAT (Soil Abrasion Test) χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της φθοράς κοπτικών για διάφορες μεθόδους εκσκαφής, από γεώτρηση μέχρι TBM κλειστού τύπου (Nilsen 2006). Οι δοκιμές γίνονται σε συνδυασμό με δύο άλλες δοκιμές, τη δοκιμή ψαθυρότητας "Brittleness test" και την πρότυπη δοκιμή διάτρησης "Siever's-J miniature drilling test". Οι δοκιμές AV, AVS και SAT είναι παρόμοιες δοκιμές που βασίζονται στην περιστροφή ενός χαλύβδινου δίσκου, ο οποίος μεταφέρει το υλικό του δείγματος, το οποίο αποτελείται από θρύμματα <math><1\text{mm}</math> τα οποία φθείρουν καθώς περνούν ένα κομμάτι καρβιδίου βολφραμίου (για τη δοκιμή AV) ή χάλυβα (για τις δοκιμές AVS και SAT) κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φορτίου, διάρκειας και ταχύτητας περιστροφής. Στο Σχήμα 2.23 και στο Σχήμα 2.24 απεικονίζεται η δοκιμή και ο εξοπλισμός.



Σχήμα 2.23: Απεικόνιση της δοκιμής αποξυστικότητας NTNU (Nilsen 2006)



Σχήμα 2.24: Εικόνα κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Jakobsen et al. 2012)

Οι Πίνακες 2.6 και 2.7 δείχνουν την κατηγοριοποίηση της αποξεστικότητας των πετρωμάτων με βάση τη φθορά που προκαλούν στο καρβίδιο του βολφραμίου(AV) και τη φθορά σε χάλυβα(AVS), αντίστοιχα.

Πίνακας 2.6: Κατάταξη της αποξεστικότητας των πετρωμάτων με βάση το AV (Dahl et al. 2012)

Category – abrasion on tungsten carbide	AV (mg)	Cumulative percentage (%)
Extremely high	≥ 58.0	95–100
Very high	42.0–57.9	85–95
High	28.0–41.9	65–85
Medium	11.0–27.9	35–65
Low	4.0–10.9	15–35
Very low	1.1–3.9	5–15
Extremely low	≤ 1.0	0–5

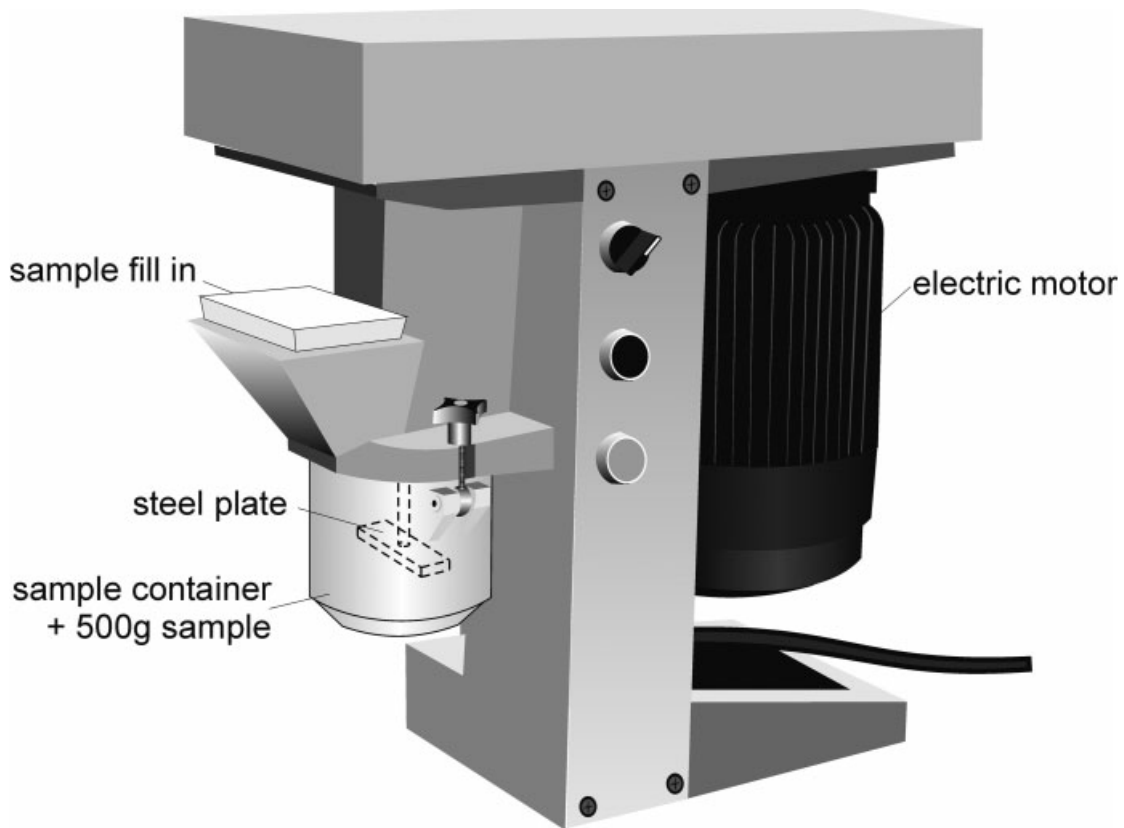
Πίνακας 2.7 Κατάταξη της αποξεστικότητας των πετρωμάτων με βάση το AVS (Dahl et al. 2012)

Category – abrasion on cutter steel	AVS (mg)	Cumulative percentage (%)
Extremely high	≥ 44.0	95–100
Very high	36.0–44.0	85–95
High	26.0–35.9	65–85
Medium	13.0–25.9	35–65
Low	4.0–12.9	15–35
Very low	1.1–3.9	5–15
Extremely low	≤ 1.0	0–5

2.3.4 Δοκιμή LCPC Abroy

Η δοκιμή αποξεστικότητας του Laboratoire des Ponts et Chaussees (LCPC) είναι μία επιπλέον μέθοδος μέτρησης της αποξεστικότητας βράχων και εδαφών. Η δοκιμή περιγράφεται και από το γαλλικό πρότυπο AFNOR P18-579. Η συσκευή αποτελείται από ένα κινητήρα 750W, ο οποίος περιστρέφει ένα χαλύβδινο αναδευτήρα με ρυθμό 4500rpm για 5min. Το δείγμα βάρους 500±2g αποτελείται από θρύμματα μεγέθους 4-6.3mm. Ο αναδευτήρας είναι διαστάσεων 50×25×5mm και αντικαθίσταται έπειτα από κάθε δοκιμή. Επίσης πρέπει να ζυγίζεται πριν και

μετά τη δοκιμή. Είναι απαραίτητο επίσης να συγκρίνεται η κοκκομετρία του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή.



Σχήμα 2.25: Συσκευή LCPC Abroy (Plinninger 2008)

Ο βαθμός απώλειας βάρους της χαλύβδινης πλάκας που συνιστά τον αναδευτήρα, μετρούμενος σε gr/ton, λαμβάνεται υπόψη ως ένας δείκτης αποξεστικότητας (ABR) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$ABR = \frac{(P_0 - P)}{G_0}$$

όπου:

P_0 : το βάρος της πλάκας πριν τη δοκιμή (g)

P : το βάρος της πλάκας μετά τη δοκιμή (g)

G_0 : το βάρος του δείγματος (t)

Η ταξινόμηση με βάση την αποξεστικότητα για τη δοκιμή LCPC φαίνεται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8: Ταξινόμηση αποξεστικότητας βασισμένη στη δοκιμή LCPC (Plinninger 2008)

ABR (g/t)	Βαθμός αποξεστικότητας
0-500	Πολύ χαμηλός
500-1000	Χαμηλός
1000-1500	Μέσος
1500-2000	Υψηλός
>2000	Πολύ υψηλός

2.4 Μοντέλα εκτίμησης χρόνου ζωής κοπτικών

Όπως προαναφέρθηκε, η σωστή εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κοπτικών εργαλείων παίζει σημαντικό ρόλο για τη συνεχή και αποδοτική λειτουργία οποιουδήποτε έργου εξόρυξης. Για το σκοπό αυτό, έχουν προταθεί μια σειρά από μοντέλα εκτίμησης του χρόνου ζωής των κοπτικών. Μερικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται παρατίθενται παρακάτω.

Ο Lislrud (1997) προτείνει την παρακάτω σχέση, η οποία συσχετίζει το βήμα προχώρησης ενός μηχανήματος TBM και τη διάρκεια ζωής των κοπτικών.

$$L_{m3} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{L_h}{N} \right) AR$$

όπου:

L_{m3} : επίδοση κοπτικού [m³/cutter]

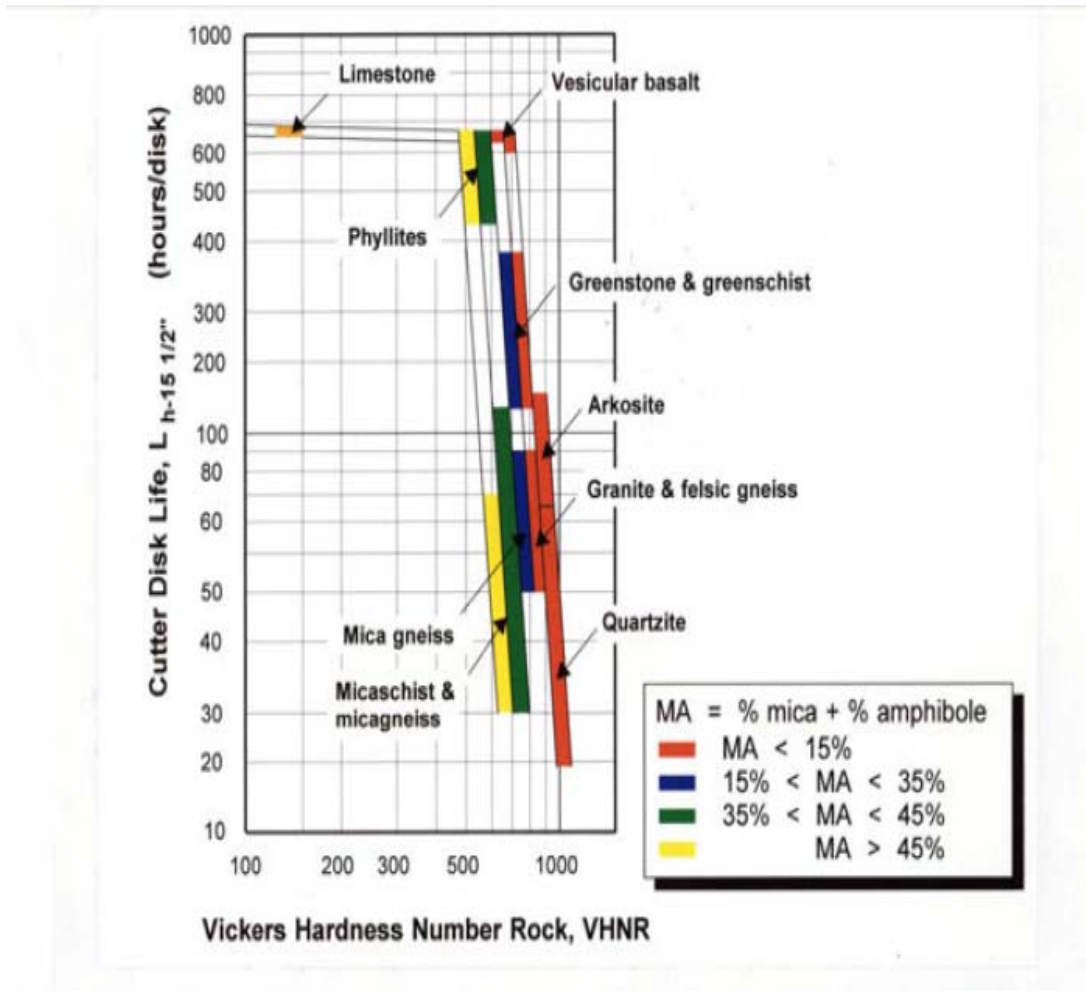
L_h : διάρκεια ζωής κοπτικού [h/cutter]

D : διάμετρος κεφαλής [m]

N : αριθμός κοπτικών στην κεφαλή

AR : βήμα προχώρησης μηχανήματος [m/h]

Ο Lislrud επισημαίνει ότι για την καλύτερη εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κοπτικών είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη τόσο το είδος και η σύσταση των ορυκτών όσο και η εναλλαγή από τα μαλακότερα σε σκληρότερα ορυκτά σε ένα πέτρωμα. Στο Σχήμα 2.26 αποτυπώνεται η διάρκεια ζωής των κοπτικών ενός TBM ανάλογα με την σκληρότητα των πετρωμάτων που συναντάει.



Σχήμα 2.26: Διάρκεια ζωής κοπτικών σε συνάρτηση με τη σκληρότητα πετρωμάτων (Lislrud 1997)

Σύμφωνα με τους 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 τους είναι αντιστρόφως ανάλογη του δείκτη CAI. Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής των δίσκων για TBM βράχου δίνεται από τη σχέση (Rostami et al. 2005):

$$LF = \frac{6,75D}{17CAI}$$

όπου:

LF: η διάρκεια ζωής των κοπτικών με βάση την απόσταση που λειτουργούν αποτελεσματικά [ft]

D : η διάμετρος της κεφαλής του TBM

CAI : δείκτης αποξεστικότητας κατά Cerchar

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

$$Hr = \frac{\#Rev}{60RPM}$$

όπου:

Hr : η διάρκεια ζωής του κοπτικού [h]

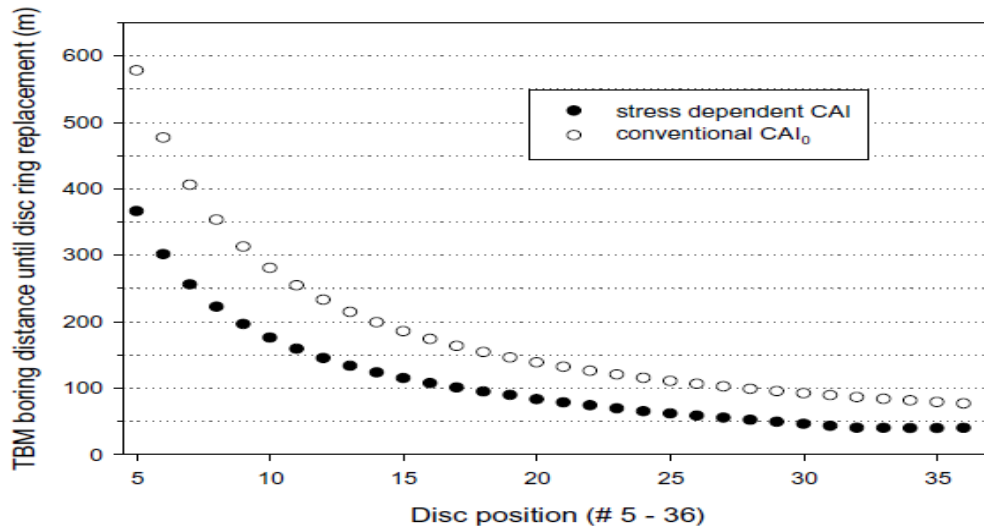
#Rev : ο αριθμός περιστροφών

RPM : ταχύτητα περιστροφής [#REV/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 σφάλματος, θα προκαλέσει ένα παρόμοιου μεγέθους σφάλμα 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 τον αντίκτυπο που έχουν στις επακόλουθες εκτιμήσεις (Rostami et al. 2005).

Ο Alber (2008) προσθέτει στη μελέτη του αντικειμένου, συνδέοντας την διάρκεια ζωής του κοπτικού με το τασικό πεδίο στη θέση εκσκαφής και με τη θέση του κοπτικού στην κεφαλή του TBM μιας και περιμετρικά του μετώπου αναπτύσσονται αρκετά μεγαλύτερες τάσεις απ' ότι στο κέντρο. Στο Σχήμα 2.27 φαίνεται ότι τα

κοπτικά κοντά στο κέντρο (π.χ. #5) αντικαθίστανται αραιότερα απ' ό τι τα κοπτικά στην περίμετρο της κεφαλής (π.χ. #36).



Σχήμα 2.27: Ωφέλιμο μήκος κοπήσκοπτικών σε σχέση με τη θέση τους στην κεφαλή ενός TBM (Alber 2008)

Ο Frenzel (2011) προτείνει ένα ακόμη μοντέλο εκτίμησης της διάρκειας ζωής των κοπτικών, το οποίο στηρίζεται σε δεδομένα από 7 έργα σηράγγων και 12000 αντικατεστημένους κοπτικούς δίσκους.

Σύμφωνα με τον Frenzel η διάρκεια ζωής του κοπτικού εξαρτάται και από παράγοντες όπως η αντοχή των τριβέων, των στεγανοποιητικών παρεμβυσμάτων, τις αστοχίες από τις κρούσεις κ.α. Λαμβάνοντας υπόψη και αυτούς τους παράγοντες η διάρκεια ζωής του κοπτικού μειώνεται έως και 62% σε σχέση με τη θεωρητική τιμή που βασίζεται αποκλειστικά στη απόξεση του κοπτικού δακτυλίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ CERCHAR

3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Suana και Peters (1981)

Στη δημοσίευση των Suana και Peters (1981) δίνεται πρώτη φορά έμφαση στη σχέση του δείκτη αποξεστικότητας (CAI) με την πετρογραφία, δηλαδή την ορυκτολογική σύσταση και τη δομή του πετρώματος.

Στην έρευνά τους παίρνουν υπόψη όλες τις μέχρι τότε κύριες αντιλήψεις για το τι είναι αποξεστικότητα και πως μπορεί αυτή να μετρηθεί άμεσα και οικονομικά. Ξεκινούν με την πλέον διαδεδομένη, έως και σήμερα, αντίληψη περί μέτρησης της αποξεστικότητας ενός πετρώματος, δηλαδή μετρώντας την φθορά του κοπτικού κατά την επαφή με το πέτρωμα. Λαμβάνουν όμως υπόψη και λιγότερο διαδεδομένους ορισμούς για την αποξεστικότητα όπως αυτός του Szlavin (1974), ο οποίος ορίζει την αποξεστικότητα σαν "τη μέση αύξηση ειδικής ενέργειας που απαιτείται για τη συνεχόμενη διάνοιξη οπών".

Με βάση τη μέχρι τότε θεωρία και τις διαθέσιμες μεθόδους μέτρησης της αποξεστικότητας προέβλεψαν ότι φθηνές και εύχρηστες μέθοδοι όπως η Cerchar θα επικρατούσαν μελλοντικά.

Στην προσπάθειά τους να προσδιορίσουν τη σχέση μεταξύ CAI και της ορυκτολογικής σύστασης των πετρωμάτων, οι Suana και Peters υπέθεσαν ότι γνωρίζοντας τον CAI για κάθε ορυκτό από το οποίο συνιστώνται τα πετρώματα είναι εφικτό να προσδιορισθεί μια θεωρητική τιμή του δείκτη CAI, η οποία συγκρινόμενη με την ήδη υπολογισμένη τιμή CAI για ένα πέτρωμα να υποδεικνύει την επιρροή σε αυτή και άλλων παραγόντων πέραν της ορυκτολογικής σύστασης.

Αρχικά μετρήθηκε ο δείκτης CAI για διάφορα δείγματα ορυκτών και μονοκρυσταλλικών πετρωμάτων, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1: Δείκτης CAI για διάφορα ορυκτά και μονοκρυσταλλικά πετρώματα (Suana και Peters 1981)

Quartz, Quartzites	5.6—6.0 (1/10 mm)
Felspars (K, Na, Ca)	
Anorthosites	4.2—4.8 (1/10 mm)
Olivine (Mg, Fe), Dunites ..	3.4—3.6 (1/10 mm)
Pyroxenes, Pyroxenites	3.0—3.2 (1/10 mm)
Amphiboles, Amphibolites .	2.8—3.2 (1/10 mm)
Serpentines, Serpentinities ..	1.4—1.8 (1/10 mm)
Limestones, Dolomites	1.0—2.0 (1/10 mm)
Claystones —2.5 (1/10 mm)

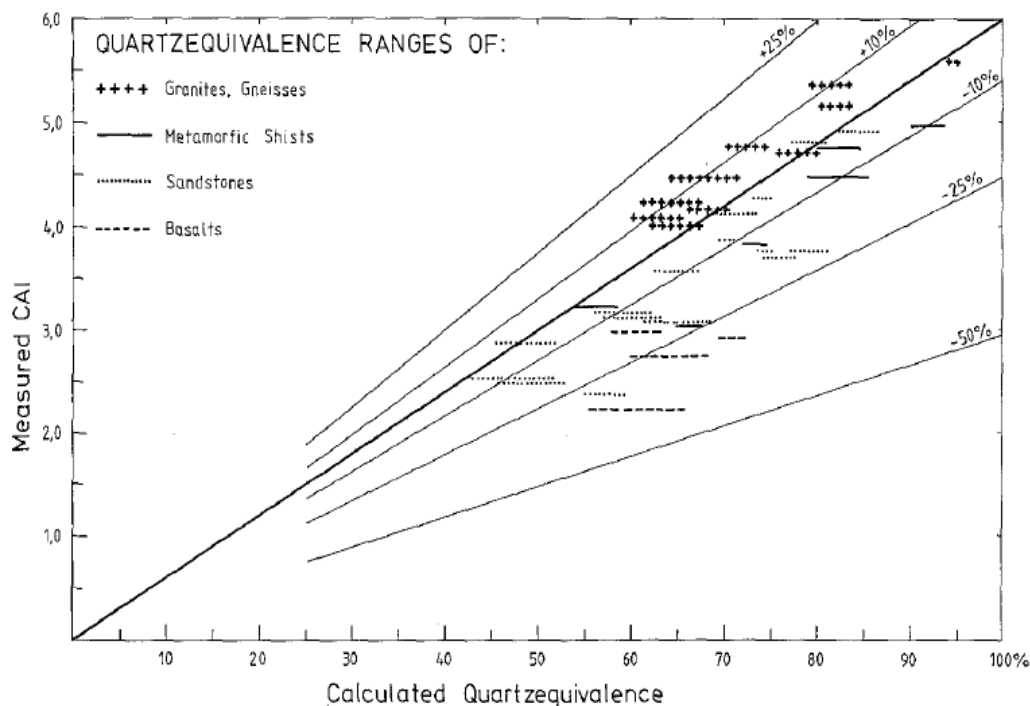
Καθώς ο χαλαζίας, με κάποιες εξαιρέσεις, είναι το πιο αποξεστικό ορυκτό που συνήθως συναντάται μπορεί να δημιουργηθεί μια σχετική ως προς τη σύσταση σε χαλαζία κλίμακα αποξεστικότητας. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.2, 100% αναλογία σε χαλαζία αντιστοιχεί σε τιμή CAI ίση με 6.0, όπως προκύπτει από τις τιμές του Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.2: Αναλογία δείκτη CAI διάφορων πετρωμάτων με δείκτη CAI χαλαζία (Suana και Peters 1981)

	Quartz equivalence
Quartz	100%
Felspars	70—80%
Olivine	57—60%
Pyroxenes	50—53%
Amphiboles	47—53%
Serpentinities	23—30%
Carbonates	17—34%
Claystones —41%

Ένα πέτρωμα το οποίο συνίσταται 100% από άστριους θεωρητικά έχει την ίδια τιμή CAI με ένα πέτρωμα το οποίο συνίσταται κατά 70-80% από χαλαζία και κατά 20-30% από υλικό χαμηλής αποξεστικότητας. Επομένως, αν είναι γνωστή η ορυκτολογική σύσταση, μια θεωρητική τιμή για τον CAI μπορεί να βρεθεί στον Πίνακα 3.2.

Στο Σχήμα 3.1 αποτυπώνονται οι μετρημένες τιμές CAI και η ισοδύναμη περιεκτικότητα σε χαλαζία της ορυκτολογικής σύστασης 36 πετρωμάτων. Αν δεν επιδρούσαν άλλοι παράγοντες στον CAI, εκτός από την ορυκτολογική σύσταση, θα έπρεπε οι τιμές να κείτονται στη διαγώνιο του διαγράμματος.



Σχήμα 3.1: Μετρημένες τιμές CAI για 36 πετρώματα και η ισοδύναμη περιεκτικότητά τους σε χαλαζία (Suana και Peters 1981)

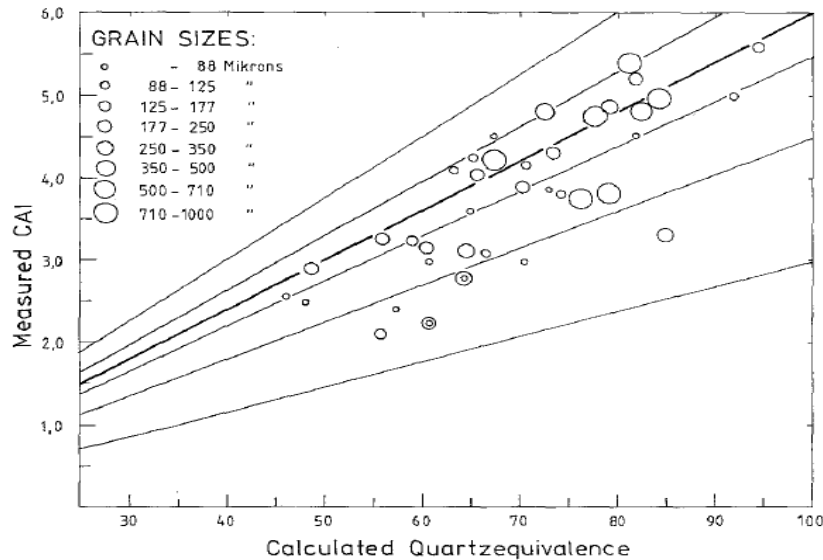
Η απόκλιση των αποτελεσμάτων από την ιδεατή γραμμή της διαγωνίου είναι αρκετά μεγαλύτερη από το εύρος σφάλματος των μετρήσεων και αυξάνεται όσο μικραίνουν οι τιμές για τους δείκτες CAI.

Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων από την ιδεατή γραμμή μπορούν να ερμηνευθούν ως η επιρροή των πετρογραφικών παραγόντων, κυρίως του ιστού των πετρωμάτων.

Ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να υπολογιστεί είναι η σκληρότητα κατά Mohs της χαλύβδινης ακίδας, η οποία κυμαίνεται από 5.5 έως 6 μονάδες της σκληρότητας Mohs. Τα σκληρότερα ορυκτά, όπως ο χαλαζίας και οι άστριοι, δεν χιράσσονται από την ακίδα και επομένως όλη η κινητική ενέργεια καταναλώνεται στη φθορά της ακίδας. Αντίθετα, σε ορυκτά μαλακότερα κατά Mohs, ένα μέρος της κινητικής ενέργειας καταναλώνεται για την παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής του ορυκτού. Το ποσό κινητικής ενέργειας που απορροφάται μεγαλώνει σε υλικά με χαλαρή δομή.

Η επίδραση των παραπάνω παραγόντων στη συνολική απόκλιση παραμένει ασαφής. Παρόλα αυτά, είναι αξιοσημείωτο ότι θετικές αποκλίσεις παρατηρούνται σε πετρώματα υψηλής περιεκτικότητας σε ορυκτά σκληρότερα από την ακίδα. Αρνητικές αποκλίσεις εμφανίζονται σε πετρώματα όπου υπερτερούν ορυκτά μαλακότερα από την ακίδα ή σε πετρώματα με μετρίως αποξεστικά ορυκτά αλλά χαλαρό (αργιλικό) πλέγμα.

Ένας άλλος παράγοντας που εξέτασαν οι Suana και Peters σε σχέση με την αντιστοιχία χαλαζία είναι το μέγεθος των κόκκων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Όπως διαπιστώνεται το μέγεθος των κόκκων, για εύρος 50μ έως 1000μ, δεν επηρεάζει την τιμή του CAI.



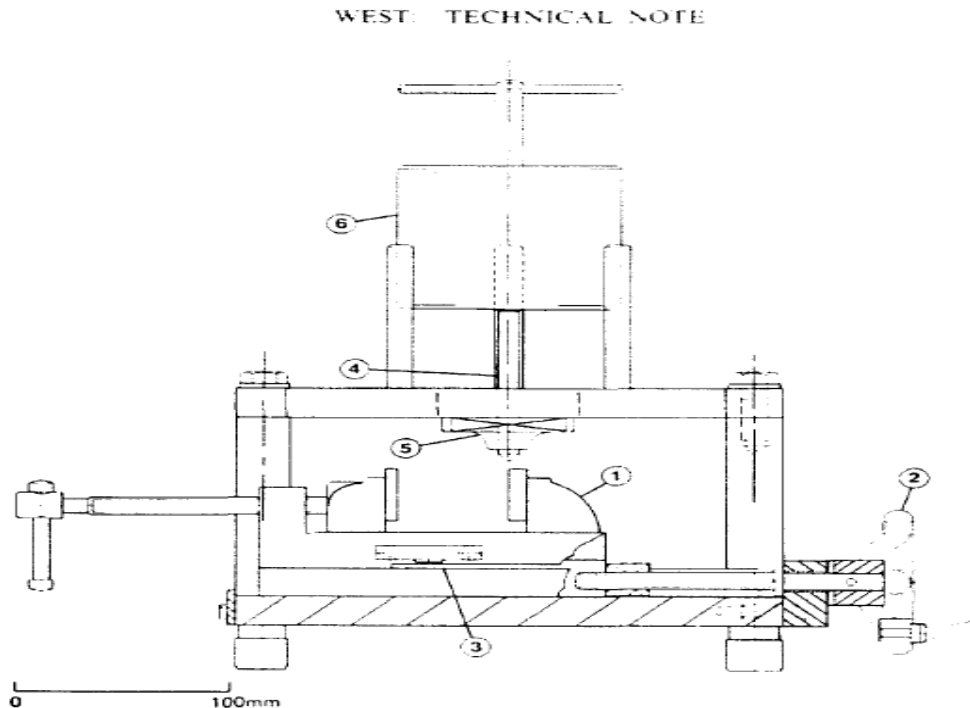
Σχήμα 3.2: Μετρημένες τιμές CAI για πετρώματα με διαφορετικό μέγεθος κόκκων και η ισοδύναμη τους περιεκτικότητα σε χαλαζία (Suana και Peters, 1981)

Οι Suana και Peters κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο δείκτης αποξεστικότητας CAI προσδιορίζεται κυρίως από την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος. Η απόκλιση που παρατηρήθηκε, εξαιτίας διάφορων αιτιών, ευνοεί την υπερεκτίμηση του CAI για σκληρά πετρώματα και την υποεκτίμηση του δείκτη CAI για μαλακότερα πετρώματα. Μεγαλύτερη υποεκτίμηση παρατηρείται σε πετρώματα που περιέχουν κόκκους αποξεστικών ορυκτών διάσπαρτους σε ένα χαλαρό πλέγμα.

West (1989)

Ο West (1989) αναγνωρίζοντας τη διάδοση και τη χρησιμότητα της δοκιμής Cerchar τόσο στον εξορυκτικό κλάδο όσο και στον τομέα της κατασκευής σηράγγων, παρουσιάζει τη συσκευή της δοκιμής και τη μέθοδο που αυτή εκτελείται. Μέχρι τότε υπήρχαν λίγα δημοσιευμένα στοιχεία για τον τρόπο εκτέλεσης της δοκιμής. Γι αυτό το λόγο όπως αναφέρει στη δημοσίευσή του, σχεδιάστηκε μια εύχρηστη συσκευή, η οποία παρουσιάζεται μαζί με μια μέθοδο εκτέλεσης της δοκιμής και κάποια προκαταρκτικά στοιχεία για μερικά πετρώματα της Βρετανίας.

Στη δημοσίευση ο West, αρχικά, παρουσιάζει την ανάπτυξη μιας νέας συσκευής Cerchar χρησιμοποιώντας ως βάση τα στοιχεία που δίνει το CERCHAR. Σε αυτή το δείγμα του πετρώματος συγκρατείται από μια μέγγενη, 1, η οποία μπορεί να κινείται κατά μήκος της συσκευής με έναν χειρομοχλό, 2, ο οποίος με κάθε στροφή του μετακινεί τη βάση κατά 1mm. Η μετακίνηση της μέγγενης μπορεί να μετρηθεί στην κλίμακα, 3. Μια χαλύβδινη ακίδα, 4, προσαρμόζεται σε μια υποδοχή, 5, φορτίζεται με νεκρό βάρος, 6, και πιέζεται στην επιφάνεια του δείγματος. Το συνολικό φορτίο στην ακίδα είναι 70N. Η συσκευή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3: Συσκευή τύπου West για τη μέτρηση της αποξεστικότητας πετρωμάτων κατά Cerchar. (West 1989)

Το υλικό που χρησιμοποίησε ο West για την ακίδα διαφέρει από τις προδιαγραφές που δίνονται από το Cerchar (αντοχή σε εφελκυσμό 200 kgf/mm²) επειδή ήταν ανέφικτο να βρεθεί τέτοια ποιότητα χάλυβα στην Βρετανία. Μετά από μια σειρά δοκιμών με χάλυβα EN24, ο οποίος είχε σκληρυνθεί σε διάφορες σκληρότητες, επιλέχθηκε η σκληρότητα 40 HRC καθώς συμφωνούσαν τα αποτελέσματα για δοκιμές σε γρανίτη με παλαιότερα δεδομένα.

Αν και δεν υπήρχαν προδιαγραφές για την επιφάνεια του δείγματος, κρίθηκε ικανοποιητικό για μαλακούς βράχους η επιφάνεια να λειαίνεται με λίμα ενώ για σκληρούς με αδαμαντοπρίονο.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δυο πράγματα συντελούνται. Η χαλύβδινη ακίδα δημιουργεί μια χαραγή στο πέτρωμα και το πέτρωμα προκαλεί φθορά στην κορυφή της ακίδας. Τα περισσότερα πετρώματα αποδεικνύονται κατάλληλα για τη

δοκιμή, εκτός από δύο κατηγορίες πετρωμάτων. Μερικά πετρώματα είναι τόσο μαλακά που δεν ανιχνεύεται καμία φθορά στην άκρη της ακίδας στο τέλος της δοκιμής. Αντίθετα, κάποια άλλα είναι τόσο σκληρά που είναι αδύνατο να χαραχθούν παρά τη φθορά της ακίδας. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να εξεταστεί αν η ακίδα είχε επαφή με το δείγμα ή αναπήδησε. Αν είχε όντως συνεχή επαφή, το πέτρωμα κρίνεται πολύ σκληρό για να εξεταστεί. Επίσης ο West αναφέρει ότι πρέπει να επιλέγεται με προσοχή πάνω στο δοκίμιο η θέση όπου χαρασσεται το δείγμα είναι χονδρόκοκκο, περιέχει ρωγμές ή είναι πορφυριτικό. Αν το δείγμα είναι ανισότροπο ή εμφανώς αλλοιωμένο σε κάποιο σημείο πρέπει να εκτελούνται δοκιμές προς διάφορες κατευθύνσεις.

Στην ίδια δημοσίευση ο West επιχείρησε να συσχετίσει την κλίμακα Mohs και το δείκτη Cerchar, πραγματοποιώντας δοκιμές αποξεστικότητας για τα ορυκτά της κλίμακας Mohs από γύψο έως και χαλαζία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.4, όπου απεικονίζονται η μέση τιμή των δοκιμών και το εύρος για κάθε ορυκτό καθώς και μια γραμμική παλινδρόμηση των μέσων τιμών. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $r = 0.98$, κάτι που υποδεικνύει το μεγάλο βαθμό συσχέτισης μεταξύ της κλίμακας Mohs και του δείκτη Cerchar.

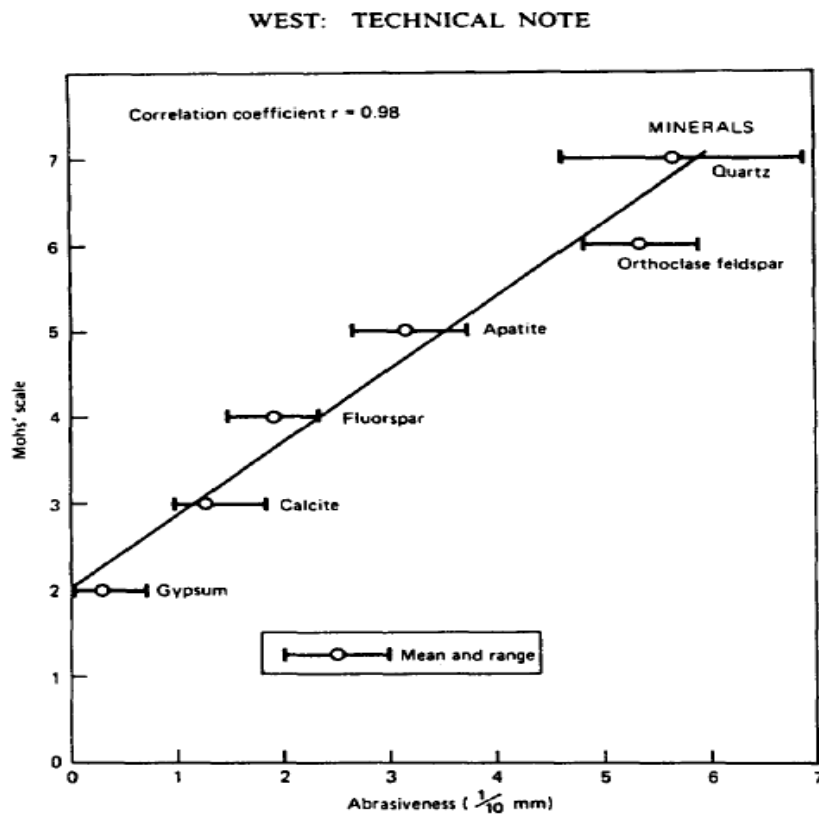


Fig. 6. Relation between Mohs' hardness grade and steel point abrasiveness test value.

Σχήμα 3.4: Συσχέτιση σκληρότητας κατά Mohs και αποξεστικότητας διάφορων πετρωμάτων (West 1989)

Η αποξεστικότητα ενός πετρώματος, όμως, δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την αποξεστικότητα των ορυκτών του. Παράγοντες όπως η συγκολλητική ουσία, το μέγεθος και η αδρότητα των κόκκων κ.α. επηρεάζουν. Ο West καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η κλίμακα Mohs είναι κατάλληλη μόνο για ορυκτά, ενώ η δοκιμή αποξεστικότητας είναι εφαρμόσιμη τόσο για ορυκτά όσο και για πετρώματα.

Τελειώνοντας, ο West παρουσιάζει την αποξεστικότητα ορισμένων χαρακτηριστικών πετρωμάτων της Βρετανίας και προειδοποιεί ότι ορισμένα από αυτά με αποξεστικότητα πάνω από 4 ή 5 είναι ικανά να φθείρουν σε μεγάλο βαθμό τα κοπτικά των μηχανημάτων διάνοιξης σηράγγων.

Al-Ameen και Waller (1994)

Οι Al-Ameen και Waller (1994) διαπίστωσαν ότι η δοκιμή Cerchar δίνει συνεπή αποτελέσματα για πετρώματα λεπτόκοκκα και μεσαίου μεγέθους κόκκων, ενώ για χαλαρής συνοχής πετρώματα ή χαμηλής αποξεστικότητας τα αποτελέσματα κρίνονται αναξιόπιστα. Περαιτέρω, τα αποτελέσματα από αδρόκοκκα πετρώματα φαίνεται να αντιπροσωπεύουν περισσότερο την αποξεστικότητα των συστατικών ορυκτών του πετρώματος παρά την αποξεστικότητα του ίδιου του πετρώματος συνολικά.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έκαναν οι Al-Ameen και Waller σε δείγματα βρετανικού άνθρακα έδειξαν την αδυναμία της δοκιμής Cerchar να εκτιμήσει ικανοποιητικά την αποξεστικότητα των συγκεκριμένων πετρωμάτων. Κύρια αιτία του φαινομένου θεωρήθηκε, από τους συγγραφείς της δημοσίευσης, ότι τα συγκεκριμένα πετρώματα κάλυπταν το χαμηλότερο εύρος τιμών του δείκτη Cerchar, όπου η ακρίβεια και η ευαισθησία της δοκιμής μειωνόταν σε μεγάλο βαθμό. Η σημασία του παραπάνω παράγοντα μεγάλωνε αν ληφθεί υπόψη ότι ο βρετανικός άνθρακας, αν και χαμηλής αποξεστικότητας, εξορυσσόταν σε μεγάλες ποσότητες, με αποτέλεσμα την αξιοσημείωτη σωρευτική φθορά των κοπτικών. Η κλασική μέθοδος Cerchar επομένως, κρίθηκε ακατάλληλη για μετρήσεις σε άνθρακα Βρετανίας, εκτός αν προσαρμοζόταν η δοκιμή στις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου πετρώματος χρησιμοποιώντας μαλακότερη ακίδα.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι πετρώματα χαλαρής συνοχής, όπως ο ιλυόλιθος, δίνουν CAI 0,15 ή και λιγότερο. Οι τιμές αυτές του CAI οδήγησαν τους Al-Ameen και Waller να συμπεράνουν ότι ακίδες από χάλυβα EN24 είναι πολύ σκληρές για αυτά τα πετρώματα και η σκληρότητα της ($610 \text{ HV} \cong 55 \text{ HRC}$) είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των κοπτικών άκρων. Γι αυτό το λόγο, μια πολύ πιο μαλακή ακίδα από χάλυβα EN3 σκληρότητας 225 HV, επιλέχθηκε για τη μέτρηση της αποξεστικότητας των συγκεκριμένων πετρωμάτων με κριτήριο η σκληρότητα της να είναι σχετική με αυτή του συνήθους εξοπλισμού.

Στη συνέχεια οι Al-Ameen και Waller προσπαθώντας να κατανοήσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν τη δοκιμή Cerchar εξέτασαν εκτενώς το μηχανισμό της δοκιμής και τις φυσικές ιδιότητες του πετρώματος. Σύμφωνα με τους ερευνητές η διάμετρος φθοράς της ακίδας είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της ποιότητας υλικού της ακίδας, της αντοχής του πετρώματος και της περιεκτικότητας του σε αποξεστικά υλικά. Τυποποιώντας το υλικό της ακίδας (EN3 ή EN24) και κάνοντας δοκιμές σε διάφορα πετρώματα προσπάθησαν να ερευνήσουν τη σχέση φθοράς της ακίδας αποκλειστικά με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε πετρώματος, αλλά και το είδος της επιφάνειας του δείγματος, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3

Πίνακας 3.3: Το εύρος των τιμών CAI για διαφορετικές ακίδες σε διάφορα πετρώματα (Al-Ameen και Waller 1994)

Rock type	EN3 polished rock surface	EN3 natural rock surface	EN24 polished rock surface
Sandstone	2.02–3.25	1.75–3.45	0.72–1.71
Siltstone	1.10–2.31	0.87–2.16	0.25–0.62
Silty mudstone	0.63–1.56	0.35–1.68	0.11–0.70
Mudstone	0.22–0.76	0.29–0.70	0.10–0.37
Seatearth	0.24–0.44	0.24–0.44	0.10–0.12
Ironstone	2.92–3.87	2.98–4.31	1.06–2.20
Limestone*	0.90–2.32	not measured	0.49–1.05
Igneous rock*	4.42–5.12	not applicable	3.09–4.19
Sandstone*	2.10–4.89	2.40–4.97	1.71–3.32

*Non coal measures.

Από τον Πίνακα 3.3 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της προσαρμοσμένης δοκιμής για τα βρετανικά ιζηματογενή πετρώματα είναι παραπλήσια ανεξαρτήτως αν αυτή έγινε σε λεία ή τραχεία επιφάνεια.

Plinninger (2004)

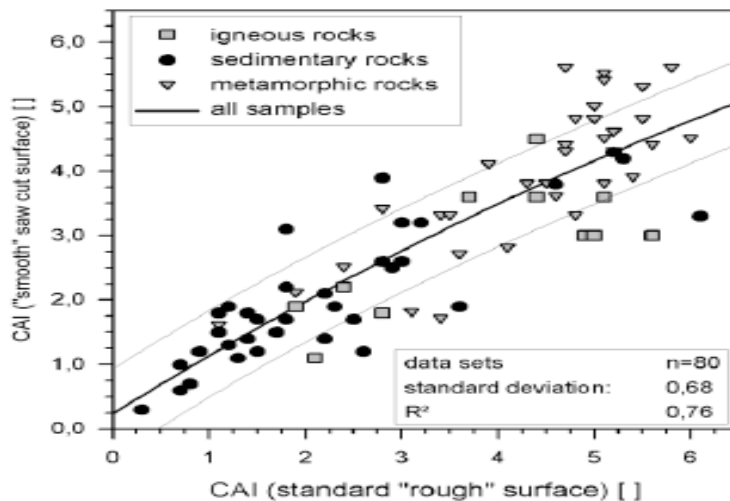
Ο Plinninger (2004) βασιζόμενος σε στοιχεία από 109 πετρώματα, παρουσιάζει συνοπτικά με ποιο τρόπο επηρεάζουν οι γεωτεχνικοί παράγοντες και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η δοκιμή Cerchar, την τιμή του δείκτη CAI.

Αρχικά παρουσιάζονται οι δύο συσκευές Cerchar, δηλαδή η πρωτότυπη συσκευή και η συσκευή που παρουσιάστηκε από τον West (1989). Η κυριότερη διαφορά που αναφέρεται από τον Plinninger έχει να κάνει με την ταχύτητα εκτέλεσης της δοκιμής. Σε αντίθεση με την πρωτότυπη συσκευή Cerchar, στην οποία εκτελείται η δοκιμή με ταχύτητα 10mm/s, στη συσκευή West η ταχύτητα μειώνεται σε 10 s για

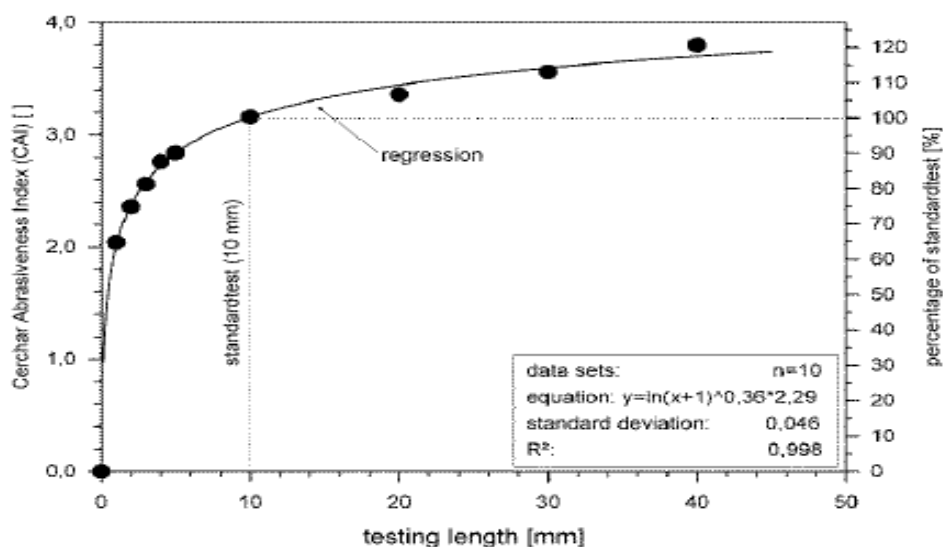
10 mm χαραγής. Παρόλη τη μεγάλη διαφορά στην ταχύτητα ανάμεσα στις δύο συσκευές, θεωρητικά, οι τιμές που προκύπτουν εκτιμάται ότι θα είναι ίσες. Η εμπειρία όμως έχει δείξει ότι από την ταχύτητα δοκιμής επηρεάζονται τα αποτελέσματα, κυρίως στην πρωτότυπη συσκευή Cerchar. Αιτία του φαινομένου είναι η τραχεία επιφάνεια του δοκιμίου ή το αδρόκοκκο πέτρωμα που αναγκάζει την ακίδα να αναπηδήσει και την επιφάνεια φθοράς της να παραμορφωθεί. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο Plinninger συστήνει μείωση της ταχύτητας δοκιμής.

Στη συνέχεια, αφού αναφέρεται η αδυναμία σύγκρισης αποτελεσμάτων της δοκιμής με διαφορετικού τύπου ακίδες, γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιασθεί η σχέση της επιφάνειας των δοκιμίων με τον CAI. Πιο συγκεκριμένα για χαμηλού CAI πετρώματα τα αποτελέσματα είναι παρόμοια είτε για τραχεία είτε για λεία επιφάνεια. Αντίθετα για πιο αποξεστικά δείγματα παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη τιμή του CAI σε τραχείες επιφάνειες από ότι σε λείες που έχουν προκύψει από αδαμαντοκοπή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5.

Βασικά στοιχεία της δοκιμής είναι επίσης το μήκος χάραξης, ο αριθμός δοκιμών και η σωστή μικροσκοπική εκτίμηση της τιμής CAI. Το μήκος χάραξης έχει ορισθεί πλέον στα 10mm. Το 70% της φθοράς της ακίδας παρατηρείται κατά το πρώτο χιλιοστό και μόλις το 15% της μεταβολής του CAI παρατηρείται στα υπόλοιπα 8-9 mm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6. Επομένως κρίνεται άσκοπο μεγαλύτερο μήκος δοκιμής. Ο αριθμός των δοκιμών που προτείνει ο Plinninger είναι 5 για κάθε δείγμα με βάση την εμπειρία του.

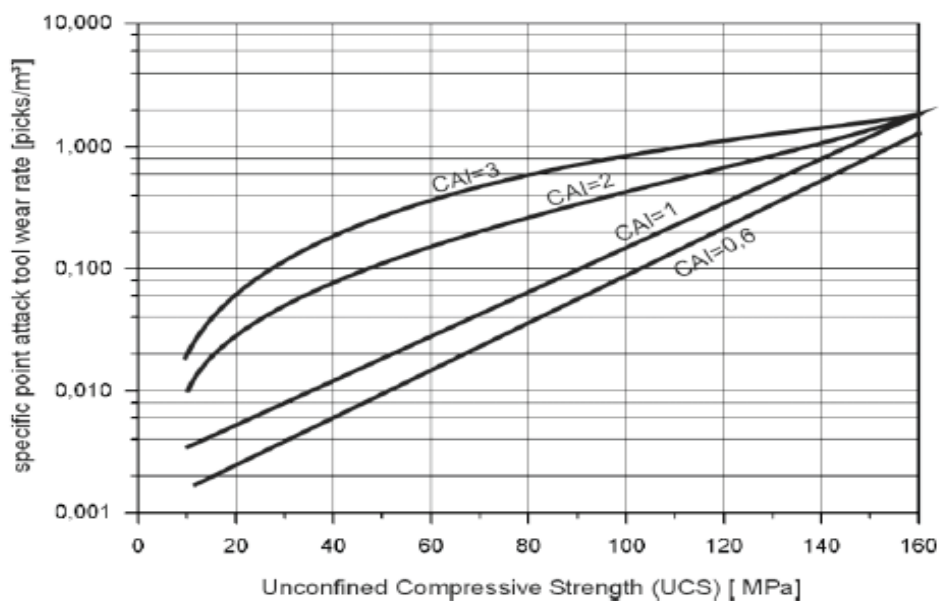


Σχήμα 3.5: Δείκτης CAI για δοκιμή σε λεία και τραχεία επιφάνεια πετρώματος (Plinninger 2004)

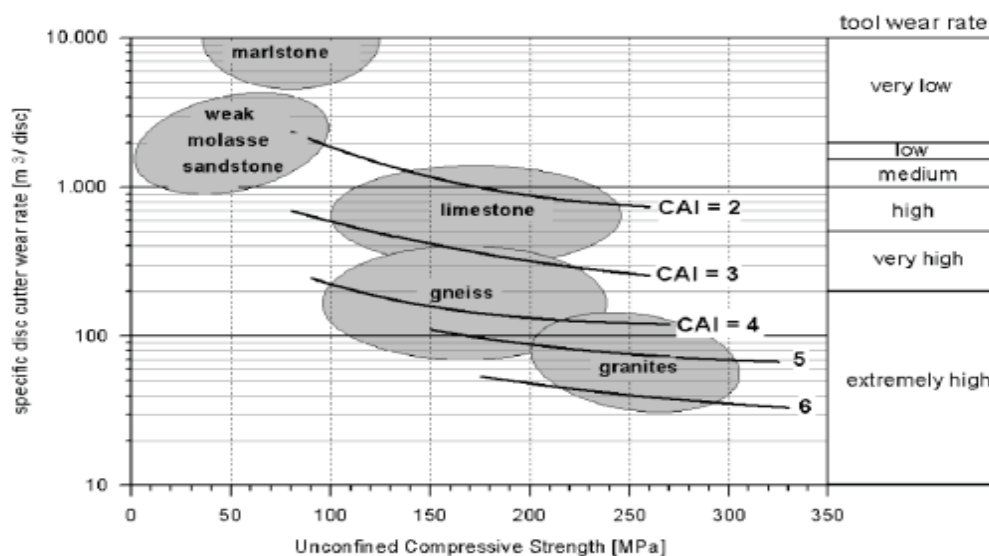


Σχήμα 3.6: Δείκτης CAI σε συνάρτηση του μήκους δοκιμής (Plinninger 2004)

Ο Plinninger πέρα από τη συνηθισμένη χρήση του CAI για ταξινόμηση της αποξεστικότητας πετρωμάτων, αναφέρεται στην χρήση του CAI ως δείκτη πρόβλεψης της φθοράς των κοπτικών μέσω διαφόρων εμπειρικών σχέσεων και συσχετίσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 και στο Σχήμα 3.8. Κάνει λόγο για αδυναμία ικανοποιητικής πρόβλεψης εξαιτίας των λιγοστών ερευνητικών δεδομένων. Αίτιο αυτού του γεγονότος εκτιμά ο Plinninger ότι είναι η μεγάλη γκάμα μηχανημάτων και εργαλείων αλλά και η μεγάλη οικονομική και χρονική δαπάνη που απαιτείται για μια τέτοια έρευνα.



Σχήμα 3.7: Συσχέτιση της κατανάλωσης κοπτικών σημειακής προσβολής με τον δείκτη CAI (Plinninger 2004)



Σχήμα 3.8: Συσχέτιση διάρκειας ζωής κοπτικών, UCS και δείκτη CAI για ορισμένα συνήθη πετρώματα (Plinninger 2004)

Καταλήγοντας ο Plinninger, αξιολογεί την δοκιμή Cerchar σαν πολύ εύχρηστη και αποτελεσματική δοκιμή περιγραφής και κατάταξης της αποξεστικότητας των πετρωμάτων. Στον αντίποδα, κρίνει ότι για την καλύτερη εκτίμηση δεικτών φθοράς των κοπτικών, όπως ο χρόνος ζωής των κοπτικών άκρων, απαιτείται πιο ενδεδειγμένη γεωτεχνική έρευνα από μια απλή δοκιμή απόξεσης που προσφέρει κυρίως υποθέσεις.

Rostami et al. (2005)

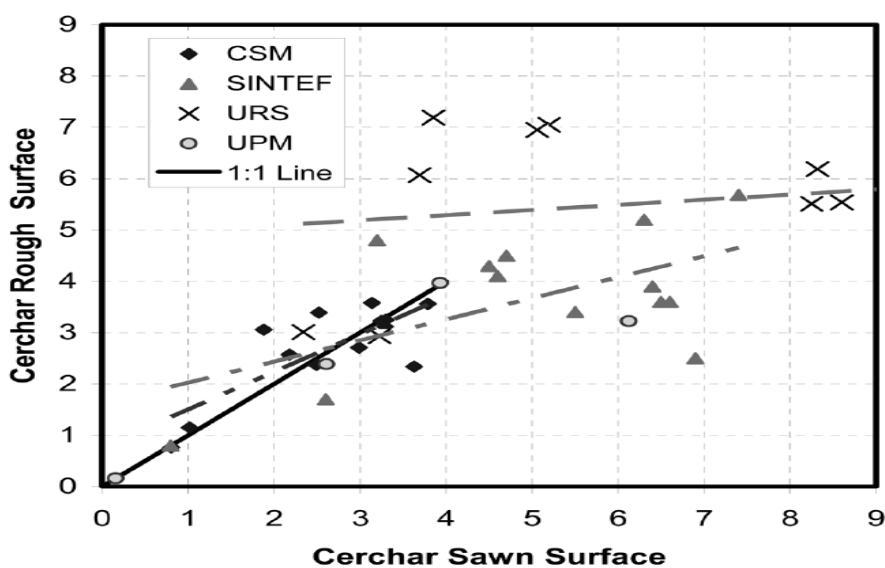
Στη δημοσίευση του Rostami και των συνεργατών του (2005) αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στην ιστορική εξέλιξη και στις πρόσφατες μελέτες για τη δοκιμή Cerchar, τόσο στο επίπεδο της διαδικασίας όσο και στο επίπεδο των αποτελεσμάτων. Βασικό στοιχείο της δημοσίευσης, όμως, είναι η παράθεση και σύγκριση αποτελεσμάτων, στο πλαίσιο ενός προγράμματος, διαφόρων εργαστηρίων σε μια σειρά από δείγματα, που ήταν κοινά για όλα, σε μια πρώτη προσπάθεια ομογενοποίησης της διαδικασίας. Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων οι συγγραφείς παραθέτουν προτάσεις για την όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν κατά την εκτέλεση και την ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του προγράμματος δοκιμών ήταν η μελέτη της ποσοτικής εκτίμησης της επίδρασης των μηχανών δοκιμής και των διάφορων διαδικασιών που εκτελούνται, στα αποτελέσματα της δοκιμής.

Τα εργαστήρια που συμμετείχαν στις συγκριτικές δοκιμές σε συγκεκριμένα δείγματα ήταν το Colorado School of Mines (CSM), το Norwegian University of

Science and Technology (NTNU/SINTEF), το γεωτεχνικό εργαστήριο URS στο New Jersey και το εργαστήριο βραχομηχανικής του Πολυτεχνείου της Μαδρίτης, Universidad Politecnica de Madrid (UPM). Η επιλογή των συγκεκριμένων εργαστηρίων έγινε εξαιτίας της χρήσης διαφορετικών συσκευών δοκιμής και διαφορετικής ακίδας κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Το NTNU και το URS χρησιμοποιούν τρίτης γενιάς συσκευή Ergotech και ακίδα σκληρότητας 43 HRC ενώ το CSM και το UPM χρησιμοποιούν ακίδα σκληρότητας 54-56 HRC. Τα δείγματα που εξετάστηκαν από όλα τα εργαστήρια αποτελούνταν από 4 δείγματα από τη Νορβηγία (βασάλτης, τονάλιτης, χαλαζίτης και ασβεστόλιθος). Επιπλέον, δείγματα από την Ν. Υόρκη συλλέχθηκαν και εξετάστηκαν από 3 εργαστήρια. Τα 4 πρώτα δείγματα είχαν σταλεί και σε άλλα εργαστήρια για επιπλέον δοκιμές με την προοπτική να κυκλοφορήσουν τα αποτελέσματά τους στο μέλλον.

Οι δοκιμές έγιναν τόσο σε τραχείες όσο και σε λείες επιφάνειες, προσαρμόζοντας τη δοκιμή έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από τη σχιστότητα και γενικά τη λιθολογία του πετρώματος. Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται το συγκριτικό διάγραμμα ανάμεσα στα αποτελέσματα στις 2 επιφάνειες.

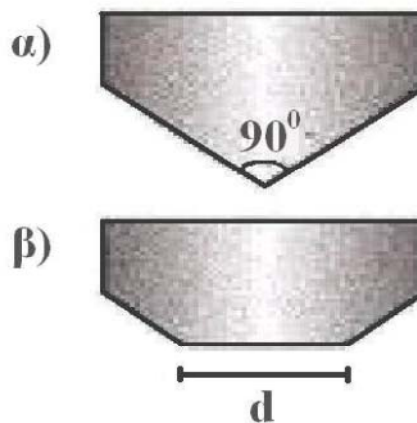


Σχήμα 3.9: Συγκριτικά αποτελέσματα δοκιμής Cerchar για λείες και τραχείες επιφάνειες (Rostami et al. 2005)

Ένα πρώτο συμπέρασμα των αποτελεσμάτων είναι ότι οι τιμές CAI για τραχείες επιφάνειες είναι υψηλότερες απ' ότι σε λείες, κάτι που ευνοεί πιο συντηρητικές εκτιμήσεις για την αποξεστικότητα. Η απόκλιση ανάμεσα στα αποτελέσματα στις δύο επιφάνειες αυξάνεται καθώς το πέτρωμα γίνεται πιο σκληρό και πιο αποξεστικό. Μερικά εργαστήρια ανέφεραν και περιπτώσεις ολίσθησης στη λεία επιφάνεια του χαλαζίτη, κάτι που εν μέρει εξηγεί τις αναπάντεχα χαμηλές τιμές CAI που παρουσιάζει.

Σημαντική παρατήρηση επίσης αποτελεί ότι η διαφορά στα αποτελέσματα ανάμεσα στις δύο επιφάνειες αυξάνεται με τη χρήση ακίδων χαμηλότερης σκληρότητας, κυρίως 43 έναντι 56 HRC. Τα εργαστήρια που χρησιμοποιούν ακίδες σκληρότητας 43 HRC παρατήρησαν 40-90% μεγαλύτερες τιμές CAI απ ότι αυτά που χρησιμοποιούν την πρότυπη σκληρότητα των 56 HRC, ενώ αυτά που χρησιμοποιούν εξίσου σκληρές ακίδες παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα.

Αναφορά γίνεται στην επίδραση της ταχύτητας εκτέλεσης της δοκιμής και στον τρόπο ανάγνωσης των μετρήσεων στο μικροσκόπιο. Συγκεκριμένα για πιο αργή εκτέλεση παρατηρείται έως και 40% αύξηση στις τιμές CAI για μαλακές ακίδες. Επίσης, για την ανάγνωση στο μικροσκόπιο υιοθετείται ως ακριβέστερη η πρόταση του SINTEF. Δηλαδή η γωνία μέτρησης της ακίδας να είναι γνωστή από πριν, έτσι ώστε να είναι γνωστά τα αρχικά και τα τελικά σημεία φθοράς της ακίδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Μέτρηση φθοράς ακίδας με βάση γνωστή γωνία κορυφής της

Οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι υπάρχει ανάγκη τυποποίησης της δοκιμής σε όλα τα επίπεδα, όπως της σκληρότητας της ακίδας, της διαδικασίας, του τρόπου μέτρησης της φθοράς της ακίδας και της ταξινόμησης των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, κάτι τέτοιο θα αποδείξει την αξιοπιστία και εφαρμοσιμότητα της δοκιμής στην εκτίμηση διάρκειας ζωής των κοπτικών και τη σχέση με άλλους δείκτες που χρησιμοποιούνται.

Καταλήγοντας, οι συγγραφείς παρέθεσαν κάποιες προτάσεις επί της διαδικασίας της δοκιμής Cerchar, οι οποίες εκτιμάται ότι θα συνεισφέρουν στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

- Μια σειρά από πρότυπα πρέπει να αναπτυχθούν για τη διαδικασία της δοκιμής και για την καταγραφή των δεικτών CAI.
- Τα εργαστήρια θα έπρεπε να καταγράφουν όλα τα δεδομένα της διαδικασίας ή τουλάχιστον αυτά που αποδεδειγμένα επηρεάζουν τα

αποτελέσματα της δοκιμής, όπως το είδος της ακίδας, η επιφάνεια δοκιμής κλπ.

- Τα εργαστήρια που επιχειρούν πρώτη φορά αυτού του είδους τη δοκιμή πρέπει αρχικά να προχωρήσουν σε μια ενδελεχή βαθμονόμηση με βάση δοκιμές σε πρότυπα δείγματα και σύγκριση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων με πιο έμπειρα εργαστήρια. Το ίδιο ισχύει και για τους χειριστές των συσκευών.
- Προτείνεται να χρησιμοποιείται ένα πρότυπο δείγμα για τη βαθμονόμηση κάθε παρτίδας ακίδων, ούτως ώστε να αποφεύγονται μικρές διαφορές, που οφείλονται πιθανότατα στη διαδικασία μορφοποίησης.
- Συστηματική εξέταση των ακίδων στο μικροσκόπιο για επαλήθευση της ακρίβειας και περάτωσης της διαδικασίας μορφοποίησης.
- Επίσης συνιστάται σε συνδυασμό με τη δοκιμή Cerchar να πραγματοποιείται και κάποια άλλη δοκιμή αποξεστικότητας, η οποία μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη σε περιπτώσεις που ασυνήθιστες ιδιότητες του δείγματος παρουσιάζουν υπερβολικές τιμές για το CAI.
- Γεωτεχνικοί μηχανικοί, κατασκευαστές και όσοι εμπλέκονται σε ένα έργο είναι απαραίτητο να διασταυρώνουν τα αποτελέσματα της Cerchar με άλλους δείκτες για να αποφύγουν λάθος βάση για εκτίμηση του κόστους των κοπτικών.

Michalakopoulos et al. (2006)

Ο Μιχαλακόπουλος με τους συνεργάτες του μελέτησαν ενδελεχώς την επίδραση της σκληρότητας της χαλύβδινης ακίδας στην τιμή του CAI. Όπως αναφέρεται και προηγούμενα η δοκιμή Cerchar αν και αποτελεί την πλέον διαδεδομένη δοκιμή αποξεστικότητας, παρουσιάζει αρκετές αμφισημίες στον τρόπο εκτέλεσης, στο είδος της ακίδας, στο είδος του δείγματος κ.α. Μια από τις πιο έντονες, αν όχι η πιο έντονη, είναι η σκληρότητα της ακίδας, η οποία εναλλάσσεται από εργαστήριο σε εργαστήριο και από δοκιμή σε δοκιμή.

Αν και η προτεινόμενη γεωμετρία της ακίδας είναι γενικά η ίδια σε όλες τις αναφορές, δεν συμβαίνει το ίδιο με τη σκληρότητα της χαλύβδινης ακίδας. Είναι προφανές ότι οποιαδήποτε αλλαγή στη σκληρότητα της ακίδας αλλάζει σημαντικά τις συνθήκες της δοκιμής.

Στην πρωτότυπη περιγραφή της δοκιμής ο Valantin προτείνει χαλύβδινη ακίδα εφελκυστικής αντοχής 2000 MPa, αλλά δε γίνεται πουθενά αναφορά για τη σκληρότητα της. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.4, υπάρχουν διαφορετικές συστάσεις από δημοσίευση σε δημοσίευση σε σχέση με τη σκληρότητα.

Πίνακας 3.4: Συστάσεις χαρακτηριστικών της ακίδας (Michalakopoulos et al. 2006)

Reference	Tensile strength (MPa)	Hardness	Steel type
Valantin [12]	2000	—	—
Suana and Peters [18]	2000	HRC 54-56	—
Atkinson et al. [8,9]	—	HRC 56 (HV 610)	EN24 or EN25
West [13]	2000	HRC 40	EN24
Atkinson [5]	2000	HRC 54-56	—
Al-Ameen and Waller [16]	—	HRC 56 (HV 610)	EN24
	—	HRC 19 (HV 225)	EN3
AFNOR [14]	—	HRC 54-56	—
Plinninger et al. [17]	2000	HRC 55	115CrV4

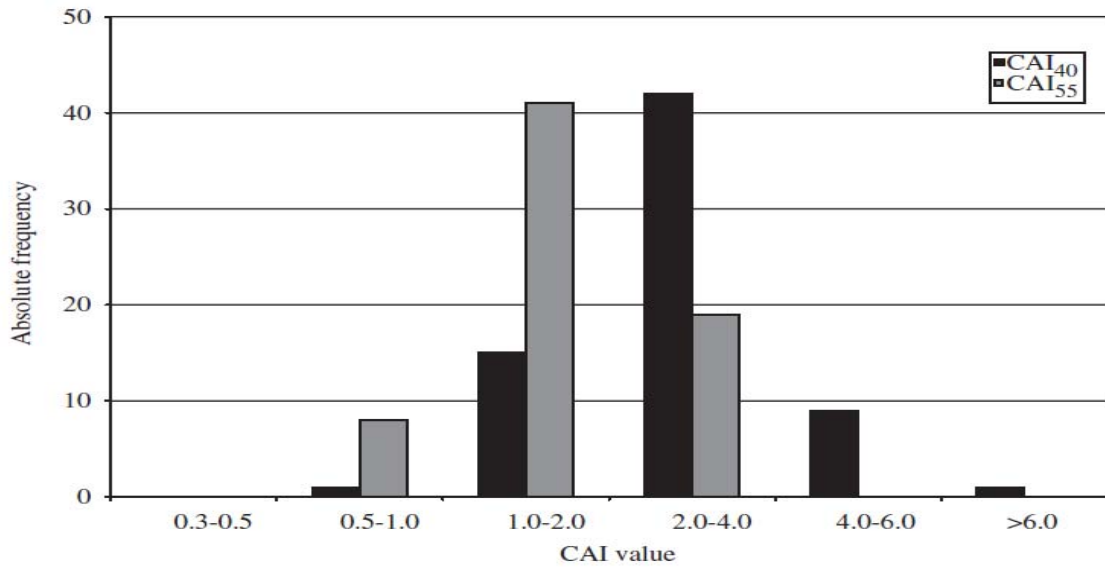
Από την εμπειρία των συγγραφέων, παρόλο που είναι ξεκάθαρο ότι από την πλειοψηφία προτείνεται χαλύβδινη ακίδα σκληρότητας HRC 54-56, διάφοροι εργολάβοι, κατασκευαστές εξοπλισμού και σχεδιαστές ζητούν τιμές CAI προσδιορισμένες με ακίδα σκληρότητας HRC 40, όπως συνιστάται από τον West.

Για να διερευνηθεί η επίδραση της σκληρότητας στην τιμή CAI οι ερευνητές προχώρησαν στον προσδιορισμό της τιμής CAI 73 δειγμάτων πετρωμάτων για δύο διαφορετικά είδη ακίδας. Από τα 73 δείγματα, 5 ήταν είτε κατακερματισμένα είτε πολύ σκληρά για να μετρηθούν και επομένως χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των υπόλοιπων 68. Τα δείγματα ήταν 6 διαφορετικών τύπων πετρώματος. Κάθε δείγμα υποβλήθηκε σε 5 δοκιμές για κάθε τύπο ακίδας και υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για το καθένα.

Οι ακίδες ήταν σκληρότητας είτε HRC 55 όπως αναφέρεται στην επίσημη περιγραφή της δοκιμής στο πρότυπο του AFNOR, είτε HRC 40 όπως συνιστάται από τον West και χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε τυπικές δοκιμές Cerchar.

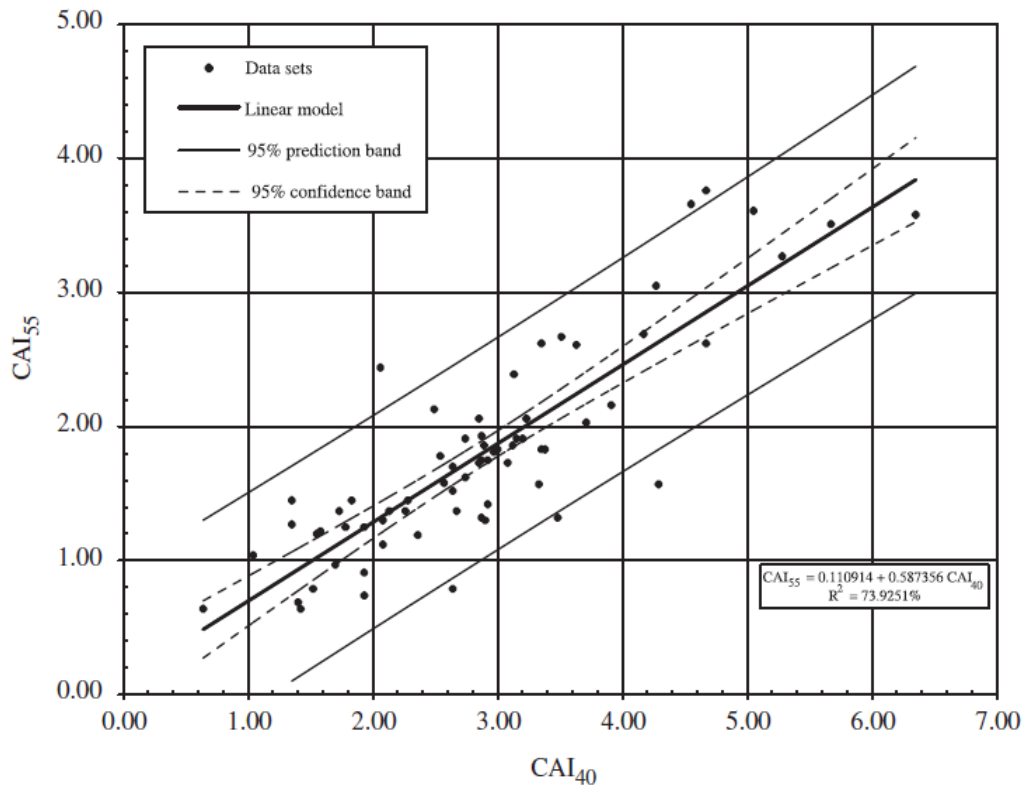
Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων οι συγγραφείς κατέληξαν σε δύο σημαντικά συμπεράσματα.

Το πρώτο είναι ότι η τιμή ενός δείγματος μειώνεται όταν αυξάνεται η σκληρότητα της χαλύβδινης ακίδας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.11. Στο Σχήμα 3.11 επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά για τις CAI₄₀ τιμές απ' ότι για τις CAI₅₅.



Σχήμα 3.11: Διασπορά δείκτη CAI για ακίδες σκληρότητας HRC55 και HRC40 (Michalakopoulos et al. 2006)

Το δεύτερο συμπέρασμα που προέκυψε ύστερα από ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι ότι οι δύο τιμές CAI μπορούν να συσχετιστούν γραμμικά απ όπου προκύπτει μια εξίσωση, ικανή να μετατρέψει τις τιμές CAI₄₀ σε τιμές CAI₅₅ και αντιστρόφως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Συσχέτιση CAI40 και CAI55

Alber (2008)

Στη δημοσίευση του Alber (2008) ερευνάται η εξάρτηση του δείκτη CAI από το εκάστοτε τασικό πεδίο και οι επιδράσεις του στη φθορά των επιλεγμένων κοπτικών. Παρατηρώντας ότι στο δείγμα ασκούνται διαφορετικές τάσεις στο εργαστήριο απ ότι στο προς εκσκαφή πέτρωμα στο μέτωπο, εξετάζεται αν και πόσο επηρεάζεται η τιμή του CAI από τις επί τόπου τάσεις. Για το σκοπό αυτό εκτελείται η δοκιμή Cerchar με τις in situ συνθήκες τάσης να προσομοιώνονται με τη χρήση κατάλληλου τριαξονικού κελιού, όπου αποδεικνύεται αύξηση του δείκτη CAI με αύξηση της πλευρικής πίεσης.

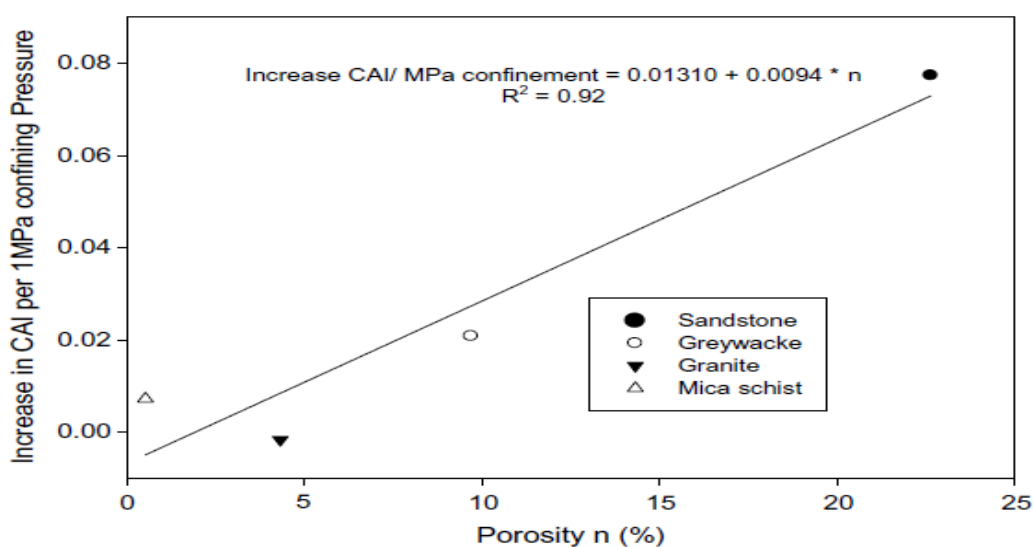
Για την εξέταση της εξάρτησης του δείκτη CAI από το τασικό πεδίο επιλέχθηκαν 4 είδη πετρωμάτων και είναι τα εξής:

- I. φαμμίτης από τη Βόρεια Βαυαρία
- II. γραουβάκης από την Κεντρική Γερμανία
- III. μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος από τις Κεντρικές Άλπεις
- IV. γρανίτης

Πέρα από δοκιμές Cerchar, εκτελέστηκαν σε κυλινδρικά δοκιμια μια σειρά από δοκιμές με κυριότερες τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, τη δοκιμή εφελκυστικής αντοχής, τη δοκιμή δυσθραυστότητας και μετρήσεις υπέρηχων.

Οι αναλύσεις και οι συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών έδωσαν μερικά πολύ χρήσιμα συμπεράσματα.

Πρώτα απ όλα αποδεικνύεται ότι ο δείκτης αποξεστικότητας CAI εξαρτάται από το τασικό πεδίο. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση στο μέτωπο τόσο μεγαλύτερος είναι και ο δείκτης CAI. Η εξάρτηση αυτή από τις περιβάλλουσες τάσεις εμφανίζεται να είναι μια συνάρτηση του πορώδους ή εναλλακτικά του μέτρου ελαστικότητας Young του πετρώματος. Π.χ. για ψαμμίτη υψηλού πορώδους βρέθηκε ότι ο δείκτης CAI διπλασιάζεται για κάθε 10 MPa περιβάλλουσας πίεσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Συνάρτηση πορώδους με την αύξηση του δείκτη CAI για κάθε επιπλέον 1MPa περιβάλλουσας πίεσης (Alber 2008)

Lassnig et al.(2008)

Ο Lassnig με τους συνεργάτες του επικεντρώθηκαν στην εύρεση της καλύτερης συσχέτισης του αριθμού δοκιμών που απαιτούνται για αξιόπιστα αποτελέσματα και του μεγέθους των κόκκων των δοκιμών.

Ύστερα από υπολογισμό του μέσου κόκκου διαφόρων δοκιμών και του ενδοτεταρτημοριακού τους εύρους εκτέλεσαν δοκιμές Cerchar. Τιμές του δείκτη CAI για 5 και 10 επαναλήψεις της δοκιμής υπολογίστηκαν και συσχετίστηκαν με τις την μέση τιμή και το ενδοτεταρτημοριακό εύρος των κόκκων.

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας έδειξαν ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη απόκλιση μεταξύ των δεικτών για 5 και για 10 επαναλήψεις της δοκιμής, επομένως κατέληξαν ότι η επανάληψη 5 τουλάχιστον δοκιμών είναι επαρκής.

Eberl et al. (2008)

Ο Eberl με τους συνεργάτες του εξετάζουν την επίδραση της θερμοκρασίας στην αποξεστικότητα των πετρωμάτων και επομένως στη φθορά των κοπτικών. Μελετήθηκε κατά πόσο η περιεκτικότητα σε χαλαζία αλλά και η θέρμανση του πάνω από το όριο των 573 °C αυξάνει ή όχι την αποξεστικότητα των πετρωμάτων. Για την καλύτερη κατανόηση της καταπόνησης που επιδέχεται η δομή του πετρώματος εξετάστηκαν κι άλλες παράμετροι όπως η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, η εφελκυστική αντοχή, η πυκνότητα και η ταχύτητα υπερηχητικών κυμάτων.

Αφορμή για τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στάθηκε η παρατήρηση υψηλής κατανάλωσης των κοπτικών ενός μηχανήματος μετωπικής προσβολής σε ορυχείο της Χιλής, κατά την επαφή τους με πετρώματα υψηλής περιεκτικότητας σε χαλαζία, ο οποίος εμφανιζόταν σε επίπεδα πάχους 10-30cm. Έπειτα από έκπλυση του μετώπου, με 100 επιπλέον λίτρα νερού, παρατηρήθηκε μείωση της κατανάλωσης των κοπτικών από 9 σε 3 ανά κυβικό μέτρο υλικού. Το ερώτημα που τέθηκε από τους επιστήμονες ήταν: Η μεγάλη ποσότητα νερού ευνοούσε απλώς, όπως είναι γνωστό, την καλύτερη ψύξη του καρβιδίου του βολφραμίου των κοπτικών, αποφεύγοντας έτσι τον κερματισμό του ή επιπλέον εμπόδιζε την μετατροπή του χαλαζία, υπό την επίδραση της θερμοκρασίας, σε μορφή χαλαζία μεγαλύτερης σκληρότητας, διατηρώντας έτσι την αποξεστικότητα του σε χαμηλότερα επίπεδα?

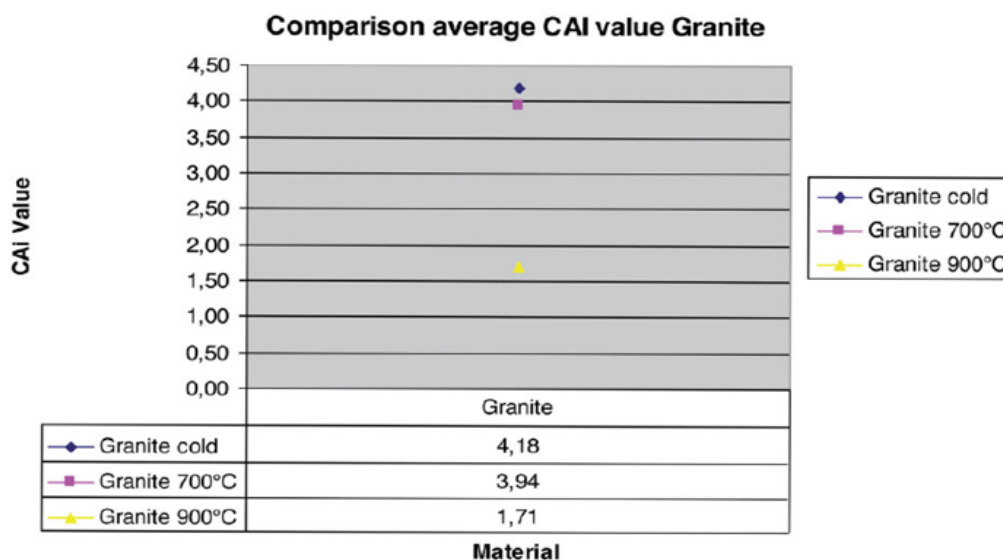
Για να υπάρξει αντιπροσωπευτική απάντηση, εξετάστηκαν 4 διαφορετικά είδη δειγμάτων. Το πρώτο είδος ήταν καθαρός χαλαζίας από τη Rio Tinto Materials, Austria, όπως και το δεύτερο αλλά από την περιοχή Minas Gerais της Βραζιλίας. Επίσης εξετάστηκαν ψαμμίτης από το Imberg της Γερμανίας και γρανίτης από το Neuhausen της Αυστρίας.

Για περισσότερο αξιόπιστα και συγκρίσιμα αποτελέσματα εξετάστηκαν 175 δείγματα. Όλα τα πειράματα ξεκίνησαν στη θερμοκρασία των 25 °C. Ο χαλαζίας στη θερμοκρασία των 573 °C μεταβάλλεται με απότομη αύξηση του όγκου του και γι αυτό το λόγο οι επόμενες δοκιμές έγιναν στη θερμοκρασία των 700°C.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών Cerchar για τους καθαρούς χαλαζίες δείχνουν αξιοσημείωτη διαφορά στις τιμές CAI ανάλογα με την προέλευση του δείγματος. Σε θερμοκρασία δωματίου ο χαλαζίας της Rio Tinto Minerals είχε μέση τιμή 3.38 ενώ ο χαλαζίας από τη Mina Gerais είχε μέση τιμή 4.13. Στα αποτελέσματα των

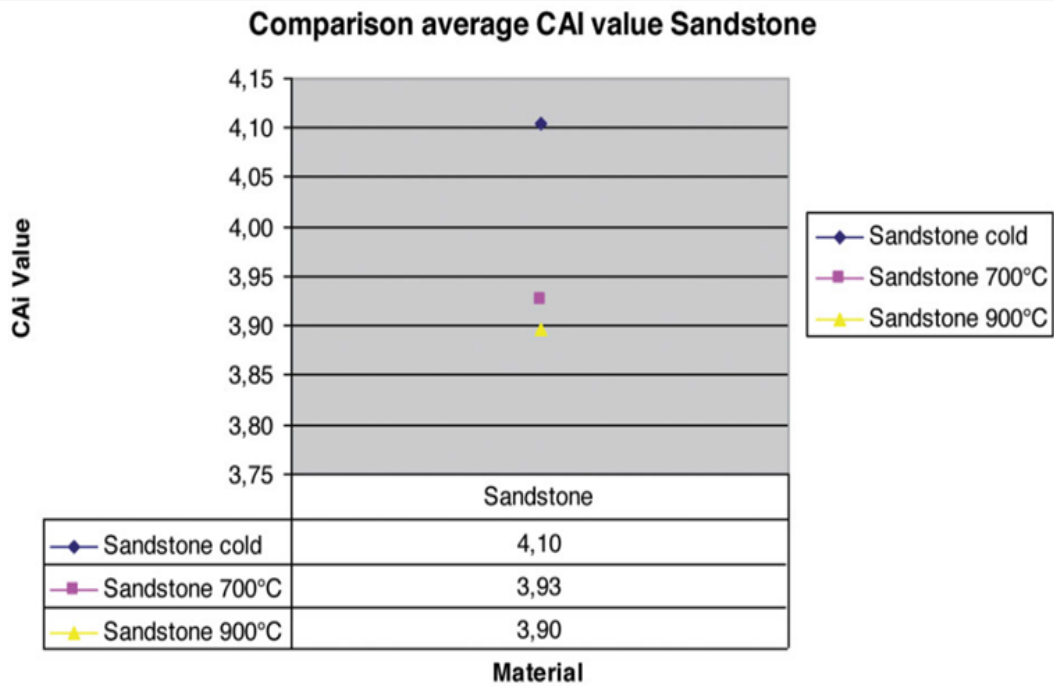
δοκιμών στη θερμοκρασία 700°C παρατηρείται σημαντική αύξηση του CAI. Πιο συγκεκριμένα στον αυστριακό χαλαζία παρατηρείται αύξηση κατά 22.5% ενώ στον βραζιλιάνικο κατά 20%.

Η επίδραση της θερμοκρασίας για το γρανίτη λειτουργεί αντίστροφα σε σχέση με τους καθαρούς χαλαζίες. Στο γρανίτη παρατηρείται πτώση της τιμής CAI κατά 5.5 %, από 4.18 σε 3.95. Αυτό το φαινόμενο εκτιμάται ότι οφείλεται στη χαμηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία του γρανίτη αλλά και στη μείωση της συνοχής των δεσμών του γρανίτη εξαιτίας της πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Για την περαιτέρω εξέταση του φαινομένου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στη θερμοκρασία των 900 °C τα οποία δείχνουν ότι η μείωση της συνοχής επιδρά στην μεγάλη πτώση της τιμής CAI στο 1.71. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε γρανίτη για τις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας φαίνονται στο Σχήμα 3.14.



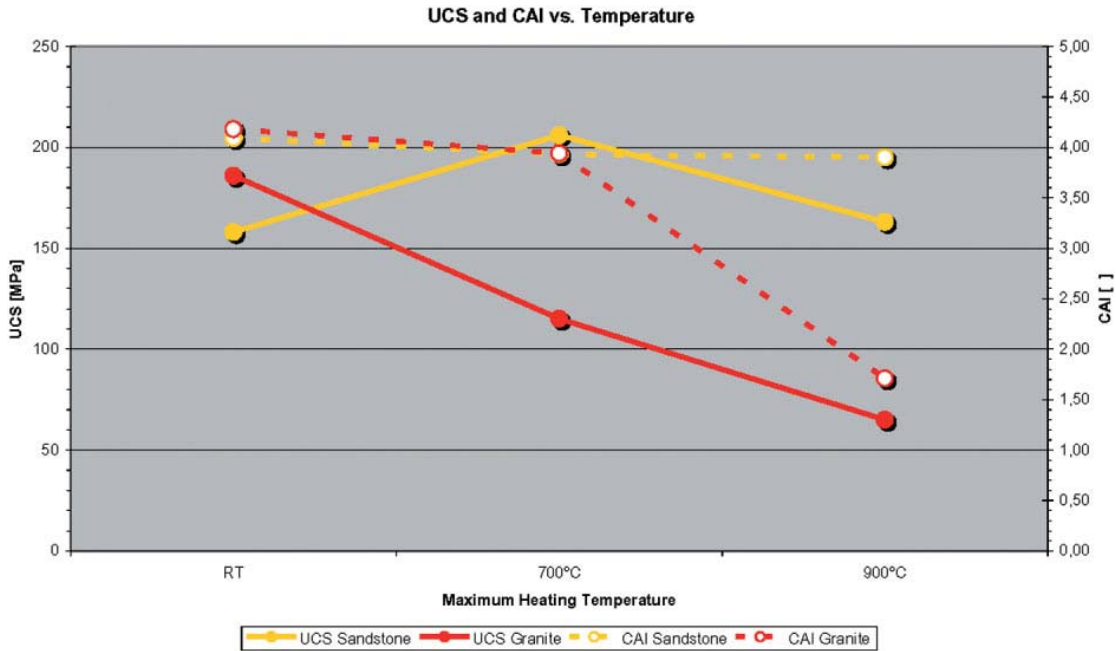
Σχήμα 3.14: Συγκριτικά αποτελέσματα του δείκτη CAI του γρανίτη για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας (Eberl et al. 2008)

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στον ψαμμίτη, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.15, προσιδιάζουν σε αυτά του γρανίτη με μείωση της τιμής CAI όσο αυξάνεται η θερμοκρασία σε επίπεδα μεγαλύτερα των 573°C. Αξίζει να αναφερθεί ωστόσο ότι στον ψαμμίτη παρατηρείται πολύ μικρότερη μείωση από τις τιμές CAI του γρανίτη στη θερμοκρασία των 900°C



Σχήμα 3.15: Συγκριτικά αποτελέσματα του δείκτη CAI του ψαμμίτη για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας (Eberl et al. 2008)

Ύστερα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και τις δοκιμές Cerchar έγινε μικροσκοπική ανάλυση στα δείγματα του γρανίτη και του ψαμμίτη τα οποία υποδεικνύουν επαρκώς τη θερμική επίδραση στη δομή των πετρωμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Η δομή και των δύο πετρωμάτων φαίνεται να "διαστέλλεται" πέραν κάποιας θερμοκρασίας, αλλά η αντίδραση των δύο πετρωμάτων στη μεταβολή των τάσεων εξαιτίας της θερμοκρασίας διαφέρει. Κάτι τέτοιο οφείλεται στη διαφορετική δομή των πετρωμάτων. Κατά την αστοχία του ψαμμίτη παρατηρείται θραύση και των κόκκων που τον συγκρατούν, ενώ κατά την αστοχία του γρανίτη θραύεται το συνδετικό υλικό.



Σχήμα 3.16: Τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) και του δείκτη CAI, του γρανίτη και του ψαμμίτη, για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας (Eberl et al. 2008)

Yarali et al. (2008)

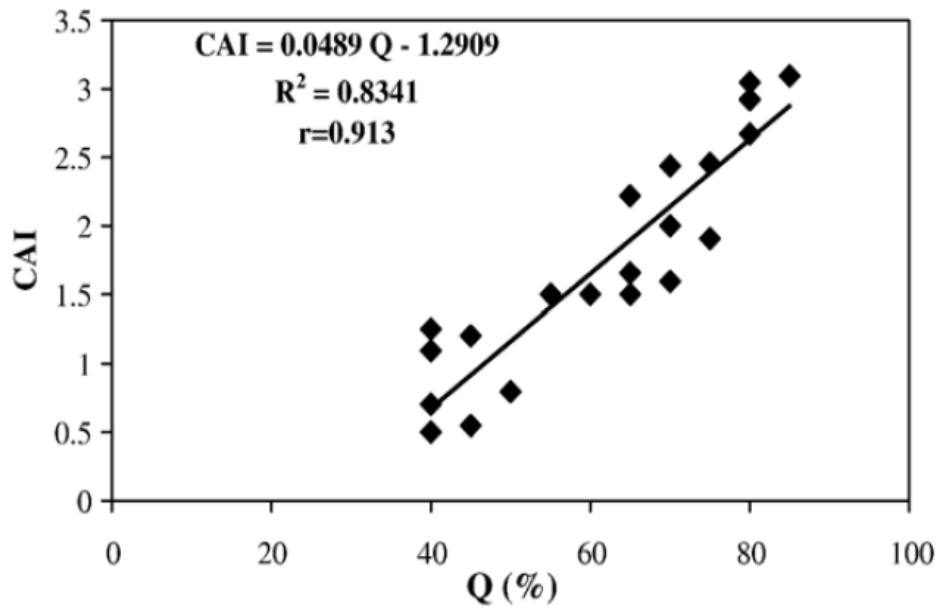
Στη δημοσίευση του Yarali και των συνεργατών του εξετάζεται η σχέση μεταξύ του δείκτη CAI και των πετρογραφικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των ανθρακωρυχείων στην περιοχή Zonguldak της Τουρκίας. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης έρευνας εξετάστηκαν 29 ιζηματογενή δείγματα και παρατηρήθηκε μια καλή γραμμική σχέση μεταξύ του CAI και του μέσου κόκκου χαλαζία. Τα αποτελέσματα επίσης έδειξαν ότι η αποξεστικότητα επηρεάζεται από την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος, το είδος και το βαθμό συγκόλλησης, την περιεκτικότητα και το μέσο μέγεθος κόκκου χαλαζία.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

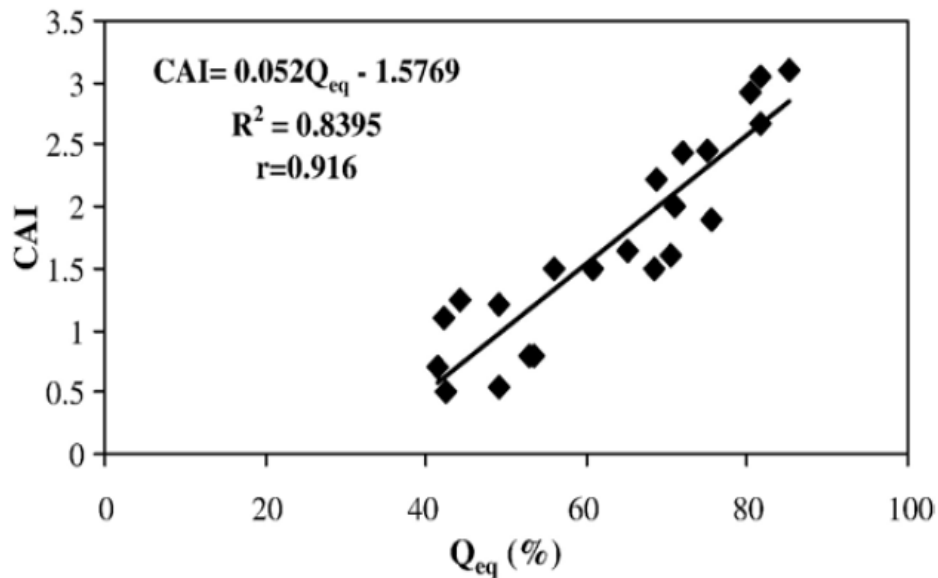
Πίνακας 3.5: Τιμές των παραμέτρων αποξερικότητας των δοκιμίων (Yarali et al. 2008)

Samples no	d (mm)	Q (%)	Q_{eq} (%)*	Cement type	Cement degree (%)	CAI (1/10 mm)
1	0.58	75	75.09	Clay	50	2.45
2	0.78	80	81.69	Silica	55	3.05
3	0.36	70	70.40	Clay	40	1.60
4	0.33	60	60.70	Carbonate	45	1.50
5	0.38	55	56.01	Clay	45	1.50
6	0.062	70	70.33	Ferrous+silica	50	1.15
7	0.06	30	31.02	Silica	45	1.00
8	0.062	40	44.25	Ferrous+Silica	45	1.25
9	0.05	50	52.80	Clay	30	0.80
10	0.035	10	10	Clay	30	0.80
11	0.035	10	10	Clay	30	0.70
12	0.52	75	75.45	Silica	55	1,90
13	0.54	70	71.03	Silica	55	2.00
14	0.40	65	65.12	Clay	40	1.65
15	0.40	45	51.90	Ferrous+silica	50	1.72
16	0.75	85	85.23	Silica	65	3.10
17	0.062	40	41.45	Clay	35	0,70
18	0.92	80	80.35	Silica	55	2.92
19	0.40	65	68.60	Ferrous+silica	50	2.22
20	0.42	65	68.47	Carbonate	40	1.50
21	0.60	55	58.70	Ferrous+silica	60	2.60
22	0.55	50	53.72	Ferrous+silica	55	2.30
23	0.58	70	71.95	Silica	55	2.44
24	0.05	40	42.45	Clay	30	0.50
25	0.07	45	49.13	Silica	45	1.20
26	0.25	40	42.29	Carbonate	45	1.10
27	0.75	80	81.75	Silica	60	2.67
28	0.07	45	49.05	Clay	35	0.55
29	0.07	50	53.52	Carbonate	45	0.80

Στο Σχήμα 3.17 και στο Σχήμα 3.18 παρατίθενται διαγράμματα συσχέτισης του δείκτη CAI τόσο με την περιεκτικότητα σε χαλαζία όσο και με ισοδύναμο ποσοστό χαλαζία (μη λαμβάνοντας υπόψη τα δείγματα ιλυόλιθου).

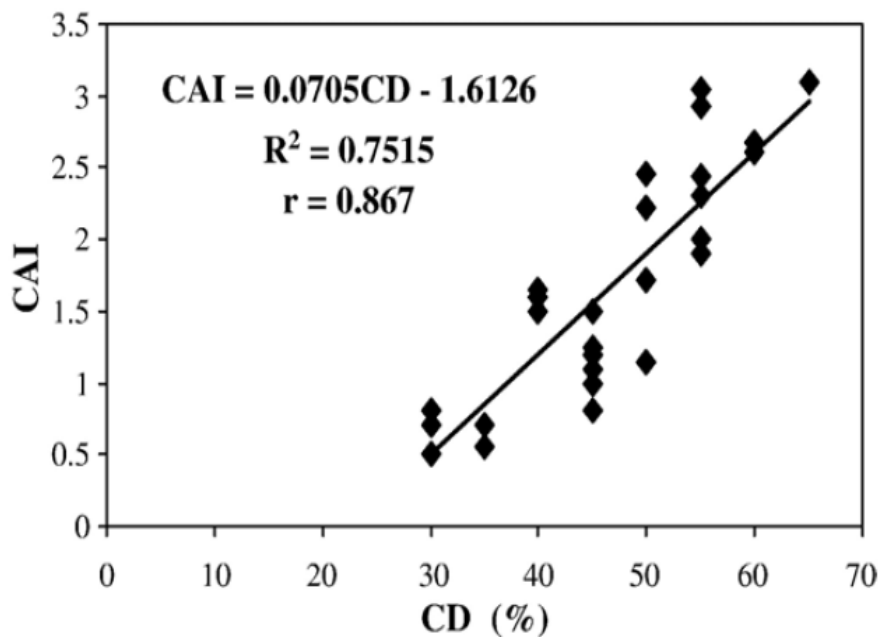


Σχήμα 3.17: Συσχέτιση του δείκτη CAI με την περιεκτικότητα σε χαλαζία (Yarali et al. 2008)



Σχήμα 3.18: Συσχέτιση του δείκτη CAI με το ισοδύναμο ποσοστό χαλαζία (Yarali et al. 2008)

Σημαντικός παράγοντας για την αποξεστικότητα αποδεικνύεται και ο βαθμός συγκόλλησης. Μια σύγκριση μεταξύ της τιμής CAI και του βαθμού συγκόλλησης φαίνεται στο Σχήμα 3.19.

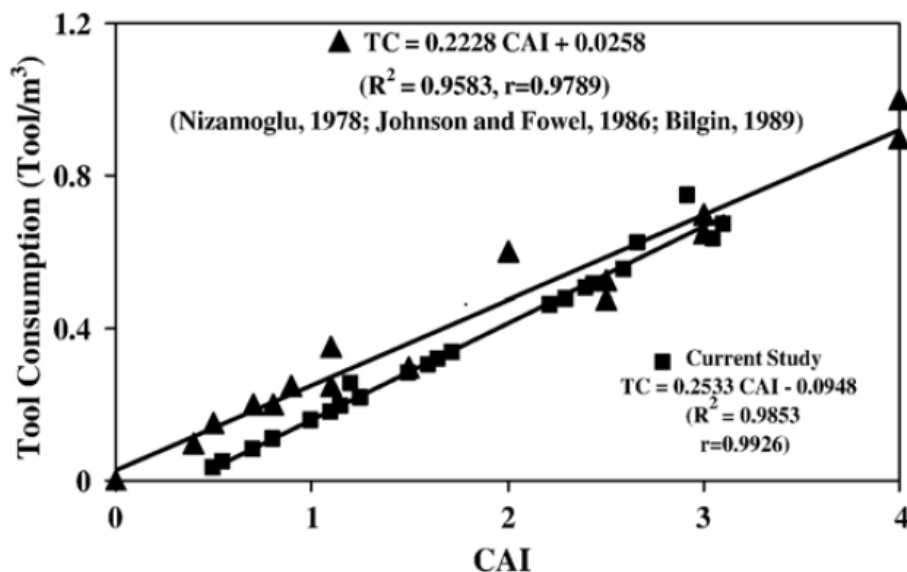


Σχήμα 3.19: Συσχέτιση του δείκτη CAI με το βαθμό συγκόλλησης (Yarali et al., 2008)

Πετρώματα με υψηλό βαθμό συγκόλλησης (>50%) θεωρούνται πολύ αποξεστικά, δηλαδή υπερβαίνουν την τιμή CAI 1.5. Μια καλή γραμμική συσχέτιση των δοκιμών δίνει την παρακάτω σχέση η οποία είναι έγκυρη για συγκόλληση >25%.

$$CAI = 0.0705 CD - 1.612$$

Σημαντικό κομμάτι της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί η συσχέτιση του δείκτη CAI με την κατανάλωση κοπτικών, η οποία απεικονίζεται σε διάγραμμα στο Σχήμα 3.20. Μέσω αυτής αποδεικνύεται ότι οποιαδήποτε αύξηση στο ποσοστό χαλαζία και των άλλων αποξεστικών ορυκτών, του μέσου κόκκου και της συγκόλλησης έχουν ευθεία αντανάκλαση στην κατανάλωση των κοπτικών.



Σχήμα 3.20: Συσχέτιση του δείκτη CAI με την κατανάλωση των κοπτικών (Yarali et al. 2008)

Stanford και Hagan (2009)

Οι Stanford και Hagan εξετάζουν την επίδραση που έχουν στην τιμή CAI οι αλλαγές στον τύπο χαλύβδινης ακίδας και στη σκληρότητα της.

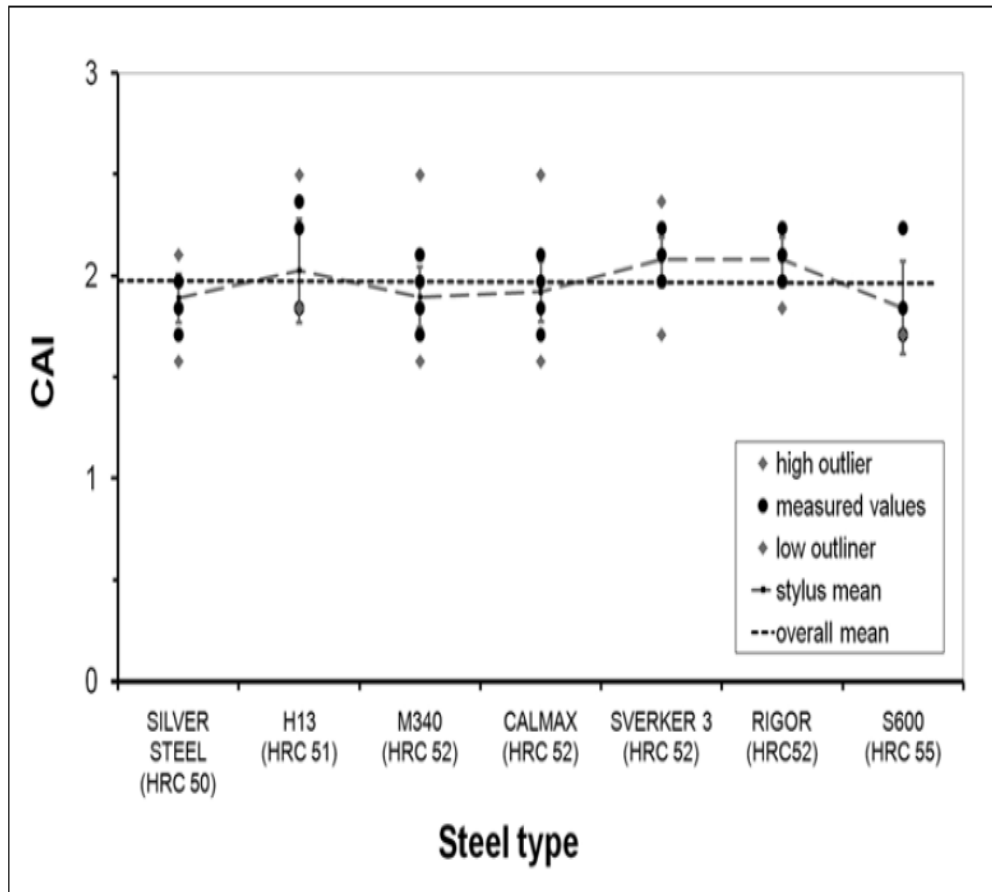
Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος εξετάστηκε η επίδραση του τύπου ακίδας (κατηγορία, σύνθεση) χρησιμοποιώντας επτά διαφορετικές ακίδες παρόμοιας σκληρότητας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6. Τα αποτελέσματα των δοκιμών των διαφορετικών ακίδων παρατίθενται στον Πίνακα 3.7 και στο Σχήμα 3.21.

Πίνακας 3.6: Ιδιότητες και σύσταση ακίδων προς δοκιμή (Stanford and Hagan 2009)

type	stylus hardness (HRC)	use	typical analysis (%)						
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Silver Steel	50	dimensionally stable steel used in cutting tools	0.95	0.25	1.1	0.55	-	0.55	0.1
H13	51	hot work tool steel	0.39	1.0	0.4	5.2	1.4	0.9	-
M340	52	plastic mould tool steel	0.54	0.45	0.4	17.3	1.1	0.1	-
CALMAX	52	plastic mould and cold work steel	0.6	0.35	0.8	4.5	0.5	0.2	-
SVERKER 3	52	cold work tool steel	2.05	0.3	0.8	12.7	-	-	1.1
Rigor	52	cold work tool steel	1.0	0.3	0.6	5.3	1.1	0.2	-
S600	55	high speed steel	0.9	0.25	0.3	4.1	5.0	1.8	6.4

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα των δοκιμών των διαφορετικών ακίδων (Stanford and Hagan 2009)

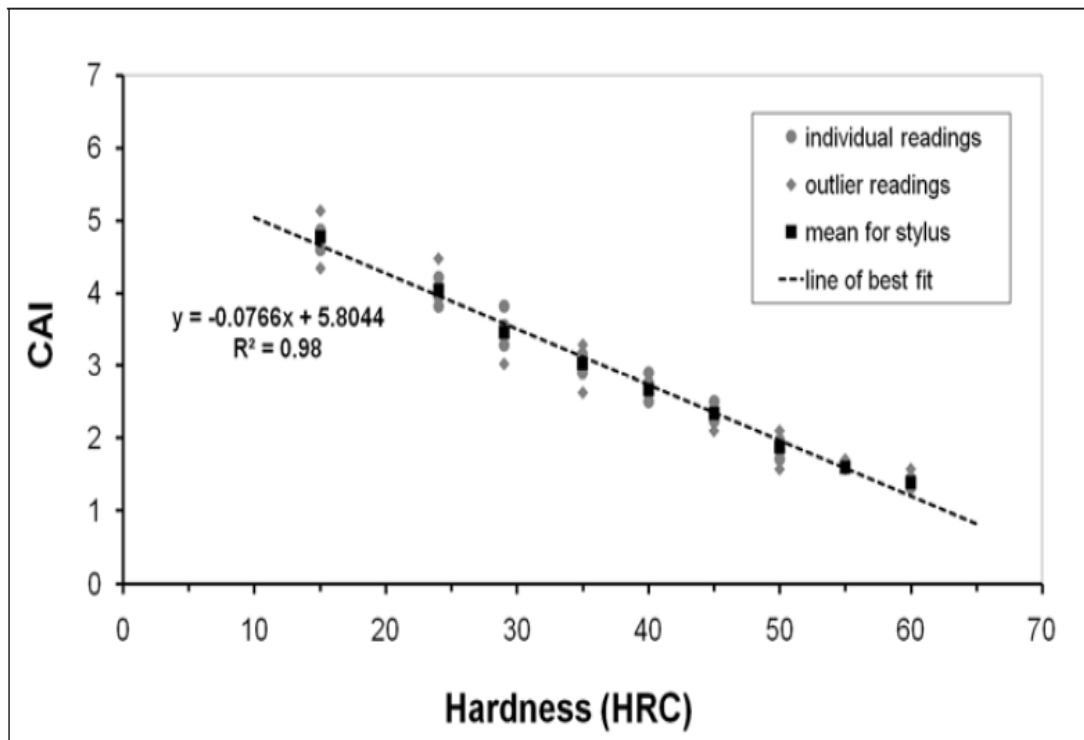
steel type	steel hardness (HRC)	CAI		coefficient of variation	deviation from mean CAI
		mean	s.d.		
Silver Steel	50	1.89	0.12	6.2%	-4.2%
H13	51	2.03	0.26	12.7%	+2.7%
M340	52	1.89	0.15	7.9%	-4.0%
CALMAX	52	1.92	0.15	7.8%	-2.7%
SVERKER 3	52	2.08	0.11	5.3%	+5.3%
Rigor	52	2.08	0.11	5.3%	+5.3%
S600	55	1.84	0.23	12.4%	-6.7%
mean		1.97	0.17	8.6%	



Σχήμα 3.21: Επίδραση του τύπου ακίδας στον δείκτη CAI, διατηρώντας σταθερή τη σκληρότητα (Stanford and Hagan 2009)

Στο δεύτερο μέρος εξετάστηκε η επίδραση στην αποξεστικότητα της σκληρότητας ακίδας, χρησιμοποιώντας εννέα επίπεδα σκληρότητας για ακίδες τύπου Silver Steel.

Για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων η δοκιμή Cerchar επαναλήφθηκε για κάθε ακίδα επτά φορές και η μέση τιμή CAI προέκυψε από τις πέντε ενδιάμεσες τιμές. Τα αποτελέσματα και οι συσχετίσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22: Επίδραση της σκληρότητας της ακίδας στον δείκτη CAI, διατηρώντας σταθερό τον τύπο ακίδας (Stanford and Hagan 2009)

Με βάση τα αποτελέσματα οι Stanford και Hagan καταλήγουν ότι το είδος της ακίδας δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις τιμές CAI αλλά η σκληρότητα της ακίδας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα των αποτελεσμάτων και θα πρέπει να αναφέρεται μαζί με τα αποτελέσματα μιας δοκιμής Cerchar.

Επίσης σε μια προσπάθεια να συμβάλλουν στην τυποποίηση της δοκιμής Cerchar οι Stanford και Hagan προτείνουν τα εξής:

- 1) Σε κάθε δοκιμή να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον τρεις ακίδες διαφορετικής σκληρότητας, η κάθε μια με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά στη σκληρότητα. Αυτό θα επιτρέψει την δημιουργία κατάλληλου μοντέλου που να δείχνει την μεταβολή του δείκτη CAI ανάλογα με την σκληρότητα ακίδας.
- 2) Οι ιδιότητες του υλικού της ακίδας θα πρέπει να αναφέρονται μαζί με τα αποτελέσματα της δοκιμής Cerchar.
- 3) Για μια αξιόπιστη εκτίμηση του δείκτη CAI απαιτούνται τουλάχιστον πέντε επαναλήψεις της δοκιμής. Προτιμότερο είναι να εκτελούνται επτά

επαναλήψεις, να απαλείφονται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή και ύστερα να υπολογίζεται η μέση τιμή του δείκτη CAI.

4) Αν και από τα αποτελέσματα δεν φαίνεται το είδος της ακίδας να επηρεάζει τον CAI, προτείνεται να χρησιμοποιούνται ακίδες από χάλυβα ή παρόμοιας σύστασης υλικό το οποίο είναι ανθεκτικό στην επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη μορφοποίηση του κωνικού άκρου της ακίδας.

5) Ο χάλυβας που επιλέγεται για την ακίδα πρέπει να είναι επιδεκτικός σε θερμική κατεργασία για μεγάλο εύρος σκληρότητας.

Jacobs και Hagan (2009)

Οι Jacobs και Hagan εξετάζουν την επίδραση στην τιμή CAI που έχει η αλλαγή σκληρότητας της ακίδας για ένα εύρος πετρωμάτων καθώς και οι μεταβολές σε διάφορες παραμέτρους της δοκιμής Cerchar, όπως το φορτίο που εφαρμόζεται, η διάρκεια της δοκιμής, το μήκος δοκιμής και η υγρασία του πετρώματος.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα δείγματα από πέντε είδη πετρωμάτων. Τα πέντε από τα δείγματα ήταν ψαμμίτες, τα τρία γρανίτες, ένα αιματίτης, ένα λιθάνθρακας και ένα αργιλικός σχιστόλιθος. Μερικές από τις ιδιότητες των δειγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8: Ιδιότητες δειγμάτων (Jacobs and Hagan 2009)

<i>sample</i>	<i>name or source</i>	<i>type</i>	<i>density (t/m³)</i>	<i>apparent porosity</i>	<i>UCS (MPa)</i>	
					<i>dry</i>	<i>wet</i>
1	Acrogem	sandstone	2.4	3.5%	70	50
2	Warrego	sandstone	2.3	4.4%	57	36
3	Mt White (white)	sandstone	2.3	4.4%	57	22
4	Mt White (brown)	sandstone	2.3	4.4%	57	22
5	Piles Ck	sandstone	2.3	4.2%	59	30
6	Ariah Park	granite	2.6	0.31%	208	177
7	Grandee Lio	granite	2.9	0.14%	270	240
8	Laguna Green	granite	2.7	0.07%	240	-
9	Pilbara	hematite	4.1	-	-	-
10	Pilbara	hematite	4.0	-	-	-
11	Newcastle	coal	-	-	-	-
12	Newcastle	shale	2.3	-	-	-

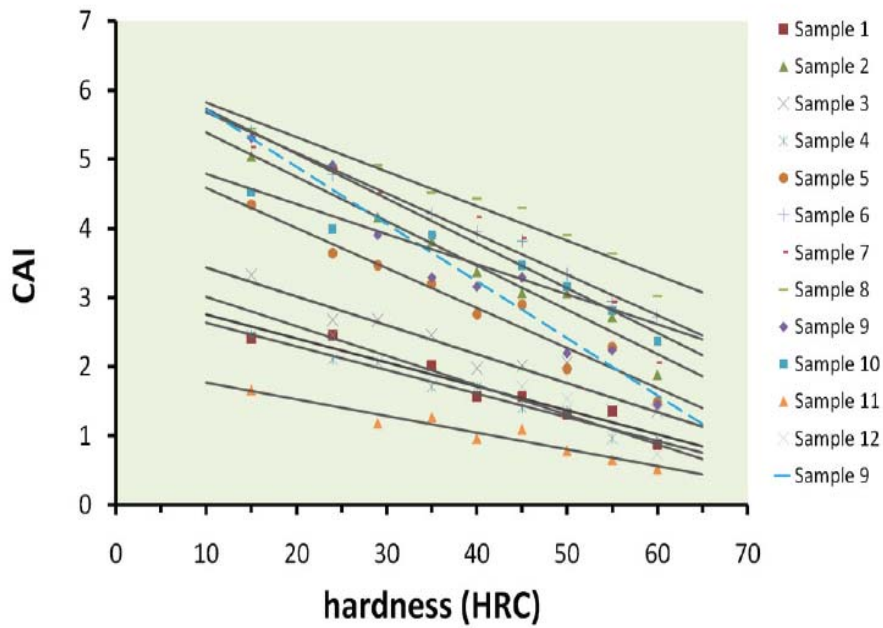
Κάθε δοκιμή Cerchar επαναλήφθηκε πέντε φορές από τις οποίες οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές δεν λήφθηκαν υπόψη και η μέση τιμή CAI προέκυπτε από τις υπόλοιπες τρεις.

Στον Πίνακα 3.9 φαίνονται οι τιμές CAI για κάθε δείγμα και για διάφορα επίπεδα σκληρότητας της ακίδας.

Πίνακας 3.9: Τιμές δείκτη CAI των δειγμάτων για διάφορες τιμές σκληρότητας της ακίδας (Jacobs and Hagan 2009)

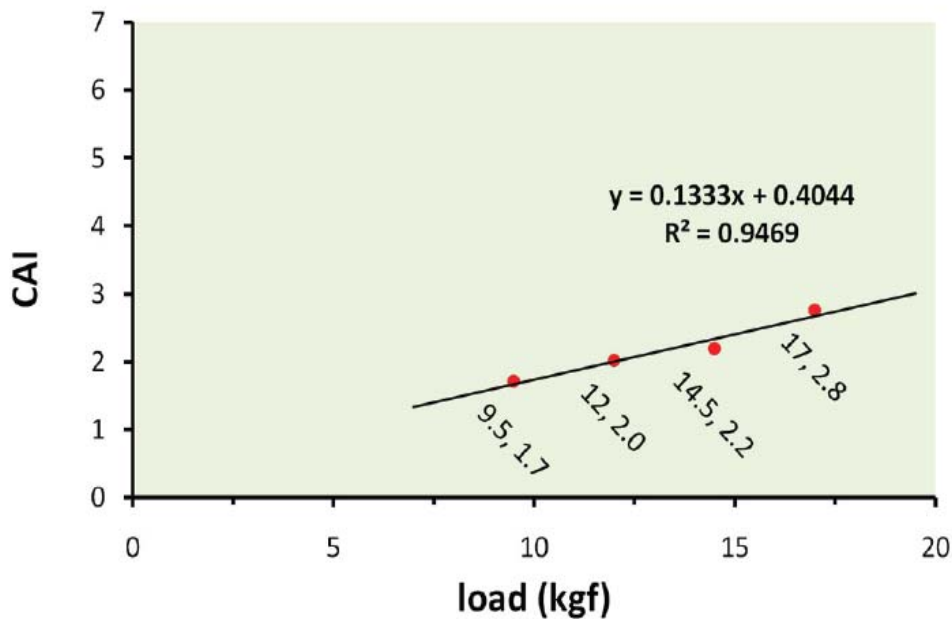
<i>sample</i>	<i>stylus hardness (HRC)</i>								
	15	24	29	35	40	45	50	55	60
1	2.4	2.5	2.6	2.0	1.6	1.6	1.3	1.4	0.9
2	5.0	3.2	4.2	3.8	3.4	3.1	3.1	2.7	1.9
3	3.3	2.7	2.7	2.5	2.0	2.0	2.1	1.4	1.4
4	2.5	2.1	2.1	1.7	1.7	1.4	1.4	1.0	1.0
5	4.3	3.6	3.5	3.2	2.8	2.9	2.0	2.3	1.5
6	5.4	4.8	4.1	4.2	3.9	3.8	3.3	2.9	2.7
7	5.2	4.9	4.5	3.9	4.2	3.9	3.0	2.9	2.1
8	5.4	4.5	4.9	4.5	4.4	4.3	3.9	3.6	3.0
9	5.3	4.9	3.9	3.3	3.2	3.3	2.2	2.2	1.5
10	4.5	4.0	4.6	3.9	4.4	3.5	3.2	2.8	2.4
11	1.7	0.9	1.2	1.3	1.0	1.1	0.8	0.7	0.5
12	2.3	2.5	2.1	1.9	1.4	1.7	1.5	1.0	0.7

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.23, δείχνει μια αντιστρόφως γραμμική σχέση μεταξύ του δείκτη CAI και της σκληρότητας της ακίδας. Η τάση μείωσης του CAI όσο αυξάνεται η σκληρότητα είναι παρόμοια για όλα τα δείγματα, ανεξαρτήτως του είδους του πετρώματος.



Σχήμα 3.23: Συσχέτιση του δείκτη CAI και της σκληρότητας της ακίδας για κάθε δείγμα (Jacobs and Hagan 2009)

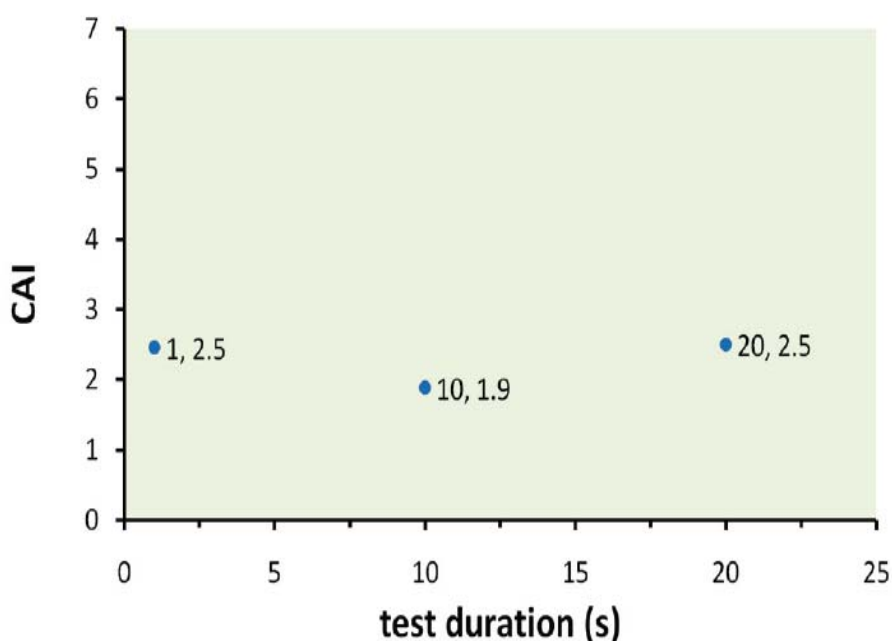
Εξετάστηκε επίσης η επίδραση της αλλαγής του φορτίου που εφαρμόζεται κατά την δοκιμή. Τα αποτελέσματα για δείγμα ψαμμίτη, τα οποία απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.24, δείχνουν αύξηση του δείκτη CAI με αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου με ένα γραμμικό τρόπο.



Σχήμα 3.24: Συσχέτιση του δείκτη CAI και του εφαρμοζόμενου φορτίου σε δείγμα (Jacobs and Hagan 2009)

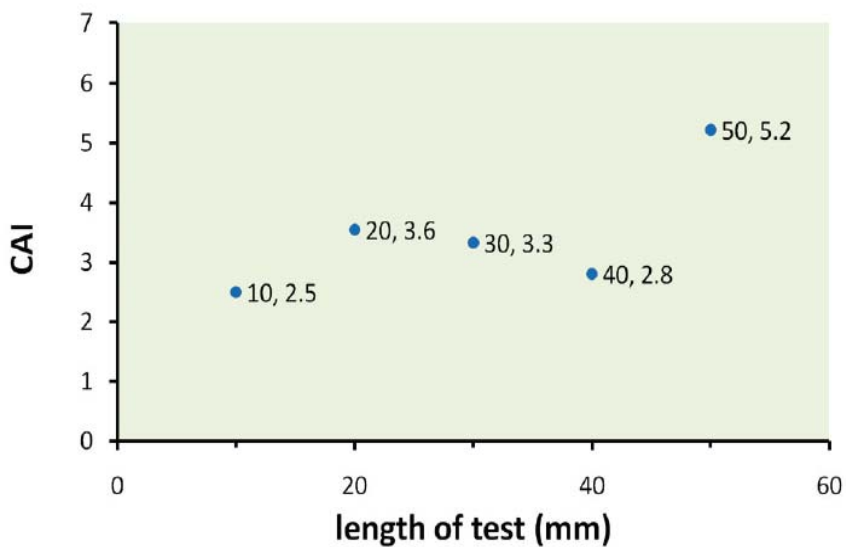
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια μεταβολή στο φορτίο $\pm 2N$ δεν επιφέρει σημαντική μεταβολή στην τιμή CAI (± 0.1).

Οι Jacobs και Hagan εξέτασαν επίσης την επίδραση που έχει η διάρκεια της δοκιμής αλλά και η επανάληψη της δοκιμής σε προϋπάρχουσα χαραγή. Τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.25, έδειξαν ότι η διάρκεια δοκιμής δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα, όμως η διενέργεια δοκιμής σε προϋπάρχουσα χαραγή μειώνει την τιμή CAI κατά περίπου μισή μονάδα.



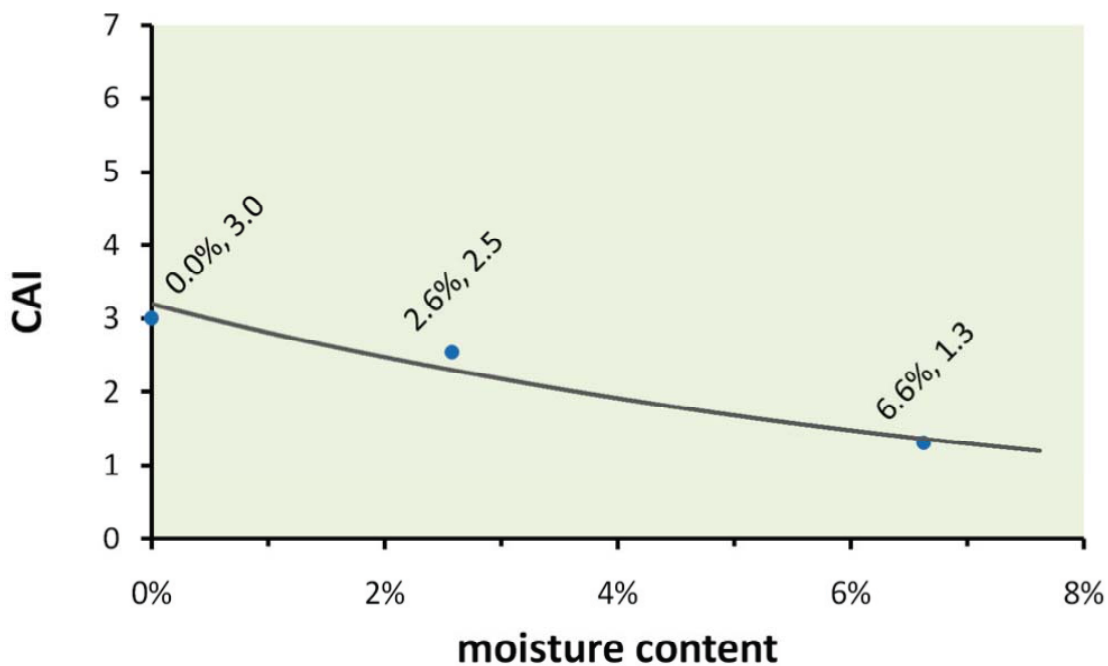
Σχήμα 3.25: Επίδραση της διάρκειας της δοκιμής στον δείκτη CAI (Jacobs and Hagan 2009)

Το μήκος της χαραγής κατά τη δοκιμή φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο. Ο διπλασιασμός της χαραγής από το πρότυπο των 10mm σε 20mm αύξησε το επίπεδα φθοράς της ακίδας και επομένως τον δείκτη CAI κατά 1.1 μονάδα. Έπειτα παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές έως την χαραγή 50mm η οποία οδήγησε σε υπερδιπλασιασμό της τιμής CAI. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Επίδραση του μήκους της δοκιμής στον δείκτη CAI (Jacobs and Hagan 2009)

Τέλος μετά από δοκιμές η υγρασία του δοκιμίου αποδεικνύεται σημαντικός παράγοντας στη διαμόρφωση της τιμής CAI. Παρατηρήθηκε μια διαφορά 2.7 μονάδων ανάμεσα σε ξηρό και σε κορεσμένο δοκίμιο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.27. Συνεπώς η δοκιμή Cerchar σε συνθήκες δωματίου μπορεί να δώσει μεγαλύτερες τιμές CAI από ότι σε επί τόπου συνθήκες.



Σχήμα 3.27: Επίδραση της υγρασίας στον δείκτη CAI (Jacobs and Hagan 2009)

3.2 Προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού της αποξεστικότητας πετρωμάτων με τη δοκιμή Cerchar από την ISRM

Η λειτουργικότητα και η αντιπροσωπευτικότητα της δοκιμής Cerchar την έχουν καταστήσει την πιο δημοφιλή μέθοδο προσδιορισμού και σύγκρισης της αποξεστικότητας των πετρωμάτων. Το αποτέλεσμα της δοκιμής, ο δείκτης CAI (Cerchar Abrasiveness Index), χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των κοπτικών κατά την κοπή του πετρώματος. Για τη δοκιμή Cerchar υπάρχουν, ουσιαστικά, δύο είδη συσκευών, η πρωτότυπη, όπως αναπτύχθηκε από το Cerchar (Valantin 1973) και η τροποποιημένη, όπως προτάθηκε από τον West (1989). Παρόλο που οι δύο συσκευές είναι παρόμοιες υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές που σε συνδυασμό με την αοριστία που επικρατούσε όσον αφορά τις συνθήκες δοκιμής, τις ιδιότητες της ακίδας, τον τρόπο μέτρησης και την προετοιμασία του δοκιμίου κατέστησαν αναγκαίο ένα ολοκληρωμένο και ευρέως αποδεκτό πρότυπο. Τη συγκεκριμένη ανάγκη επιχειρεί να καλύψει το πρότυπο της ISRM (2013), το οποίο περιγράφεται παρακάτω, σε μια προσπάθεια εξαγωγής άμεσα συγκρίσιμων αποτελεσμάτων μέσω της δοκιμής Cerchar.

3.2.1 Σκοπός της δοκιμής

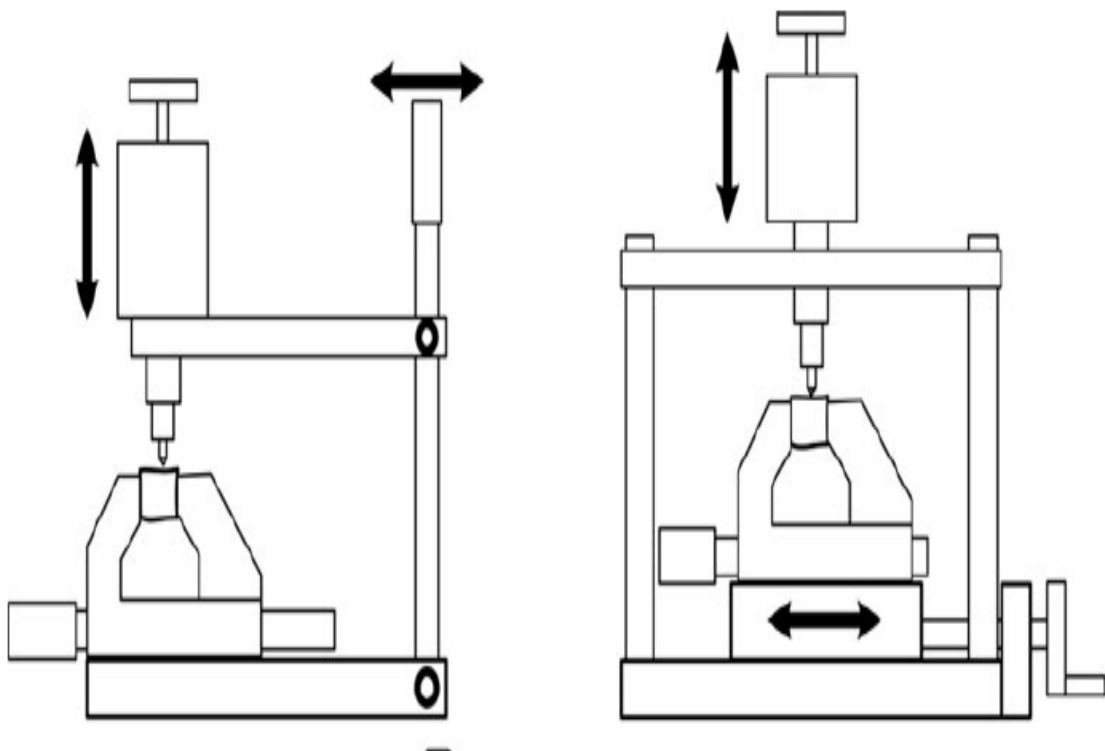
Μέσω της δοκιμής αποξεστικότητας επιδιώκεται ο υπολογισμός ενός δείκτη κατάλληλου για την ταξινόμηση της αποξεστικότητας ενός βραχώδους υλικού. Κατά τη δοκιμή μετριέται η φθορά της κορυφής μιας χαλύβδινης ακίδας σκληρότητας HRC 55.

Το δοκίμιο, σε σχήμα δίσκου ή ακανόνιστο, τοποθετείται στη συσκευή σε σταθερή θέση. Η κορυφή της ακίδας τοποθετείται προσεκτικά στην επιφάνεια του δείγματος. Στη συνέχεια, η ακίδα, υπό φορτίο 70N, μετακινείται κατά μήκος της βραχώδους επιφάνειας για 10mm. Η επιφάνεια φθοράς της κορυφής της ακίδας μετριέται με μικροσκόπιο ακριβείας 0.01mm. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται 5 φορές και λαμβάνεται ο μέσος όρος της μετρούμενης φθοράς. Ο δείκτης αποξεστικότητας, CAI, είναι μια αδιάστατη τιμή που προκύπτει από πολλαπλασιασμό της διαμέτρου της επιφάνειας φθοράς, μετρούμενης σε 0.01mm επί 10. Π.χ εάν η διάμετρος της επιφάνειας φθοράς της ακίδας μετρήθηκε ότι είναι 0.25mm, η αντίστοιχη τιμή για την τιμή του CAI είναι 2.5.

3.2.2 Εξοπλισμός δοκιμής

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί οι οποίοι ενεργοποιούν την κίνηση ανάμεσα στην ακίδα και την επιφάνεια του πετρώματος. Στην πρωτότυπη συσκευή Cerchar η ακίδα και το εφαρμοζόμενο φορτίο επί αυτής κινούνται κατά μήκος της σταθερής επιφάνειας

του δοκιμίου. Στην περίπτωση της συσκευής West, το δοκίμιο κινείται κάτω από την σταθερή ακίδα. Συνέπεια της διαφορετικής σχεδίασης των συσκευών είναι η διαφορά στη διάρκεια της δοκιμής, καθώς με τη συσκευή Cerchar η δοκιμή εκτελείται αρκετά πιο γρήγορα. Η διάρκεια της δοκιμής για μετακίνηση της ακίδας επί του δοκιμίου 10mm πρέπει να είναι $1\pm 0.5s$ για τον τύπο συσκευής Cerchar και $10\pm 2s$ για τον τύπο συσκευής West. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και στις δύο περιπτώσεις είναι 70N. Οι συσκευές και ο τρόπος κίνησης των μερών τους φαίνονται στο Σχήμα 3.28.



Σχήμα 3.28: Η συσκευή τύπου Cerchar (αριστερά) και η συσκευή τύπου West (δεξιά) (ISRM 2013)

Η ακίδα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και θερμικά κατεργασμένη έτσι ώστε να έχει την επιθυμητή σκληρότητα. Από την ISRM συνιστάται η αποκλειστική χρήση ακίδας σκληρότητας $HRC 55\pm 1$. Η διάμετρος της ακίδας πρέπει να είναι τουλάχιστον 6mm και το ορατό μήκος της, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, τουλάχιστον 15mm. Η γωνία που σχηματίζει η κορυφή της ακίδας πρέπει να είναι 90° .

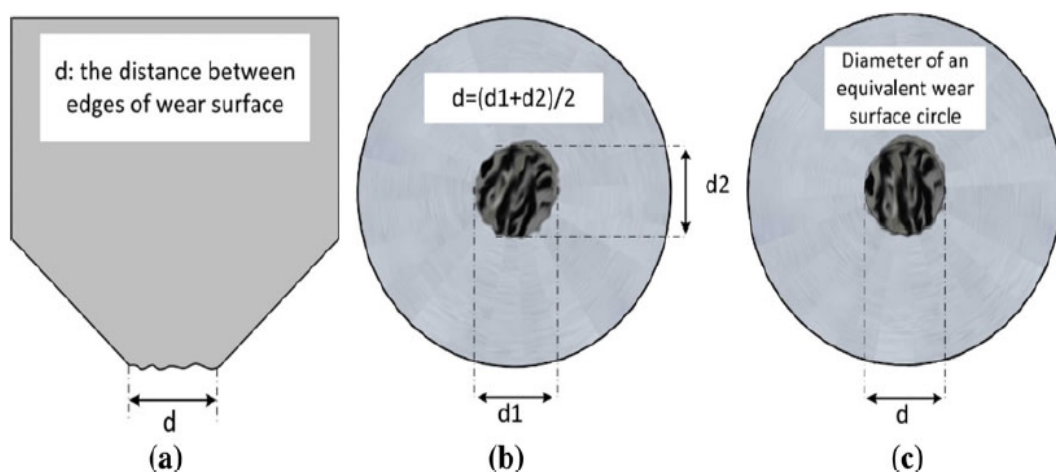
Το δοκίμιο μπορεί να είναι είτε σχήματος δίσκου είτε ακανόνιστο. Από την ISRM συνιστάται η δοκιμή να πραγματοποιείται σε τραχείες επιφάνειες. Εναλλακτικά, εάν δεν είναι το παραπάνω δυνατό, η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε λείες επιφάνειες κομμένες με αδαμαντοπρίονο. Το δοκίμιο μπορεί να είναι κορεσμένο, να έχει την φυσική του υγρασία ή και αποξηραμένο είτε από έκθεση στον αέρα είτε

σε κλίβανο. Δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος των κόκκων του πετρώματος, με την προϋπόθεση ότι για πετρώματα με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο των 2mm πρέπει να εκτελούνται περισσότερες από 5 δοκιμές. Το μέγεθος της επιφάνειας του πετρώματος πρέπει να επιτρέπει τη διενέργεια 5 χαραγών. Κάθε μια χαραγή πρέπει να απέχει από τις άλλες, αλλά και από την άκρη της επιφάνειας, τουλάχιστον 5mm.

Για ανισότροπα πετρώματα, όπως τα σχιστώδη πετρώματα, πρέπει να δίνεται προσοχή στη διεύθυνση χάραξης και να εκτελούνται δοκιμές τόσο κάθετα όσο και παράλληλα στο επίπεδο ανισοτροπίας.

3.2.3 Μέτρηση της φθοράς της ακίδας

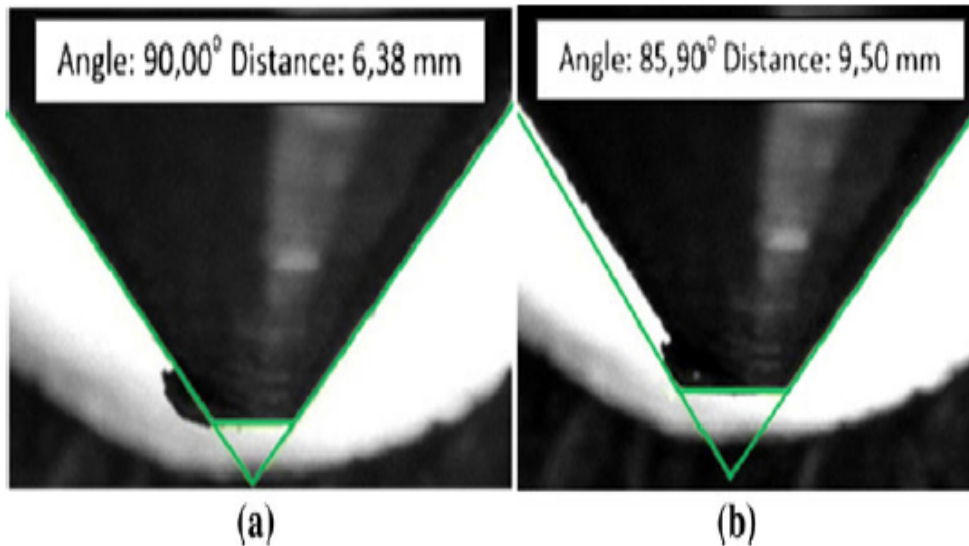
Η μέτρηση του μήκους ή της διαμέτρου, d , της φθοράς της ακίδας πρέπει να βασίζεται σε οπτικές ή ψηφιακές μεθόδους χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο ελάχιστης μεγέθυνσης 25x και ευκρίνειας τουλάχιστον $\pm 0.005\text{mm}$. Οι μετρήσεις μπορούν να εκτελεστούν σε πλάγια ή κατακόρυφη όψη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29: Μετρήσεις από πλάγια (a) και κατακόρυφη (b) και (c) όψη (ISRM 2013)

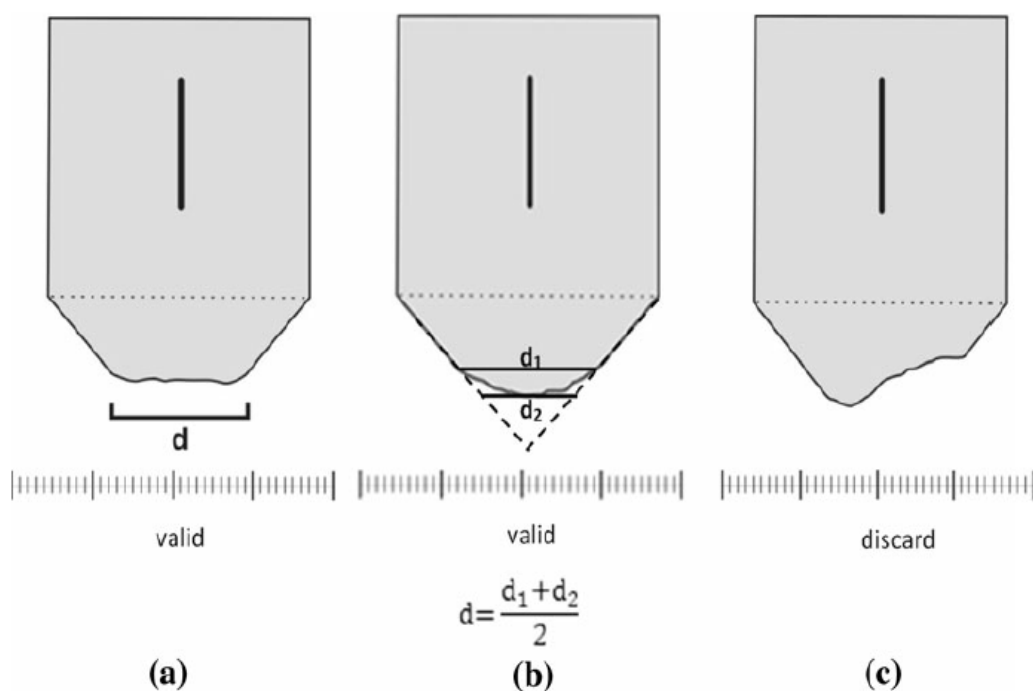
Οι περιπτώσεις 3.29 (a), (b) προτείνονται για οπτική μέτρηση, ενώ η περίπτωση 3.29 (c) προτείνεται για ψηφιακή μέτρηση.

Από την ISRM προτείνεται ως πιο αξιόπιστη η μέτρηση από πλάγια όψη γιατί, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.30, η κατακόρυφη όψη μπορεί να παραπλανήσει για το μέγεθος της φθοράς.



Σχήμα 3.30: Περίπτωση σωστής μέτρησης από πλάγια όψη (a) και περίπτωση πιθανής λανθασμένης μέτρησης και υπερεκτίμησης της φθοράς από κατακόρυφη όψη (b) (ISRM 2013)

Βασικό στοιχείο για μια σωστή μέτρηση, επισημαίνει ο Rostami (2005), είναι ο σωστός προσδιορισμός των ορίων φθοράς. Πολλές φορές η πλάγια όψη μπορεί να κάνει την μέτρηση από δύσκολή έως και μη αποδεκτή. Γι αυτό το λόγο προτείνεται από την ISRM οι μετρήσεις της πλάγιας όψης να ακολουθούν το πρότυπο του Σχήματος 3.31.



Σχήμα 3.31: Αποδεκτές όψεις φθοράς (a), (b) και τα αντίστοιχα μήκη φθοράς, μη αποδεκτή όψη φθοράς (c) και απορριπτόα μέτρηση (ISRM 2013)

Συνιστάται επίσης, για τις μετρήσεις πλάγιας όψης, η μέτρηση της ακίδας ανά 90° στο κάθετο και στο παράλληλο επίπεδο χάραξης.

Για την περίπτωση κατακόρυφης όψης συνιστώνται 2 μετρήσεις, ενώ για τις ψηφιακές μετρήσεις μία μέτρηση είναι αρκετή.

3.2.4 Υπολογισμοί

Για κάθε μέτρηση της φθοράς, d , ο δείκτης CAI υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CAI = d \times 10$$

όπου d είναι το μήκος της φθοράς της ακίδας μετρημένη με ακρίβεια 0.01mm. Ο αδιάστατος δείκτης CAI αναφέρεται ως αριθμητικός μέσος 5 ή και περισσότερων μετρήσεων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10: Παράδειγμα αποτελεσμάτων δοκιμής Cerchar, πλάγιας όψης, 5 επαναλήψεων και υπολογισμός δείκτη CAI (ISRM 2013)

Test No.	1	2	3	4	5
Pin Hardness (HRC)	55	55	55	55	55
Measurement d_1 (mm)	0.40	0.42	0.42	0.40	0.39
Measurement d_2 (mm)	0.41	0.44	0.40	0.41	0.38
Measurement d_3 (mm)	0.40	0.42	0.41	0.40	0.39
Measurement d_4 (mm)	0.42	0.41	0.41	0.44	0.39
Mean reading d_M (mm)	0.41	0.42	0.41	0.41	0.39
Mean pin wear (mm)					0.41
CERCHAR-Abrasivity-Index (CAI) (-)					4.1
Standard deviation of CAI					0.11

Στην περίπτωση που στη δοκιμή χρησιμοποιηθεί ακίδα σκληρότητας διαφορετικής από HRC 55±1, ο δείκτης CAI μπορεί να μετατραπεί μέσω της σχέσης που προτείνουν οι Jacobs και Hagan (2009):

$$CAI' = 0.415 CAI_{(x)} / (1 - 0.0107 x)$$

όπου

CAI' : η ισοδύναμη τιμή CAI για HRC 55

x : η τιμή της σκληρότητας

CAI_(x) : ο υπολογισμένος δείκτης CAI για σκληρότητα x

Στην περίπτωση που η δοκιμή γίνεται σε λεία επιφάνεια πρέπει να γίνεται η διόρθωση του μήκους φθοράς, d_s , σύμφωνα με τη σχέση:

$$d = 1.14 d_s$$

3.2.5 Ταξινόμηση

Η ταξινόμηση με βάση την αποξεστικότητα δίνεται στον Πίνακα 3.11. Η ταξινόμηση αφορά υπολογισμένους CAI ή τροποποιημένους CAI για σκληρότητα HRC 55 και

τραχείες επιφάνειες. Η ταξινόμηση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για άλλες τιμές σκληρότητας της ακίδας

Πίνακας 3.11: Ταξινόμηση αποξεστικότητας πετρωμάτων με βάση τον δείκτη CAI (ISRM 2013)

Mean CAI	Classification
0.1–0.4	Extremely low
0.5–0.9	Very low
1.0–1.9	Low
2.0–2.9	Medium
3.0–3.9	High
4.0–4.9	Very high
≥ 5	Extremely high

3.2.6 Έκθεση δοκιμής

Κάθε αναφορά σε δοκιμή Cerchar πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Προέλευση δειγμάτων, ημερομηνία δειγματοληψίας, μέθοδος διατήρησης κατά την μεταφορά τους στο χώρο δοκιμής
- Ημερομηνία δοκιμής
- Τρόπος αποθήκευσης και προετοιμασίας δοκιμίου (εμποτισμός, έκθεση στον αέρα, ξήρανση σε κλίβανο)
- Είδος πετρώματος
- Μέγεθος μέγιστου κόκκου
- Επίπεδα ασυνέχειας ή ανισοτροπίας (στρώσεις, σχιστότητα κλπ)
- Διεύθυνση χάραξης
- Κατάσταση επιφάνειας (τραχεία, λεία)
- Σκληρότητα HRC ακίδας
- Τύπος συσκευής
- Μέθοδος μέτρησης
- Μετρήσεις δείκτη CAI και τυπική απόκλιση τους
- Ταξινόμηση με βάση τον Πίνακα 3.11

3.3 Διερεύνηση της συσχέτισης του δείκτη CAI με τη δυσθραυστότητα

Η δυσθραυστότητα αποτελεί μια εσωτερική ιδιότητα του υλικού, η οποία εκφράζει την αντίσταση του υλικού στη διάδοση ρωγμών, και είναι ένας δείκτης της ενέργειας που απαιτείται για την δημιουργία μιας νέας επιφάνειας από θραύση σε ένα υλικό. Πιο συγκεκριμένα, η δυσθραυστότητα είναι η οριακή τιμή του συντελεστή έντασης τάσης (stress intensity factor), K_1 , κατά την οποία το υλικό αστοχεί. Ο συντελεστής έντασης τάσης, K_1 , αποτελεί το μέτρο του συνδυασμού του μεγέθους της ρωγμής, της γεωμετρίας και του φορτίου. Η δυσθραυστότητα είναι μια ιδιότητα των υλικών με πολύ μεγάλη σημασία για την αντοχή των υλικών που υπόκεινται σε συνεχείς φορτίσεις, όπως τα πετρώματα.

3.3.1 Δοκιμές προσδιορισμού δυσθραυστότητας

Παρόλο που η International Society of Rock Mechanics (ISRM) προτείνει τις δοκιμές Chevron (ράβδου και δίσκου) σαν τις καταλληλότερες δοκιμές προσδιορισμού της δυσθραυστότητας, η χρήση αυτών των δοκιμών δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Η πολυπλοκότητα των συγκεκριμένων δοκιμών και η δυσκολία παραγωγής άμεσων, μετρήσιμων αποτελεσμάτων είναι προβλήματα που συναντώνται αμέσως. Οι Donovan και Karfakis (2004) θεωρούν ότι είναι απαραίτητη μια πιο απλή διαδικασία με άμεσα, συγκρίσιμα αποτελέσματα και προτείνουν τη δοκιμή της σφήνας σε δίσκο με εγκοπή (edge notched disc, END). Θεωρούν ότι η δοκιμή αυτή είναι ικανή να δώσει συσχετίσεις της δυσθραυστότητας, της ενέργειας θραύσης και της κατανομής του μεγέθους των θραυσμάτων για διάφορα πετρώματα, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την καλύτερη πρόβλεψη της απόδοσης των κοπτικών.

Όπως προαναφέρθηκε η αντίσταση ενός υλικού στη διάδοση ρωγμών μπορεί να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη δυσθραυστότητα, K_{1c} , δηλαδή την οριακή τιμή του συντελεστή έντασης τάσης. Όταν ο συντελεστής έντασης τάσης, K , φθάσει και ξεπεράσει την τιμή K_{1c} στην άκρη της ρωγμής ξεκινά η θραύση και διαδίδεται η ρωγμή. Η δυσθραυστότητα συνδέεται με την τάση και το μήκος της ρωγμής από την ακόλουθη σχέση:

$$K_{1c} = F \sigma_a \sqrt{\pi a}$$

όπου F είναι μια αδιάστατη συνάρτηση που εξαρτάται από το μήκος της ρωγμής, σ_a είναι η τάση και a είναι το μισό του μήκους ρωγμής.

$$F = f\left(\frac{a}{W}\right)$$

όπου W είναι είτε το πάχος του δοκιμίου είτε κάποια ισοδύναμη διάσταση σ' αυτό. Σε επίπεδες επιφάνειες και φορτία όπως στην περίπτωση των πετρωμάτων, ο συντελεστής έντασης τάσης μπορεί να εξαχθεί από την ακόλουθη σχέση:

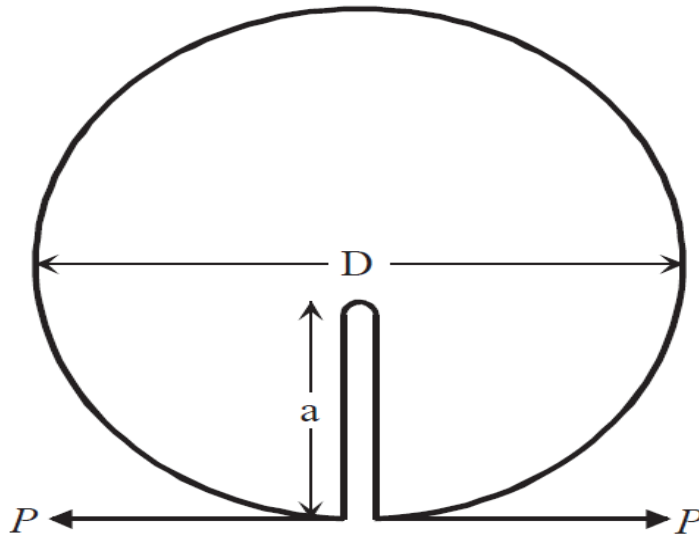
$$K = F_p \frac{P}{t\sqrt{W}}$$

όπου F_p είναι ένας αδιάστατος γεωμετρικός παράγοντας που ορίζεται ως

$$F_p = f_p(\text{geometry}, a/W)$$

Προκειμένου να προσδιορισθεί η δυσθραυστότητα των πετρωμάτων χρησιμοποιώντας ένα δίσκο με εγκοπή, είναι απαραίτητο να προσδιορισθούν ο συντελεστής έντασης τάσης και ο δείκτης F . Σε ό,τι αφορά στο δοκίμιο του Σχήματος 3.32 οι Isida et al. δίνουν ότι η τιμή F προκύπτει από την σχέση:

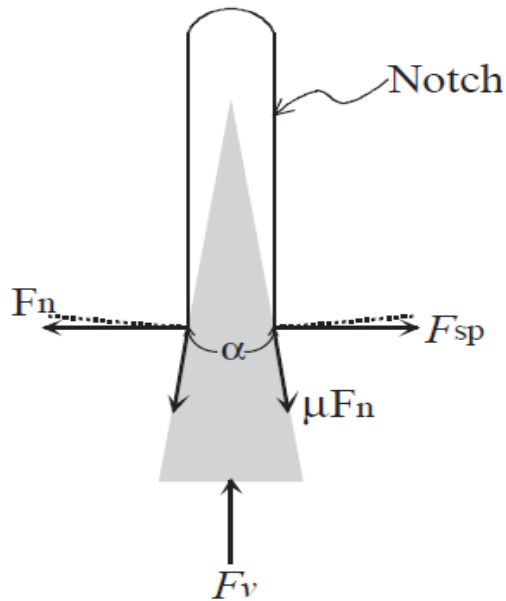
$$F_{Isida} = \frac{K_I D}{P\sqrt{\pi a}}$$



Σχήμα 3.32: Δοκίμιο δίσκου με εγκοπή και γεωμετρία φόρτισης (Donovan and Karfakis 2004)

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.32, η ανάλυση των τάσεων για τη συγκεκριμένη γεωμετρία δοκιμίου απαιτεί να δράσουν στο στόμιο της ρωγμής ίσες και αντίρροπες δυνάμεις, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας σφήνας. Η δύναμη F_{sp} , είναι η οριζόντια συνιστώσα της δρώσας δύναμης στο στόμιο της ρωγμής και υπολογίζεται από τις εξισώσεις ισορροπίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.33. Η παρακάτω σχέση δείχνει τη δύναμη F_{sp} ως συνάρτηση της κάθετης δύναμης, F_v , που δρα στη σφήνα, της γωνίας α της σφήνας και του συντελεστή τριβής, μ , των δύο υλικών

$$F_{sp} = \frac{F_v}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{1 - \mu \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{1 + \mu \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$



Σχήμα 3.33: Δυνάμεις που ασκούνται στη σφήνα (Donovan and Karfakis 2004)

Η σφήνα προσφέρει ένα μηχανικό πλεονέκτημα, το οποίο αυξάνεται όσο μικραίνει η γωνία της σφήνας. Σημαντικό είναι να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στο υλικό της σφήνας και στο δοκίμιο καθώς υπάρχει περίπτωση οι απώλειες λόγω τριβής να είναι σημαντικές. Οι Donovan και Karfakis προτείνουν για την εφαρμογή της δοκιμής σφήνας να μετριέται η γωνία ολίσθησης, ϕ , ανάμεσα στο δοκίμιο και το υλικό της σφήνας και κατόπιν να υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στα δύο υλικά από τη σχέση $\mu = \tan\phi$.

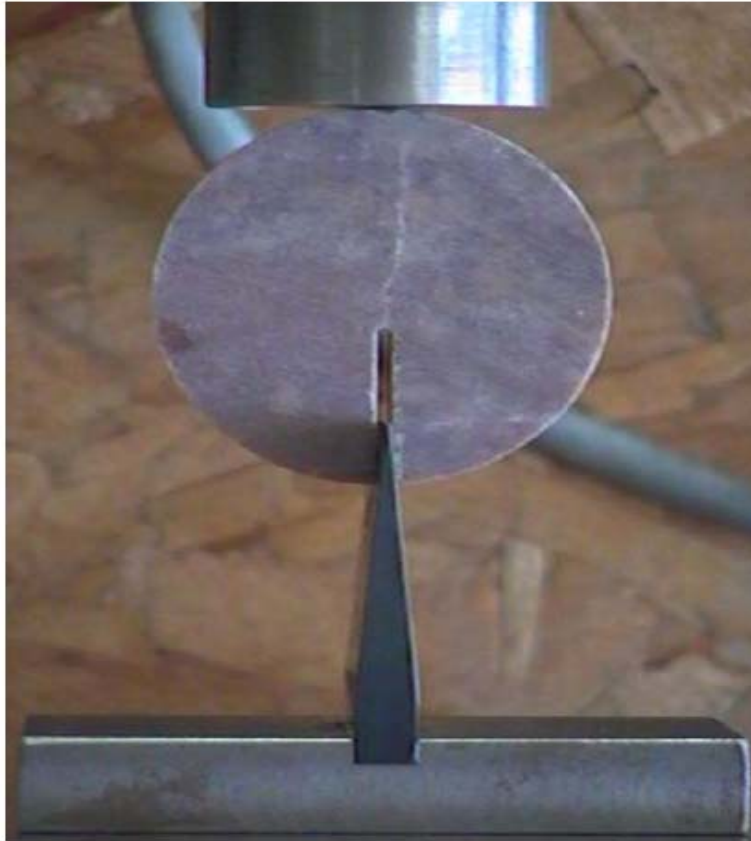
Το δοκίμιο μπορεί εύκολα να προετοιμαστεί με ένα αδαμαντοπρίονο χαράσσοντας μια γραμμή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.33. Οι ελάχιστες απαιτήσεις διαστάσεων για τη χαραγή είναι οι εξής:

$$\left. \begin{array}{l} D \\ \alpha \end{array} \right\} \geq 2.5 \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_t} \right)^2 \quad t \geq \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_t} \right)^2 ,$$

Η διάμετρος του δείγματος προτείνεται περίπου στα 50mm και το πάχος 25.4mm.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της δύναμης στο στόμιο της ρωγμής αποτελείται από χάλυβα και η σφήνα έχει γωνία 11° . Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.34.

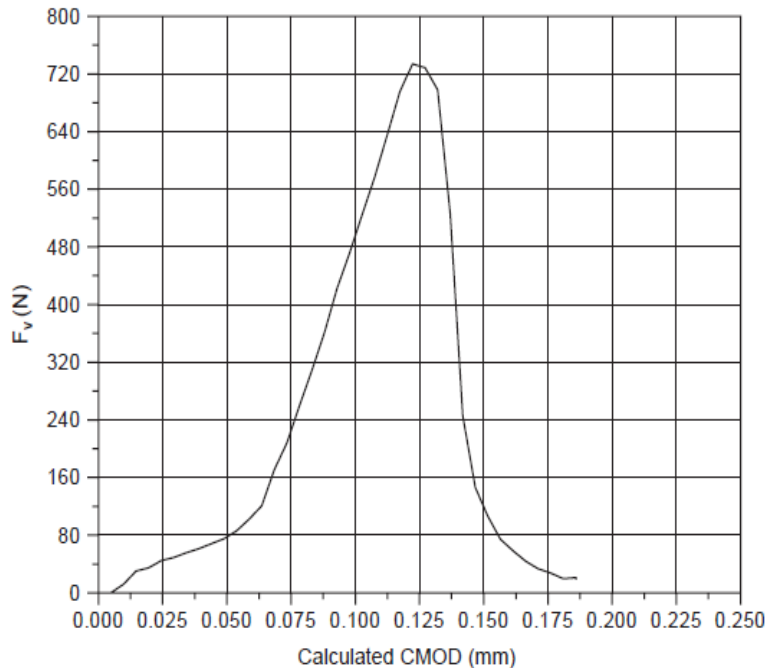
Το δοκίμιο END τοποθετείται στη σφήνα και κάθετο φορτίο εφαρμόζεται με την κάθετη μετατόπιση κατά τον άξονα της διάταξης, ενώ καταγράφονται το φορτίο και η μετατόπιση.



Σχήμα 3.34: Η διάταξη της δοκιμής (Donovan and Karfakis 2004)

Σύμφωνα με τα προηγούμενα δεδομένα, μόνο το μέγιστο φορτίο είναι απαραίτητο για να υπολογιστεί η δυσθραυστότητα, K_{Ic} . Ωστόσο, τα δεδομένα για το φορτίο και τη μετατόπιση πρέπει να καταγράφονται για να επαληθευθεί ότι το μέγιστο φορτίο είναι το κρίσιμο φορτίο από το οποίο προκύπτει η διάδοση της ρωγμής. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή, αυτό που απαιτείται είναι η εκτίμηση του ανοίγματος της ρωγμής. Το άνοιγμα της ρωγμής (crack mouth opening displacement, CMOD) μπορεί να υπολογισθεί από την κάθετη μετατόπιση και τη γωνία της σφήνας. Η μέθοδος της τέμνουσας κλίσης της ελαστικής περιοχής του διαγράμματος του φορτίου προς το CMOD φέρεται να είναι ικανοποιητική για τον προσδιορισμό του κρίσιμου φορτίου, αν και σε κάποια μικρότερα δείγματα μπορεί να δίνει μικρότερες τιμές για τη δυσθραυστότητα. Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατή η επαλήθευση ότι το

μέγιστο φορτίο είναι και το κρίσιμο κατά τη διάρκεια δοκιμών σφήνας σε δίσκο με εγκοπή για διάφορα πετρώματα, χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα όπως αυτό του Σχήματος 3.35.



Σχήμα 3.35: Διάγραμμα κάθετου φορτίου-ανοίγματος ρωγμής (Donovan and Karfaks, 2004)

Ο υπολογισμός της δυσθραυστότητας με την δοκιμή σφήνας είναι άμεση και απλή. Το κρίσιμο φορτίο, αν δεν είναι το μέγιστο, υπολογίζεται από το Σχήμα 3.35. Η δυσθραυστότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$K_{Ic} = \left(2 \sqrt{\frac{D}{2\alpha}} \left(\frac{F_v}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{1 - \mu \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{1 + \mu \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \times \left(\frac{\alpha}{0.355715(D - \alpha)^{3/2}} + \frac{1}{0.966528(D - \alpha)^{1/2}} \right) \right) \frac{1}{T}$$

όπου :

K_{Ic} : η κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσης (MPa*m^{1/2})

F_v : το κατακόρυφο εφαρμοζόμενο φορτίο (MN)

α : η γωνία σφήνας (11°)

μ : ο συντελεστής τριβής

a : το μήκος εγκοπής (m)

D : η διάμετρος του δοκιμίου (m)

T : το πάχος του δοκιμίου (m)

3.3.2 Αποτελέσματα Εργαστηριακών δοκιμών

Οι εργαστηριακές δοκιμές αποτελούνταν από δοκιμές αποξεστικότητας κατά Cerchar και δοκιμές δυσθραυστότητας τύπου σφήνας σε δοκίμιο με εγκοπή (END). Εξετάστηκαν είκοσι δοκίμια σχήματος δίσκου τεσσάρων διαφορετικών πετρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν δοκίμια ασβεστόλιθου από τα λατομεία της ΒΟΥΛΑΣ ΑΒΕΕ της περιοχής Τρικάλων, ασβεστόλιθος από το λατομείο Καγιάννη της περιοχής Τριπόλεως, ασβεστόλιθος από το λατομείο Καμαρίου της ΤΙΤΑΝ Α.Ε. και λατερίτης από το μεταλλείο της ΛΑΡΚΟ Α.Ε. στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη Βοιωτίας.

Γεωλογικά χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων

Σύμφωνα με τον Κουτρούμάνο (2012) το λατομείο ΒΟΥΛΑΣ από όπου προέρχεται ο ασβεστόλιθος Τρικάλων βρίσκεται σε υψόμετρο 100m από το επίπεδο της θάλασσας. Στη συγκεκριμένη περιοχή τα κοιτάσματα αποτελούνται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, μεσόκοκκους ή σιφρούς, χρώματος λευκού και επαναπαύονται κανονικά επί κρυσταλλικών σχιστόλιθων. Στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζεται φωτογραφία των δοκιμίων πριν την εκτέλεση των δοκιμών.



Σχήμα 3.36: Φωτογραφία δοκιμίων ασβεστόλιθου Τρικάλων

Σύμφωνα με τον Βασιλόπουλο (2011) στην περιοχή της Τρίπολης, όπου βρίσκεται το λατομείο Καγιάννη, κατά πλειονότητα υπάρχουν νηριτικοί ασβεστόλιθοι που είναι τεφροί έως σκουρότεφροι, μαύροι βιτουμενιούχοι, συχνά δολομιτιωμένοι και συνήθως παχυστρωματώδεις, Κατά θέσεις σε οριζόντες που έχει προσδιοριστεί το Λουτήσιο παρατηρούνται περιορισμένες συγκεντρώσεις λατεριτικού υλικού. Στο Σχήμα 3.37 παρουσιάζεται φωτογραφία των δοκιμίων πριν την εκτέλεση των δοκιμών.



Σχήμα 3.37: Φωτογραφία δοκιμίων ασβεστόλιθου Τρίπολης

Τα δοκίμια λατερίτη που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές προέρχονται από το μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη της ΛΑΡΚΟ Α.Ε.. Σύμφωνα με τον Πατσίδα (2009) τα κοιτάσματα λατερίτη που αναπτύσσονται πάνω σε ιουρασικούς ασβεστόλιθους, έχουν μορφή στρώματος με ακανόνιστο δάπεδο καθώς πληρούν καρστικές κοιλότητες ενώ η οροφή τους είναι επίπεδη. Ο λατερίτης συνίσταται κυρίως από σίδηρο, πυρίτιο, αργίλιο, χρώμιο, μαγνήσιο και νικέλιο. Σε μικροποσότητες απαντώνται μαγγάνιο, ασβέστιο, θείο, κοβάλτιο, αρσενικό κ.α. Στο Σχήμα 3.38 παρουσιάζεται φωτογραφία των δοκιμίων πριν την εκτέλεση των δοκιμών.



Σχήμα 3.38: Φωτογραφία δοκιμίων λατερίτη Βοιωτίας

Σύμφωνα με το Αναγνώστου (2006) τα δοκίμια ασβεστόλιθου της εταιρείας TITAN A.E. προέρχονται από τον ορεινό όγκο "Λέμφι" της περιοχής Ελευσίνας και χαρακτηρίζονται ως λευκότεφροι, ζαχαρώδους υφής του Τριαδικού. Στο Σχήμα 3.39 παρουσιάζεται φωτογραφία των δοκιμίων πριν την εκτέλεση των δοκιμών.



Σχήμα 3.39: Φωτογραφία δοκιμίων ασβεστόλιθου Τίταν Α.Ε.

Στον Πίνακα 3.12 παρουσιάζονται ορισμένοι δείκτες για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων όπως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS), το μέτρο ελαστικότητας κ.α. Τα λεπτομερή χαρακτηριστικά των δοκιμίων παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

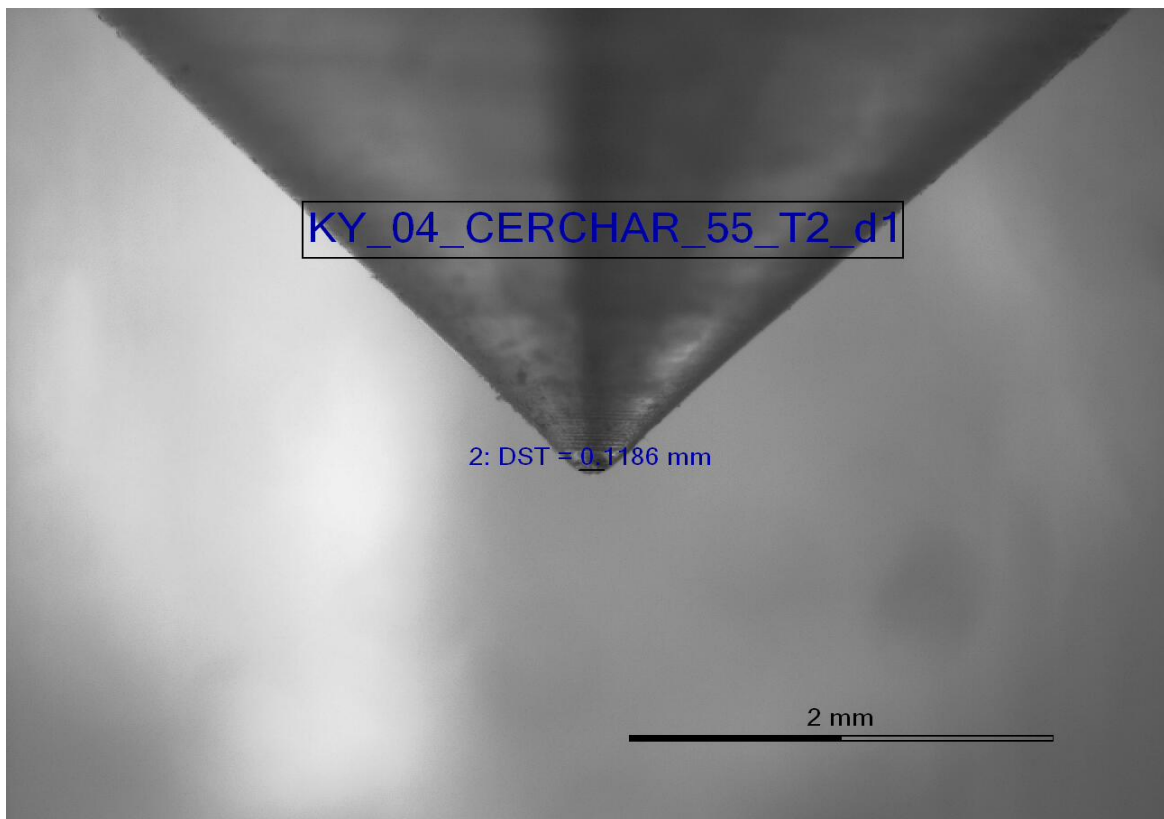
Πίνακας 3.12: Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων

	UCS	Μέτρο ελαστικότητας(Young)	Αντοχή σε εφελκυσμό	Σκληρότητα Shore
Ασβεστόλιθος Τρικάλων - Κ	117.4MPa	74.7GPa	7.8 MPa	45.1
Ασβεστόλιθος Τρίπολης - Τ	115.5MPa	85.7GPa	9.5Mpa	45.5
Λατερίτης ΛΑΡΚΟ - ΛΛ	45.6MPa	62.9GPa	16 MPa	68.4
Ασβεστόλιθος ΤΙΤΑΝ - ΚΥ	84.9MPa	59.9GPa	15.5MPa	38.0

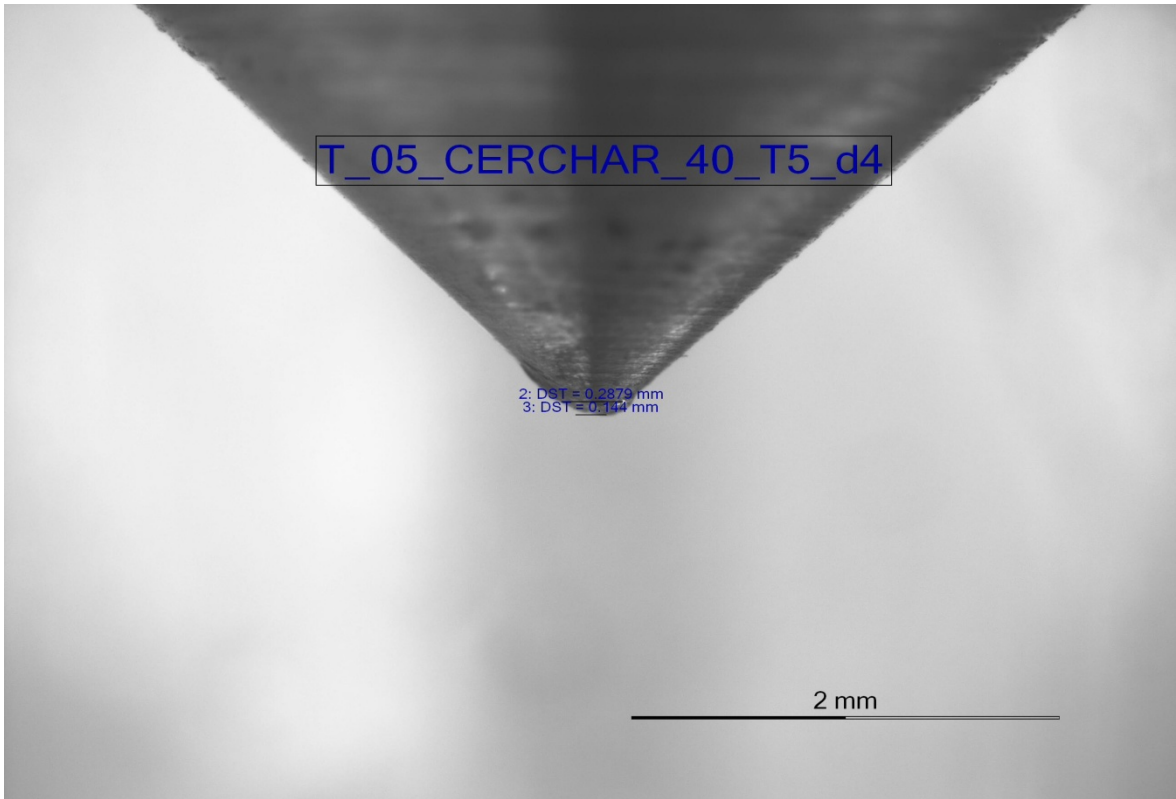
Αποτελέσματα δοκιμής Cerchar

Η δοκιμή Cerchar εκτελέστηκε στα δοκίμια τύπου δίσκου επί της επιφάνειας θραύσηστους με τη δοκιμή δυσθραυστότητας. Εκτελέστηκαν δοκιμές τόσο με ακίδες HRC 55 όσο και με ακίδες HRC 40.

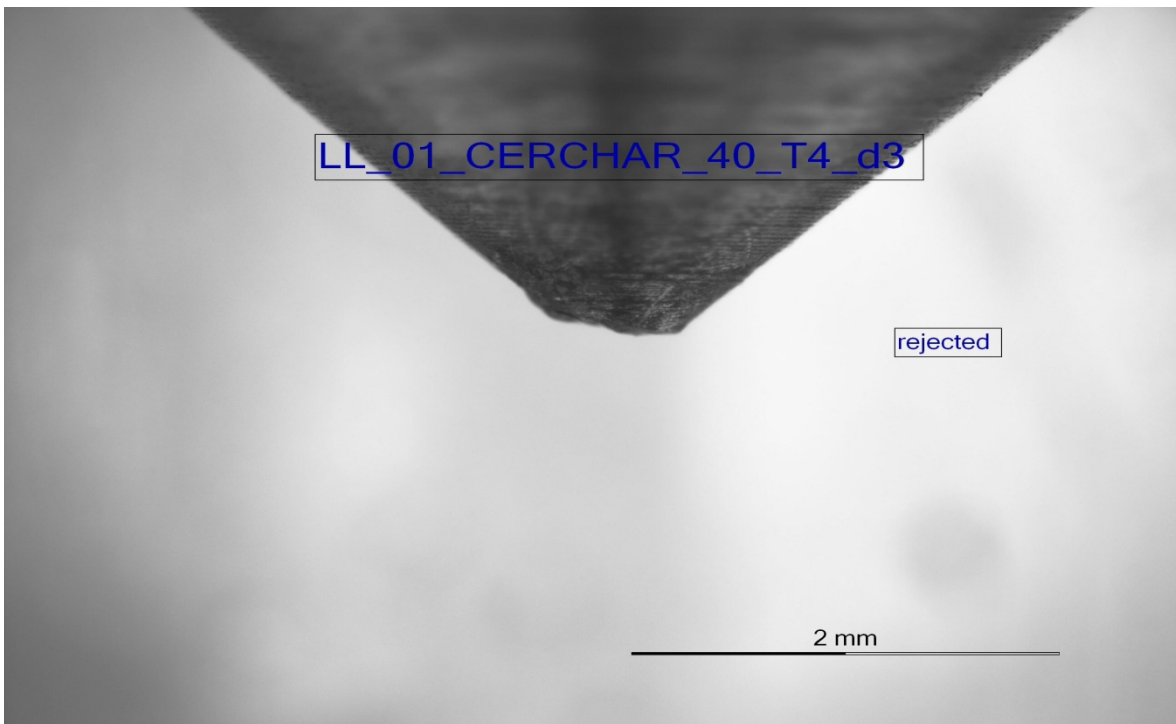
Το μήκος της φθοράς μετρήθηκε από πλάγια όψη με τη χρήση μικροσκοπίου. Αποδεκτές μετρήσεις θεωρήθηκαν όσες ικανοποιούσαν τα κριτήρια του προτύπου της ISRM (ISRM 2013), χαρακτηριστικές περιπτώσεις των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 3.40, Σχήμα 3.41, και Σχήμα 3.42.



Σχήμα 3.40: Αποδεκτή όψη φθοράς



Σχήμα 3.41: Αποδεκτή όψη φθοράς



Σχήμα 3.42: Μη αποδεκτή όψη φθοράς

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 3.13. Αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών Cerchar παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα δοκιμών Cerchar

	CAI40	s.d.	CAI55	s.d.
T_01	1.79	0.06	0.77	0.02
T_02	1.69	0.02	1.02	0.02
T_03	1.63	0.04	1.01	0.04
T_04	1.74	0.04	1.20	0.07
T_05	1.78	0.02	0.98	0.03
ΛΛ_01	4.04	0.11	1.48	0.07
ΛΛ_02	3.27	0.15	1.66	0.11
ΛΛ_03	2.70	0.11	1.20	0.03
ΛΛ_04	2.97	0.16	1.90	0.04
ΛΛ_05	2.68	0.08	1.67	0.06
K_01	2.00	0.01	0.89	0.02
K_02	1.80	0.02	1.00	0.02
K_03	1.57	0.02	1.01	0.05
K_04	1.93	0.02	1.01	0.01
K_05	1.85	0.02	1.10	0.04
KY_01	2.02	0.05	1.10	0.02
KY_02	2.10	0.03	0.78	0.02
KY_03	1.48	0.04	1.20	0.02
KY_04	2.44	0.02	1.35	0.01
KY_05	1.78	0.03	1.13	0.05

Σύμφωνα με το πρότυπο της ISRM (ISRM 2013), συνιστάται η αποκλειστική χρήση ακίδας HRC 55. Σε διαφορετική περίπτωση πρέπει να γίνεται συσχέτιση της σκληρότητας ακίδας που χρησιμοποιήθηκε με την HRC 55. Οι δύο σχέσεις συσχέτισης που προτείνει η ISRM είναι:

- $CAI_{55} = 0.110914 + 0.587356CAI_{40}$ (Michalakopoulos et al. 2006)

και

- $CAI' = 0.415CAI_{(x)} / (1-0.0107x)$ (Jacobs and Hagan, 2009)

όπου

CAI' : η ισοδύναμη τιμή CAI για HRC 55

x : η τιμή της σκληρότητας

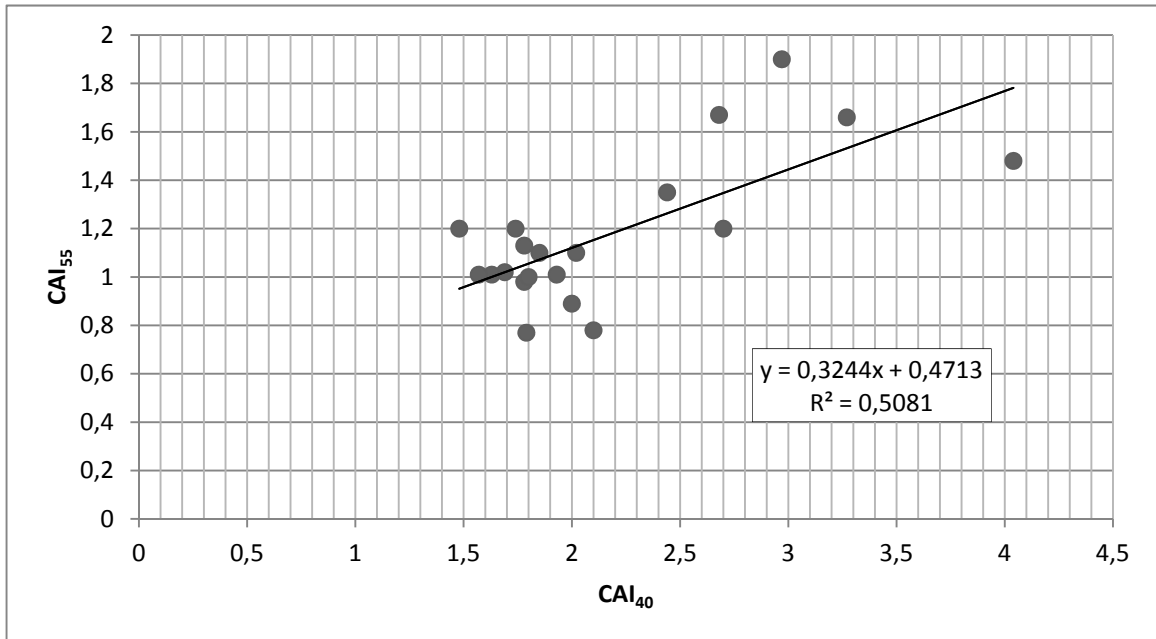
CAI_(x) : ο υπολογισμένος δείκτης CAI για σκληρότητα x

Οι συσχετίσεις των παραπάνω σχέσεων για τις δοκιμές φαίνονται στον Πίνακα 3.14, όπου CAI_M η ισοδύναμη τιμή CAI για HRC 55 για την σχέση των Michalakopoulos et al. και CAI' η ισοδύναμη τιμή CAI για HRC 55 για την σχέση των Jacobs και Hagan.

Πίνακας 3.14: Αποτελέσματα δοκιμών Cerchar και συσχετίσεις των CAI40 και CAI55

	CAI40	s.d.	CAI55	s.d.	CAI'	CAIM
T_01	1.79	0.06	0.77	0.02	1.30	1.16
T_02	1.69	0.02	1.02	0.02	1.23	1.10
T_03	1.63	0.04	1.01	0.04	1.18	1.07
T_04	1.74	0.04	1.20	0.07	1.26	1.13
T_05	1.78	0.02	0.98	0.03	1.29	1.16
ΛΛ_01	4.04	0.11	1.48	0.07	2.93	2.48
ΛΛ_02	3.27	0.15	1.66	0.11	2.37	2.03
ΛΛ_03	2.70	0.11	1.20	0.03	1.96	1.70
ΛΛ_04	2.97	0.16	1.90	0.04	2.16	1.86
ΛΛ_05	2.68	0.08	1.67	0.06	1.95	1.69
K_01	2.00	0.01	0.89	0.02	1.45	1.28
K_02	1.80	0.02	1.00	0.02	1.31	1.17
K_03	1.57	0.02	1.01	0.05	1.14	1.03
K_04	1.93	0.02	1.01	0.01	1.40	1.24
K_05	1.85	0.02	1.10	0.04	1.35	1.20
KY_01	2.02	0.05	1.10	0.02	1.46	1.29
KY_02	2.10	0.03	0.78	0.02	1.50	1.33
KY_03	1.48	0.04	1.20	0.02	1.07	0.98
KY_04	2.44	0.02	1.35	0.01	1.77	1.55
KY_05	1.78	0.03	1.13	0.05	1.29	1.16

Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης δίνει το ακόλουθο διάγραμμα, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.43.



Σχήμα 3.43: Συσχέτιση των CAI40 και CAI55

Από τα αποτελέσματα των συσχετίσεων και από το διάγραμμα του Σχήματος 3.43, παρατηρούμε ότι η σχέση που προτείνουν οι Michalakopoulos et al. ανταποκρίνεται καλύτερα στην περίπτωση ακίδας HRC 40 έναντι της σχέσης των Jacobs και Hagan.

Αποτελέσματα δοκιμών δυσθραυστότητας

Τα δοκίμια, αφού δημιουργήθηκε μια εγκοπή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.44, τοποθετήθηκαν στη συσκευή και καταγράφηκαν μετρήσεις μετατόπισης και φορτίου έως τη δημιουργία ρωγμής και τη θραύση του δοκιμίου. Η διάταξη της συσκευής φαίνεται στο Σχήμα 3.45.



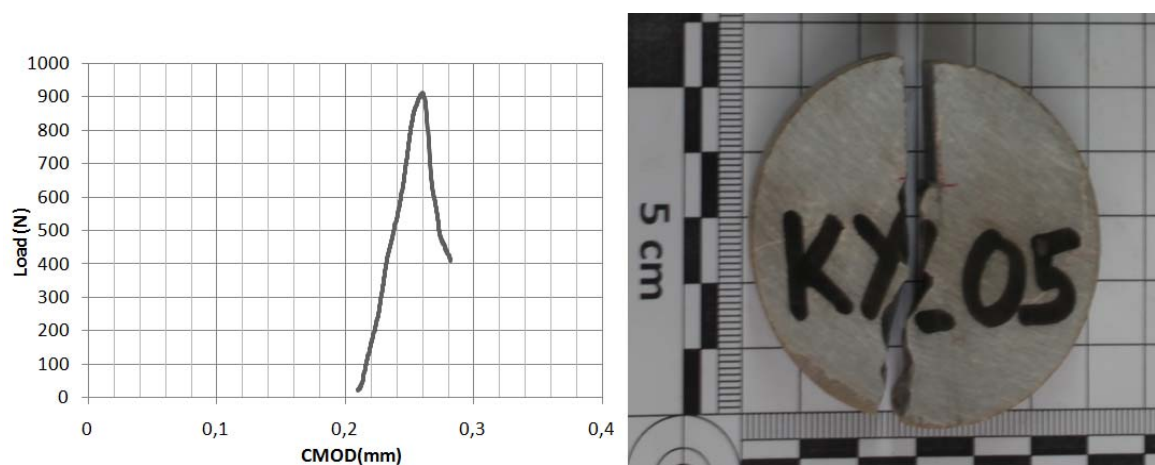
Σχήμα 3.44: Δημιουργία εγκοπής.



Σχήμα 3.45: Διάταξη συσκευής

Όπως περιγράφουν οι Donovan και Karfakis (2004) από τη μετατόπιση του άξονα της συσκευής και τη γωνία της σφήνας υπολογίζεται το άνοιγμα της ρωγμής (CMOD) και από τις μετρήσεις φορτίου, με τη βοήθεια του διαγράμματος του Σχήματος 3.35, επαληθεύεται αν το μέγιστο φορτίο είναι το κρίσιμο φορτίο από το οποίο προκύπτει η διάδοση της ρωγμής.

Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής και στο Παράρτημα Β τα διαγράμματα κάθετου φορτίου-ανοίγματος ρωγμής και φωτογραφίες από τα δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής, παράδειγμα των οποίων φαίνεται και στο Σχήμα 3.46.



Σχήμα 3.46: Διάγραμμα κάθετου φορτίου-ανοίγματος ρωγμής και φωτογραφία μετά το πέρας της δοκιμής του δοκιμίου KY_05

Έπειτα από επεξεργασία των διαγραμμάτων κάθετου φορτίου- ανοίγματος ρωγμής, με τη μέθοδο προσέγγισης του 5% της εφαπτομένης(Whittaker 1992) επαληθεύεται ότι το μέγιστο φορτίο είναι και το κρίσιμο κατά τη διάρκεια των δοκιμών σφήνας σε δίσκο με εγκοπή για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

Στον Πίνακα 3.15 η στήλη "έλεγχος διαστάσεων" αφορά τον έλεγχο των ελάχιστων απαιτήσεων για τη χαραγή, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\left. \begin{matrix} a \\ D - a \end{matrix} \right\} \geq 2.5 \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_t} \right)^2, \quad t \geq \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_t} \right)^2$$

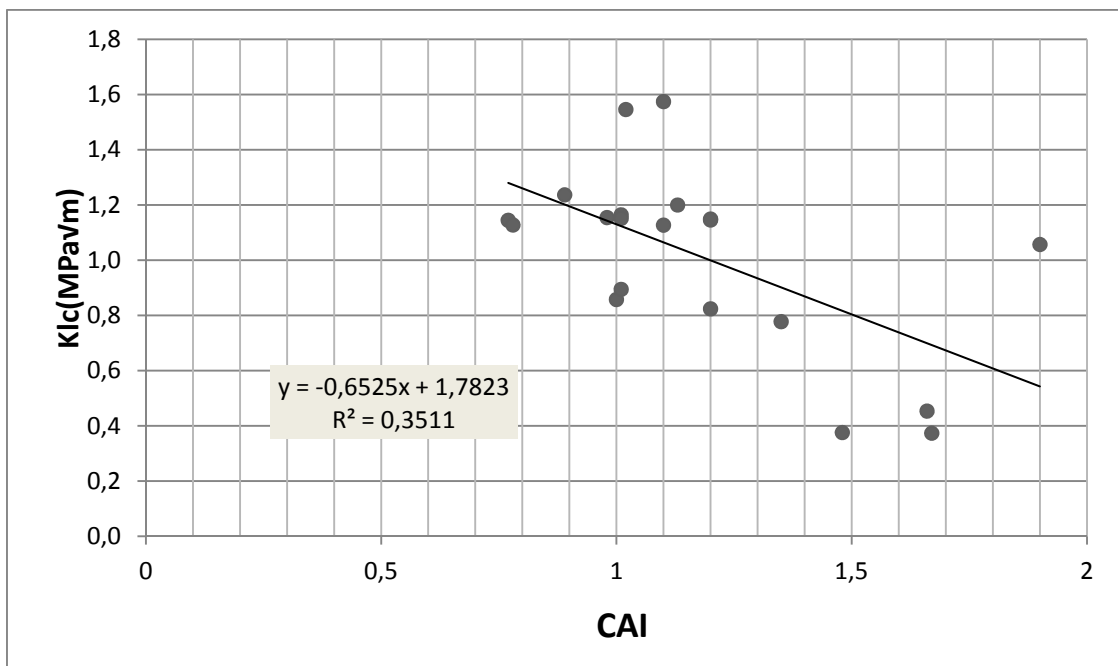
Πίνακας 3.15: Αποτελέσματα δοκιμής δυσθραυστότητας

Δοκίμιο	Maximum Load	K_{Ic}(MPa√m)	έλεγχος διαστάσεων
K_01	990	1.2	ok
K_02	754	0.9	ok
K_03	903	1.2	ok
K_04	719	0.9	ok
K_05	1189	1.6	ok
ΛΛ_01	267	0.4	ok
ΛΛ_02	322	0.5	ok
ΛΛ_03	606	0.8	ok
ΛΛ_04	777	1.1	ok
ΛΛ_05	269	0.4	ok
T_01	596	1.1	ok
T_02	952	1.5	ok
T_03	835	1.2	ok
T_04	696	1.1	ok
T_05	744	1.2	ok
KY_01	904	1.1	ok
KY_02	781	1.1	ok
KY_03	886	1.1	ok
KY_04	630	0.8	ok
KY_05	911	1.2	ok

Στον Πίνακα 3.16 παρουσιάζονται οι τιμές δυσθραυστότητας K_{Ic} και αποξεστικότητας CAI για κάθε δοκίμιο, ενώ στο Σχήμα 3.47 φαίνεται η συσχέτιση που αυτά τα δύο μεγέθη έχουν για τις δοκιμές που εκτελέστηκαν.

Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα δοκιμής Cerchar και δοκιμής δυσθραυστότητας

Δοκίμιο	CAI	K _{Ιc} (MPa√m)
K_01	0.89	1.2
K_02	1.00	0.9
K_03	1.01	1.2
K_04	1.01	0.9
K_05	1.10	1.6
ΛΛ_01	1.48	0.4
ΛΛ_02	1.66	0.5
ΛΛ_03	1.20	0.8
ΛΛ_04	1.90	1.1
ΛΛ_05	1.67	0.4
T_01	0.77	1.1
T_02	1.02	1.5
T_03	1.01	1.2
T_04	1.20	1.1
T_05	0.98	1.2
KY_01	1.10	1.1
KY_02	0.78	1.1
KY_03	1.20	1.1
KY_04	1.35	0.8
KY_05	1.13	1.2



Σχήμα 3.47: Συσχέτιση δυσθραυστότητας K_{Ic} και δείκτη CAI

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό του δείκτη αποξεστικότητας CAI για τα δοκίμια ασβεστόλιθου Τρίπολης Τ, λατερίτη Λάρκο ΛΛ, ασβεστόλιθου Τρικάλων Κ, ασβεστόλιθου ΤΙΤΑΝ ΚΥ και την κατάταξη της αποξεστικότητας σύμφωνα με την ISRM, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.8, η πλειοψηφία των δοκιμών χαρακτηρίζονται ως λίγο αποξεστικά. Αναλυτικά ο χαρακτηρισμός κάθε δοκιμίου με βάση την αποξεστικότητα κατά Cerchar φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Κατάταξη δοκιμών με βάση την αποξεστικότητα

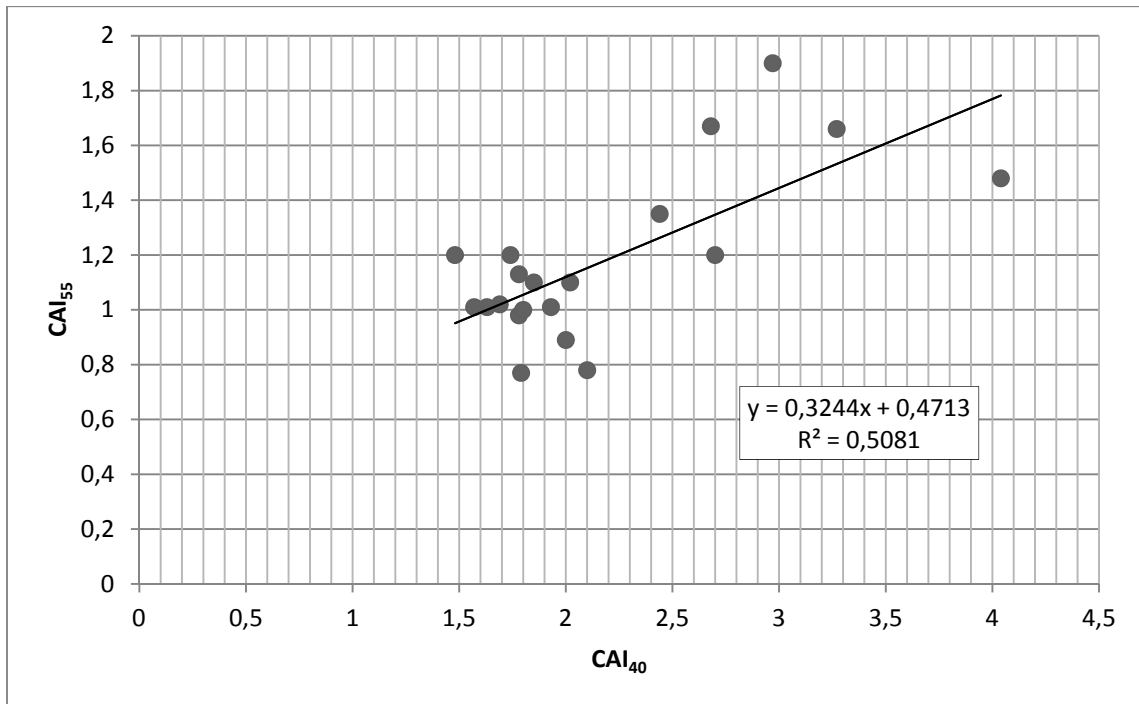
Δοκίμιο	CAI_{55}	Κατάταξη
T_01	0.77	Πολύ λίγο αποξεστικό
T_02	1.02	Λίγο αποξεστικό
T_03	1.01	Λίγο αποξεστικό
T_04	1.20	Λίγο αποξεστικό
T_05	0.98	Λίγο αποξεστικό
ΛΛ_01	1.48	Λίγο αποξεστικό
ΛΛ_02	1.66	Λίγο αποξεστικό
ΛΛ_03	1.20	Λίγο αποξεστικό
ΛΛ_04	1.90	Λίγο αποξεστικό
ΛΛ_05	1.67	Λίγο αποξεστικό
Κ_01	0.89	Πολύ λίγο αποξεστικό
Κ_02	1.00	Λίγο αποξεστικό
Κ_03	1.01	Λίγο αποξεστικό
Κ_04	1.01	Λίγο αποξεστικό
Κ_05	1.10	Λίγο αποξεστικό
ΚΥ_01	1.10	Λίγο αποξεστικό
ΚΥ_02	0.78	Πολύ λίγο αποξεστικό
ΚΥ_03	1.20	Λίγο αποξεστικό
ΚΥ_04	1.35	Λίγο αποξεστικό
ΚΥ_05	1.13	Λίγο αποξεστικό

Οι τιμές του δείκτη CAI των δοκιμών κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, παρόλα αυτά η συσχέτιση ανάμεσα στα αποτελέσματα, τα οποία φαίνονται στους πίνακες 3.13 και 3.14 των δοκιμών για ακίδες HRC40 και HRC55 παρουσιάζει μέτρια ακρίβεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών Cerchar και οι συσχετίσεις των αποτελεσμάτων με βάση τις σχέσεις των Jacobs και Hagan και του Michalakopoulos et al.. Από τα αποτελέσματα των συσχετίσεων παρατηρούμε ότι η σχέση που προτείνουν οι Michalakopoulos et al. (CAI_M) ανταποκρίνεται καλύτερα στην περίπτωση ακίδας HRC 40 έναντι της σχέσης των Jacobs και Hagan (CAI').

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα δοκιμών Cerchar και συσχετίσεις των CAI40 και CAI55

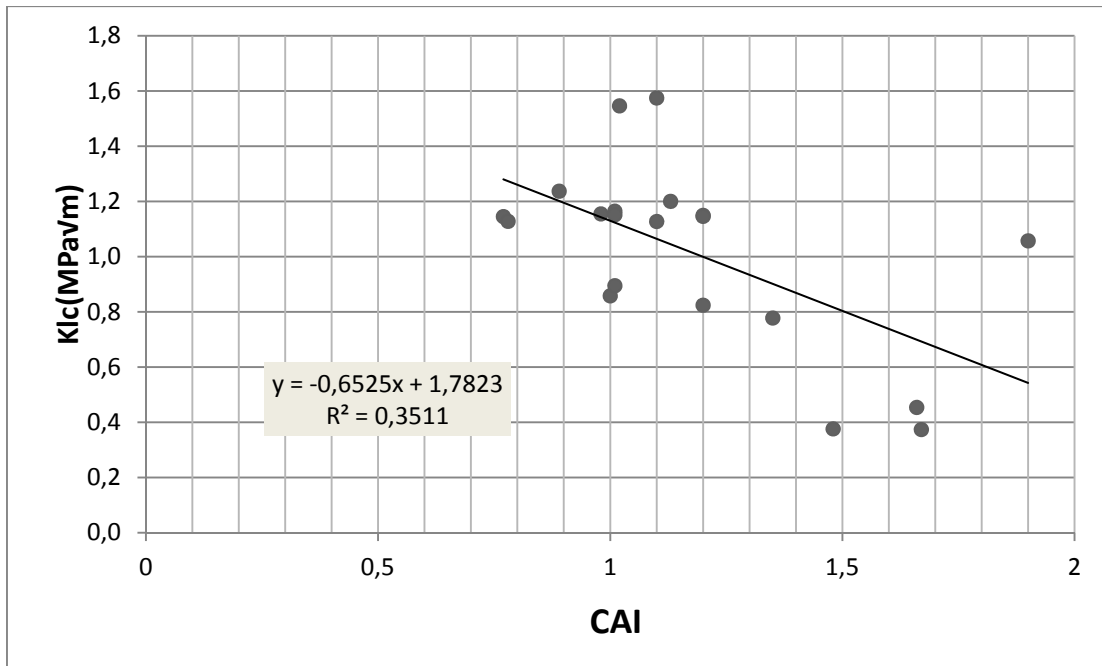
	CAI40	s.d.	CAI55	s.d.	CAI'	CAI_M
T_01	1.79	0.06	0.77	0.02	1.30	1.16
T_02	1.69	0.02	1.02	0.02	1.23	1.10
T_03	1.63	0.04	1.01	0.04	1.18	1.07
T_04	1.74	0.04	1.20	0.07	1.26	1.13
T_05	1.78	0.02	0.98	0.03	1.29	1.16
ΛΛ_01	4.04	0.11	1.48	0.07	2.93	2.48
ΛΛ_02	3.27	0.15	1.66	0.11	2.37	2.03
ΛΛ_03	2.70	0.11	1.20	0.03	1.96	1.70
ΛΛ_04	2.97	0.16	1.90	0.04	2.16	1.86
ΛΛ_05	2.68	0.08	1.67	0.06	1.95	1.69
K_01	2.00	0.01	0.89	0.02	1.45	1.28
K_02	1.80	0.02	1.00	0.02	1.31	1.17
K_03	1.57	0.02	1.01	0.05	1.14	1.03
K_04	1.93	0.02	1.01	0.01	1.40	1.24
K_05	1.85	0.02	1.10	0.04	1.35	1.20
KY_01	2.02	0.05	1.10	0.02	1.46	1.29
KY_02	2.10	0.03	0.78	0.02	1.50	1.33
KY_03	1.48	0.04	1.20	0.02	1.07	0.98
KY_04	2.44	0.02	1.35	0.01	1.77	1.55
KY_05	1.78	0.03	1.13	0.05	1.29	1.16



Σχήμα 4.1: Συσχέτιση των CAI₄₀ και CAI₅₅

Από τις δοκιμές δυσθραυστότητας, ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι η λειτουργικότητα της δοκιμής σφήνας σε δίσκο με εγκοπή (edge notched disc test, END test), που προτείνουν οι Donovan και Karfakis (2004), έναντι των δοκιμών Chevron (ράβδου και δίσκου), οι οποίες προτείνονται από την ISRM. Η δοκιμή σφήνας σε δίσκο με εγκοπή εμφανίζει μεγαλύτερη ευκολία τόσο στην προετοιμασία των δοκιμών, όσο και στην εξαγωγή άμεσων, μετρήσιμων αποτελεσμάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα της συσχέτισης του δείκτη αποξεστικότητας CAI και της δυσθραυστότητας για τα συγκεκριμένα δοκίμια, όπως αυτά παρατίθενται στον Πίνακα 3.11, δεν προκύπτει αναλογία των αποτελεσμάτων, όπως παρατηρείται βιβλιογραφικά. Αντίθετα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, παρατηρείται η τάση μείωσης της δυσθραυστότητας K_{Ic} με αύξηση του δείκτη CAI.



Σχήμα 4,2: Συσχέτιση δυσθραυστότητας K_{1c} και δείκτη CAI

Ενδεχομένως να μην διαπιστώνονται σημαντικές συσχετίσεις λόγω του μικρού πλήθους δοκιμών και του γεγονότος ότι χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη πετρωμάτων εκ των οποίων τα τρία ήταν ασβεστόλιθοι. Επίσης, σημαντικό ρόλο έπαιξε και ότι ο λατερίτης ήταν ιδιαίτερα χονδρόκοκκος και δεν συμπεριφερόταν ικανοποιητικά ειδικά στη δοκιμή δυσθραυστότητας.

Βιβλιογραφία

- AlAmeen SI, Waller MD (1994). *The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index*. Eng Geol 36:293-301
- Alber M (2008). *Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools*. Tunn Undergr Sp Tech 23:351-359
- Alber M, Yarali O, Dahl F, Bruland A, Kaesling H, Michalakopoulos TN, Cardu M, Hagan P, Aydin H, Ozarslan A (2014). *ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test*. Rock Mech Rock Eng 47:261-266
- Atkinson T, Cassapi VB, Singh RN (1986). *Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery*. Int J Min Geol Eng 3: 151-163
- Bhushan B (2013). *Principles and applications to tribology, 2nd ed*. Wiley, Chichester, 980p.
- Bilgin N, Copur H, Balci C (2014). *Mechanical excavation in mining and civil industries*. CRC Press, Boca Raton, 366p.
- CERCHAR (1986). *The Cerchar abrasiveness index*. 12p
- Clark GB (1987). *Principles of rock fragmentation*. Wiley, New York, 610p.
- Deketh HJR (1995). *Wear of rock cutting tools*. Balkema, Rotterdam, 144p.
- Deketh HJR, Alvarez Grima M, Hergarden IM, Giezen M, Verhoef PNW (1998). *Towards the prediction of rock excavation machine performance*. Bull Eng Geol Environ 57:3-15
- Eberl S, Restner U, Galler R, Mali H (2008). *The influence of the parameter temperature on the abrasiveness of rock*. Geomechanik und Tunnelbau 1:77-83
- Frenzel C (2009). *Kostenprognose fuer Schneidrollen bei maschinellen Tunnelvortrieben in Festgesteinen*. Dissertation, TU Muenchen, 116p
- ISRM (1978). *Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 15:89-97
- Jacobs N, Hagan P (2009). *The effect of stylus hardness and some test parameters on Cerchar abrasivity index*. Proc 43rd US and 4th US-Canada Rock Mechanics Symp, ARMA, Alexandria, VA, 538-545
- Jakobsen PD, Langmaack L, Dahl F, Breivik T (2012). *Predicting the abrasivity of in-situ soils*. Tunnels and Tunnelling Int, June, 41-44
- Lassnig K, Latal C, Klima K (2008). *Impact of grain size on the Cerchar abrasiveness test*. Geomechanik und Tunnelbau 1:71-76

- Lislerud A (1997). *Principles of mechanical excavation*. POSIVA 97-12. Posiva, Helsinki, 186p + Appendices
- Michalakopoulos TN, Anagnostou VG, Bassanou ME, Panagiotou GN (2006). *The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value*. Int J Rock Mech Min Sci 43:321-327
- Nilsen B, Dahl F, Holzhauser J, Raleigh P (2006). *Abrasivity testing for rock and soils*. Tunnels and Tunnelling Int, June, 47-49
- Plinninger R, Kaesling H, Thuro K (2004). *Wear prediction in hardrock excavation using the CERCHAR abrasiveness index (CAI)*. Proc EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium (ed. W Schubert), VGE, Essen, 599-604
- Plinninger R, Kaesling H, Thuro K, Spaun G (2003). *Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value*. Int J Rock Mech Min Sci 40:259-263
- Plinninger R, Restner U (2008). *Abrasiveness testing, Quo vadis? - A commented overview of abrasiveness testing*. Geomechanik und Tunnelbau 1:61-70
- Rostami J, Ozdemir L, Bruland A, Dahl F (2005). *Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates*. Proc RETC (eds JD Hutton and WD Rogstad), SME, Littleton, 738-751
- Singh SP (1989). *A simple criterion for the machinability of hard rocks*. Int J Min Geol Eng 7:257-266
- Stanford J, Hagan P (2009). *An assessment of the impact of stylus metallurgy on Cerchar abrasiveness index*. Proc Coal Operators' Conf (ed N Aziz), AusIMM, Carlton, Vic, 348-355
- Suana M, Peters T (1982). *The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography*. Rock Mechanics 15:1-7
- Verhoef PNW (1997). *Wear of rock cutting tools*. Balkema, Rotterdam, 327p
- West G (1986). *A relation between abrasiveness and quartz content for some Coal Measures sediments*. Int J Min Geol Eng 4:73-78
- West G (1989). *Rock abrasiveness testing for tunneling*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 26:151-160
- Whittaker BN, Singh RN, Sun G (1992). *Rock fracture mechanics: Principles, design and applications*. Elsevier, Amsterdam, 570p
- Yarali O, Yasar E, Bacak G, Ranjith PG (2008). *A study of rock abrasivity and tool wear in Coal Measures rocks*. Int J Coal Geol 74:53-66
- Zum Gahr KH (1987). *Microstructure and wear of materials*. Elsevier, Amsterdam, 560p

- Αναγνώστου Β (2006). *Προσδιορισμός του δείκτη ειδικής ενέργειας εκσκαφής ιζηματογενών πετρωμάτων*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων, ΕΜ Πολυτεχνείο, Αθήνα, 169σ.
- Βασιλόπουλος Ν (2011). *Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστολίθου περιοχής Τριπόλεως με μηχανικά μέσα*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜ Πολυτεχνείο, 220σ.
- Κουτρομάνος Δ (2012). *Εργαστηριακή διερεύνηση της εξόρυξης ασβεστολίθου περιοχής Τρικάλων με μηχανικά μέσα*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜ Πολυτεχνείο, 196σ.
- Μιχαλακόπουλος Θ (2013). *Μηχανική Όρυξη Σηράγγων, Σημειώσεις και Παρουσιάσεις από τις διαλέξεις*. ΔΠΜΣ Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων, ΕΜ Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Πατσίδης Γ (2009). *Εργαστηριακός προσδιορισμός της ειδικής ενέργειας κοπής λατερίτη και ασβεστόλιθου από το μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη της ΛΑΡΚΟ ΑΕ*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜ Πολυτεχνείο, 178σ.
- Φαφούτης Β (2008). *Εκτίμηση διάρκειας ζωής υψηλώς φορτισμένων στοιχείων κύλισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜ Πολυτεχνείο, Αθήνα, 123σ.

• .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α
ΔΟΚΙΜΗ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ CERCHAR

Ασβεστόλιθος Τρίπολης

T_01					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	1	3	5	10	21
d1(0°)	0.102	0.102	0.132	0.178	0.237
d2(90°)	rej	rej	rej	0.152	0.237
d3(180°)	0.093	0.119	0.165	0.191	0.254
d4(270°)	rej	rej	rej	0.136	0.246
dm	0.097	0.110	0.148	0.164	0.243
Mean pin wear(mm)					0.178
CAI					1.78
Standard deviation of CAI					0.06
CAI'					1.30
CAI_M					1.16

T_01					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	2	12	23	24	96
d1(0°)	0.076	0.068	0.110	0.093	0.119
d2(90°)	0.059	0.059	0.059	0.076	0.102
d3(180°)	0.051	0.051	0.093	0.076	0.127
d4(270°)	0.059	0.051	0.119	0.042	0.093
dm	0.061	0.057	0.095	0.072	0.110
Mean pin wear(mm)					0.079
CAI					0.79
Standard deviation of CAI					0.02

T_02					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	2	8	12	14	18
d1(0°)	0.178	0.152	0.152	0.186	0.136
d2(90°)	0.212	0.152	0.127	0.152	rej
d3(180°)	0.212	0.169	0.161	0.152	0.161
d4(270°)	0.225	0.169	0.187	0.152	0.136
dm	0.206	0.170	0.157	0.168	0.144
Mean pin wear(mm)					0.169
CAI					1.69
Standard deviation of CAI					0.02
CAI'					1.23
CAI_M					1.10

T_02					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	26	30	32	68	94
d1(0°)	0.076	0.127	0.068	0.144	0.110
d2(90°)	0.127	0.093	0.076	0.051	0.144
d3(180°)	0.085	0.110	0.102	0.068	0.169
d4(270°)	0.085	0.085	0.110	0.102	0.110
dm	0.093	0.104	0.089	0.091	0.133
Mean pin wear(mm)					0.102
CAI					1.02
Standard deviation of CAI					0.02

T_03

HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	2	3	8	9	10
d1(0°)	0.102	0.195	0.152	0.161	0.161
d2(90°)	0.119	0.203	0.250	rej	0.144
d3(180°)	0.068	0.195	0.195	0.186	0.178
d4(270°)	0.085	0.161	rej	rej	0.152
dm	0.093	0.188	0.199	0.174	0.161
Mean pin wear(mm)					0.163
CAI					1.63
Standard deviation of CAI					0.04
CAI'					1.18
CAI_M					1.07

T_03

HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	29	44	61	78	86
d1(0°)	0.110	0.173	0.068	0.093	0.068
d2(90o)	0.110	0.169	0.068	0.051	0.051
d3(180°)	0.136	0.136	0.068	0.119	0.076
d4(270°)	0.127	0.144	0.068	0.076	0.076
dm	0.121	0.155	0.068	0.085	0.068
Mean pin wear(mm)					0.099
CAI					1.00
Standard deviation of CAI					0.04

T_04					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	6	7	9	11	15
d1(0°)	0.212	0.186	0.127	0.195	0.169
d2(90°)	0.203	0.203	0.110	0.195	0.152
d3(180°)	0.220	0.195	0.085	0.195	0.178
d4(270°)	0.203	0.195	0.110	rej	0.152
dm	0.210	0.195	0.108	0.195	0.163
Mean pin wear(mm)					0.174
CAI					1.74
Standard deviation of CAI					0.041
CAI'					1.26
CAI_M					1.13

T_04					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	28	33	35	70	88
d1(0°)	0.093	0.102	0.127	0.051	0.237
d2(90°)	0.102	0.076	0.110	0.068	0.220
d3(180°)	0.076	0.085	0.127	0.076	rej
d4(270°)	0.085	0.119	0.127	0.059	0.237
dm	0.089	0.095	0.123	0.064	0.23
Mean pin wear(mm)					0.12
CAI					1.20
Standard deviation of CAI					0.07

T_05					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	4	16	17	19	20
d1(0°)	0.127	0.161	0.152	0.212	0.203
d2(90°)	0.144	0.178	0.178	0.186	0.195
d3(180°)	0.169	0.212	0.186	0.212	0.178
d4(270°)	0.152	0.169	0.178	0.152	0.216
dm	0.148	0.180	0.174	0.191	0.198
Mean pin wear(mm)					0.178
CAI					1.78
Standard deviation of CAI					0.02
CAI'					1.29
CAI_M					1.16

T_05					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	16	21	31	62	82
d1(0°)	0.110	0.059	0.093	0.119	0.127
d2(90°)	0.127	0.042	0.102	0.119	rej
d3(180°)	0.102	0.042	0.102	0.076	0.119
d4(270°)	0.119	0.051	0.093	0.127	0.119
dm	0.114	0.049	0.097	0.11	0.121
Mean pin wear(mm)					0.098
CAI					0.98
Standard deviation of CAI					0.03

Λατερίτης ΛΑΡΚΟ

ΛΛ_01					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	5	11	18	19	20
d1(0°)	0.373	0.432	0.339	0.517	rej
d2(90°)	0.330	0.504	0.373	0.613	0.313
d3(180°)	0.322	0.487	0.356	rej	0.212
d4(270°)	0.339	0.488	0.381	0.542	0.322
dm	0.341	0.478	0.362	0.557	0.282
Mean pin wear(mm)					0.404
CAI					4.04
Standard deviation of CAI					0.11
CAI'					2.93
CAI_M					2.48

ΛΛ_01					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	20	38	39	48	90
d1(0°)	0.254	0.034	0.144	0.110	0.310
d2(90°)	0.169	0.076	0.144	0.110	0.144
d3(180°)	0.270	0.068	0.169	0.136	0.169
d4(270°)	rej	0.051	0.161	0.093	0.119
dm	0.231	0.057	0.155	0.112	0.186
Mean pin wear(mm)					0.148
CAI					1.48
Standard deviation of CAI					0.07

ΛΛ_02					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	9	15	18	20	21
d1(0°)	0.593	0.246	0.212	0.322	0.191
d2(90°)	0.538	0.246	0.220	0.351	0.220
d3(180°)	0.559	0.212	0.229	0.339	0.246
d4(270°)	0.589	0.229	0.237	0.551	0.220
dm	0.569	0.233	0.224	0.391	0.219
Mean pin wear(mm)					0.327
CAI					3.27
Standard deviation of CAI					0.15
CAI'					2.37
CAI_M					2.03

ΛΛ_02					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	25	51	77	84	85
d1(0°)	0.313	0.220	0.068	0.068	0.195
d2(90°)	0.364	0.195	0.068	rej	0.178
d3(180°)	0.313	0.144	0.059	0.059	0.212
d4(270°)	0.296	rej	0.051	rej	0.195
dm	0.322	0.186	0.061	0.064	0.195
Mean pin wear(mm)					0.166
CAI					1.66
Standard deviation of CAI					0.11

ΛΛ_03					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	1	6	15	16	21
d1(0°)	0.305	0.085	0.271	rej	0.161
d2(90°)	rej	0.093	0.356	0.420	0.220
d3(180°)	0.271	0.136	rej	rej	0.258
d4(270°)	rej	0.144	0.326	0.411	0.229
dm	0.288	0.114	0.318	0.415	0.217
Mean pin wear(mm)					0.270
CAI					2.7
Standard deviation of CAI					0.11
CAI'					1.96
CAI_M					1.70

ΛΛ_03						
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5	
Ακίδα No	40	41	65	67	80	
d1(0°)	0.144	0.119	0.152	0.102	0.085	
d2(90°)	0.144	0.127	0.152	0.102	0.102	
d3(180°)	0.110	0.102	0.186	0.093	0.102	
d4(270°)	0.110	0.119	0.161	0.093	0.102	
dm	0.127	0.116	0.163	0.097	0.097	
Mean pin wear(mm)						0.120
CAI						1.20
Standard deviation of CAI						0.03

ΛΛ_04						
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5	
Ακίδα No	4	5	16	17	19	
d1(0°)	0.576	0.385	0.271	0.169	0.152	
d2(90°)	0.500	0.254	0.237	0.144	0.136	
d3(180°)	0.581	0.423	0.330	0.186	0.136	
d4(270°)	0.508	0.390	0.296	0.136	0.136	
dm	0.541	0.363	0.284	0.159	0.140	
Mean pin wear(mm)						0.297
CAI						2.97
Standard deviation of CAI						0.16
CAI'						2.16
CAI_M						1.86

ΛΛ_04						
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5	
Ακίδα No	37	42	56	59	74	
d1(0°)	0.169	0.279	0.127	0.195	0.178	
d2(90°)	0.186	0.229	0.144	0.178	0.152	
d3(180°)	0.144	0.279	0.152	0.186	0.182	
d4(270°)	0.212	0.229	0.127	0.245	0.178	
dm	0.178	0.254	0.138	0.201	0.173	
Mean pin wear(mm)						0.189
CAI						1.9
Standard deviation of CAI						0.04

ΛΛ_05					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	1	6	8	10	12
d1(0°)	0.338	0.237	0.144	0.263	0.305
d2(90°)	0.390	0.212	0.161	0.305	0.263
d3(180°)	0.394	0.217	0.169	0.254	0.347
d4(270°)	0.381	0.186	0.169	0.343	0.288
dm	0.376	0.213	0.161	0.291	0.301
Mean pin wear(mm)					0.268
CAI					2.68
Standard deviation of CAI					0.08
CAI'					1.95
CAI_M					1.69

ΛΛ_05					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	22	45	60	75	79
d1(0°)	0.212	0.110	0.212	0.212	0.110
d2(90°)	0.186	0.186	0.195	0.246	0.068
d3(180°)	0.203	0.102	0.203	0.229	0.068
d4(270°)	0.178	0.132	0.186	0.220	0.093
dm	0.195	0.132	0.199	0.227	0.085
Mean pin wear(mm)					0.167
CAI					1.67
Standard deviation of CAI					0.06

Ασβεστόλιθος Τρικάλων

K_01					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	3	5	10	18	21
d1(0°)	0.152	0.178	0.237	0.178	0.203
d2(90°)	0.237	rej	rej	0.169	0.169
d3(180°)	0.186	0.220	0.203	0.203	0.195
d4(270°)	rej	rej	rej	0.186	0.237
dm	0.192	0.199	0.220	0.184	0.201
Mean pin wear(mm)					0.199
CAI					1.99
Standard deviation of CAI					0.01
CAI'					1.45
CAI_M					1.28

K_01					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	1	3	4	17	91
d1(0°)	0.085	0.102	0.059	0.069	0.110
d2(90°)	0.076	0.127	0.051	0.093	0.085
d3(180°)	0.093	0.110	0.068	0.102	0.093
d4(270°)	0.085	0.127	0.059	0.076	0.110
dm	0.085	0.116	0.059	0.085	0.100
Mean pin wear(mm)					0.089
CAI					0.89
Standard deviation of CAI					0.02

K_02					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	1	7	9	11	14
d1(0°)	0.178	0.229	0.195	0.186	0.195
d2(90°)	rej	rej	rej	rej	0.195
d3(180°)	0.136	0.186	0.170	0.161	0.195
d4(270°)	rej	rej	rej	rej	0.144
dm	0.157	0.207	0.182	0.174	0.182
Mean pin wear(mm)					0.180
CAI					1.80
Standard deviation of CAI					0.018
CAI'					1.31
CAI_M					1.17

K_02					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	6	7	9	92	93
d1(0°)	0.076	0.136	0.093	0.102	0.085
d2(90°)	0.068	0.144	0.102	0.136	0.093
d3(180°)	0.068	0.110	0.102	0.110	0.085
d4(270°)	0.068	0.119	0.093	0.110	0.093
dm	0.070	0.127	0.097	0.114	0.089
Mean pin wear(mm)					0.100
CAI					1.00
Standard deviation of CAI					0.02

K_03					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	2	8	16	19	20
d1(0°)	0.129	0.195	0.152	0.127	0.152
d2(90°)	rej	rej	rej	rej	rej
d3(180°)	0.152	0.169	0.212	0.144	0.136
d4(270°)	rej	rej	rej	rej	rej
dm	0.141	0.182	0.182	0.136	0.144
Mean pin wear(mm)	0.157				
CAI	1.57				
Standard deviation of CAI	0.02				
CAI'	1.14				
CAI_M	1.03				

K_03					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	5	8	18	19	95
Mean d1(0°)	0.025	0.068	0.161	0.093	0.102
Mean d2(90)	0.042	0.051	0.169	0.110	0.110
Mean d3(180°)	0.076	0.059	0.161	0.102	0.093
Mean d4(270°)	0.076	0.076	0.210	0.110	0.119
dm	0.055	0.064	0.175	0.104	0.106
Mean pin wear(mm)	0.101				
CAI	1.01				
Standard deviation of CAI	0.05				

K_04					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	4	7	9	10	17
d1(0°)	0.186	0.169	0.212	0.195	0.220
d2(90°)	0.152	0.161	0.212	0.203	0.169
d3(180°)	0.144	0.203	0.203	0.246	0.220
d4(270°)	0.161	0.178	0.203	0.212	0.203
dm	0.161	0.178	0.207	0.214	0.203
Mean pin wear(mm)	0.193				
CAI	1.93				
Standard deviation of CAI	0.02				
CAI'	1.40				
CAI_M	1.24				

K_04					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	47	50	52	69	76
d1(0°)	0.102	0.119	0.076	0.102	0.102
d2(90°)	0.127	0.119	0.085	0.102	0.102
d3(180°)	0.119	0.110	0.076	0.102	0.085
d4(270°)	0.110	0.119	0.093	0.085	0.085
dm	0.110	0.119	0.083	0.097	0.093
Mean pin wear(mm)					0.101
CAI					1.01
Standard deviation of CAI					0.01

K_05					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	4	6	12	13	15
d1(0°)	0.203	0.186	0.144	0.195	0.161
d2(90°)	rej	rej	0.186	rej	0.178
d3(180°)	0.233	0.203	0.169	0.144	0.178
d4(270°)	rej	rej	0.152	rej	0.212
dm	0.218	0.195	0.163	0.169	0.182
Mean pin wear(mm)					0.185
CAI					1.85
Standard deviation of CAI					0.02
CAI'					1.35
CAI_M					1.20

K_05					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	10	13	14	97	99
d1(0°)	0.059	0.152	0.119	0.110	0.051
d2(90°)	0.093	0.136	0.152	0.102	0.076
d3(180°)	0.059	0.152	0.178	0.110	0.076
d4(270°)	0.093	0.161	0.127	0.093	0.093
dm	0.076	0.150	0.144	0.104	0.074
Mean pin wear(mm)					0.110
CAI					1.10
Standard deviation of CAI					0.036

Ασβεστόλιθος TITAN

KY_01					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	2	6	7	9	18
d1(0°)	0.178	0.229	0.152	0.216	0.280
d2(90°)	0.195	0.195	0.119	0.195	0.304
d3(180°)	0.161	0.203	0.154	0.237	0.270
d4(270°)	0.152	0.186	0.144	0.186	0.275
dm	0.171	0.203	0.142	0.209	0.282
Mean pin wear(mm)					0.202
CAI					2.02
Standard deviation of CAI					0.05
CAI'					1.46
CAI_M					1.29

KY_01					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	11	36	81	83	98
d1(0°)	0.127	0.110	0.127	0.076	0.085
d2(90°)	0.127	0.110	0.127	0.085	0.093
d3(180°)	0.144	0.127	0.136	0.102	0.076
d4(270°)	0.127	0.102	0.119	0.093	0.093
dm	0.131	0.112	0.127	0.089	0.087
Mean pin wear(mm)					0.109
CAI					1.10
Standard deviation of CAI					0.02

KY_02					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	2	3	8	12	14
d1(0°)	0.220	0.161	0.169	0.229	0.288
d2(90°)	0.195	0.144	0.169	0.220	0.263
d3(180o)	0.229	0.186	0.161	0.220	0.195
d4(270°)	0.229	0.195	0.186	0.229	0.254
dm	0.218	0.172	0.172	0.224	0.250
Mean pin wear(mm)					0.207
CAI					2.10
Standard deviation of CAI					0.03
CAI'					1.50
CAI_M					1.33

KY_02					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	55	58	73	87	89
d1(0°)	0.102	0.085	0.051	0.068	0.102
d2(90°)	0.076	0.068	0.059	0.085	0.093
d3(180°)	0.110	0.042	0.059	0.093	0.085
d4(270°)	0.093	0.051	0.051	0.093	0.093
dm	0.095	0.061	0.055	0.085	0.093
Mean pin wear(mm)					0.078
CAI					0.78
Standard deviation of CAI					0.02

KY_03						
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5	
Ακίδα No	1	12	16	18	20	
d1(0°)	0.186	0.110	rej	0.220	0.093	
d2(90°)	0.169	0.144	0.164	rej	rej	
d3(180°)	0.195	0.110	rej	0.178	0.093	
d4(270°)	0.195	0.110	0.119	rej	rej	
dm	0.186	0.119	0.141	0.199	0.093	
Mean pin wear(mm)						0.148
CAI						1.48
Standard deviation of CAI						0.04
CAI'						1.07
CAI_M						0.98

KY_03						
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5	
Ακίδα No	34	54	63	64	72	
d1(0°)	0.127	0.169	0.119	0.102	0.152	
d2(90o)	0.119	0.110	0.085	0.085	0.102	
d3(180°)	0.144	0.136	0.119	0.110	0.152	
d4(270°)	0.110	0.119	0.102	rej	rej	
dm	0.125	0.133	0.106	0.099	0.135	
Mean pin wear(mm)						0.120
CAI						1.20
Standard deviation of CAI						0.02

KY_04						
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5	
Ακίδα No	2	3	7	11	14	
d1(0°)	0.296	0.254	0.237	0.237	0.212	
d2(90°)	0.288	0.212	0.220	0.322	0.220	
d3(180°)	0.254	0.241	0.258	0.220	0.212	
d4(270°)	0.237	0.220	0.212	0.263	0.271	
Mean dm	0.269	0.232	0.232	0.260	0.229	
Mean pin wear(mm)						0.244
CAI						2.44
Standard deviation of CAI						0.02
CAI'						1.77
CAI_M						1.55

KY_04					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	46	49	53	57	71
d1(0°)	0.102	0.119	0.144	0.144	0.144
d2(90°)	0.136	0.144	0.152	0.110	0.110
d3(180°)	0.110	0.127	0.178	0.144	0.161
d4(270°)	0.119	0.152	0.136	0.152	0.119
dm	0.116	0.136	0.152	0.138	0.133
Mean pin wear(mm)					0.135
CAI					1.35
Standard deviation of CAI					0.01

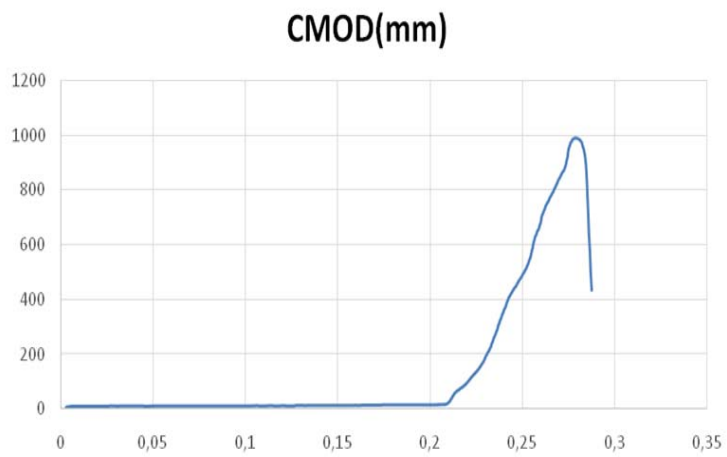
KY_05					
HRC40	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	1	5	8	10	14
d1(0°)	0.178	0.169	0.119	0.195	0.195
d2(90°)	0.186	0.182	0.144	0.203	rej
d3(180°)	0.186	0.152	0.152	0.212	0.212
d4(270°)	0.178	0.144	0.144	0.203	rej
dm	0.182	0.162	0.140	0.203	0.203
Mean pin wear(mm)					0.178
CAI					1.78
Standard deviation of CAI					0.03
CAI'					1.29
CAI_M					1.16

KY_05					
HRC55	Test No1	Test No2	Test No3	Test No4	Test No5
Ακίδα No	15	25	27	43	84
d1(0°)	0.153	0.076	0.102	0.178	0.068
d2(90°)	0.174	0.085	0.076	0.144	0.102
d3(180°)	0.110	0.068	0.076	0.237	0.127
d4(270°)	0.093	0.059	0.059	0.178	0.102
dm	0.132	0.072	0.078	0.184	0.099
Mean pin wear(mm)					0.113
CAI					1.13
Standard deviation of CAI					0.05

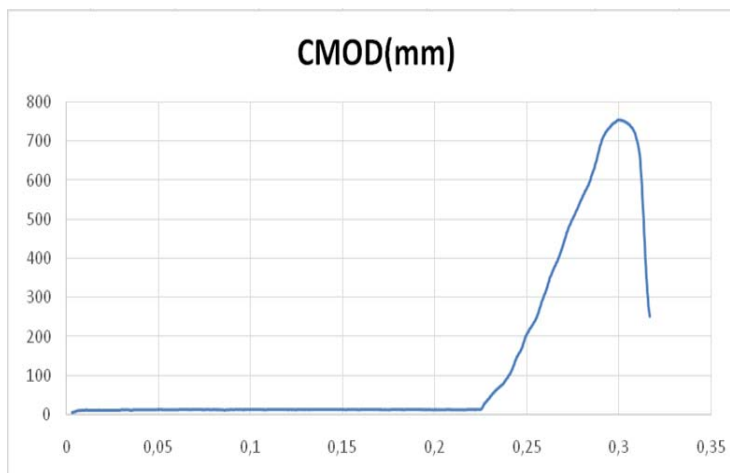
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β
ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Ασβεστόλιθος Τρικάλων

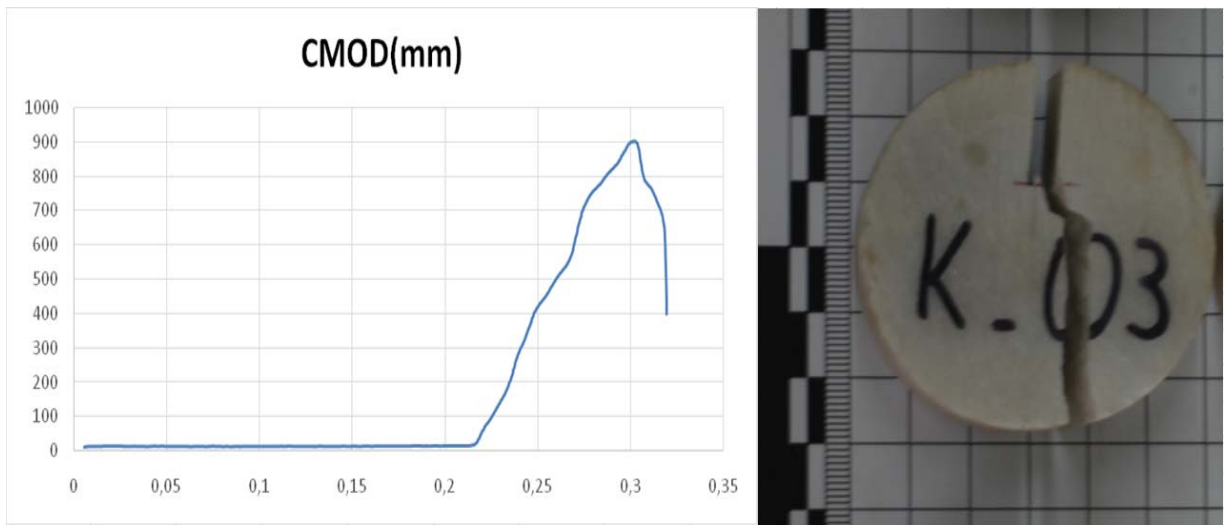
K_01



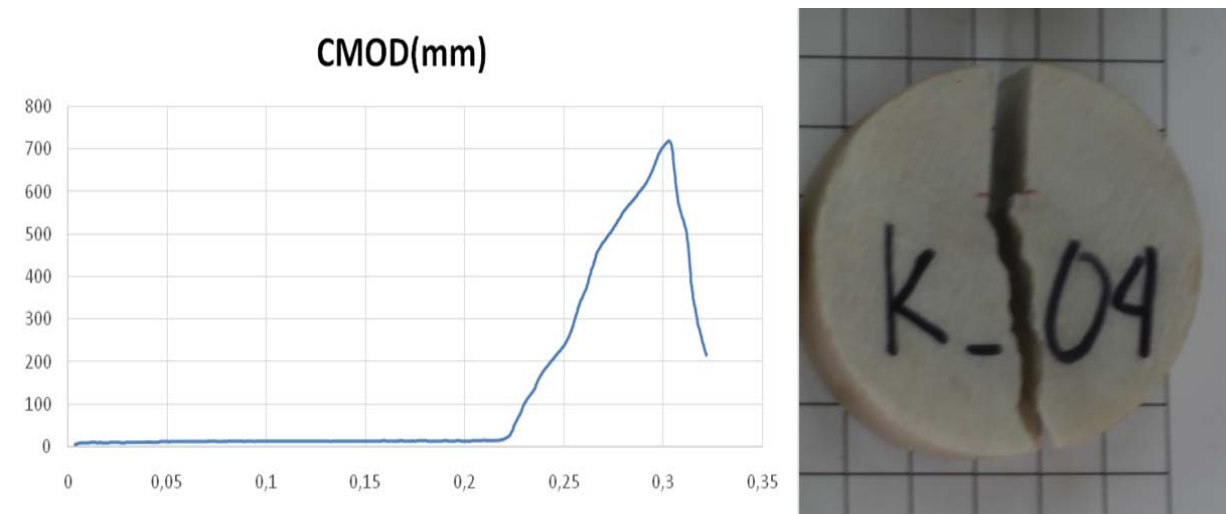
K_02



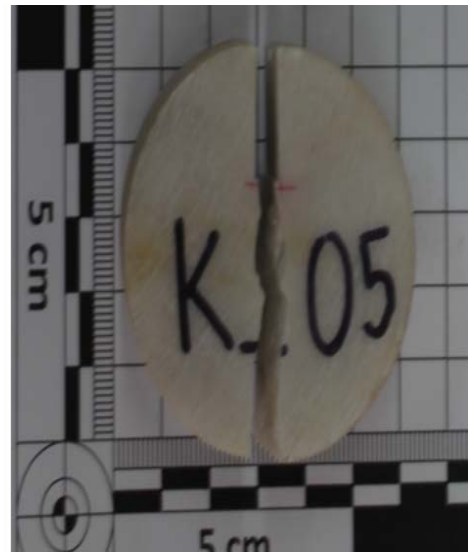
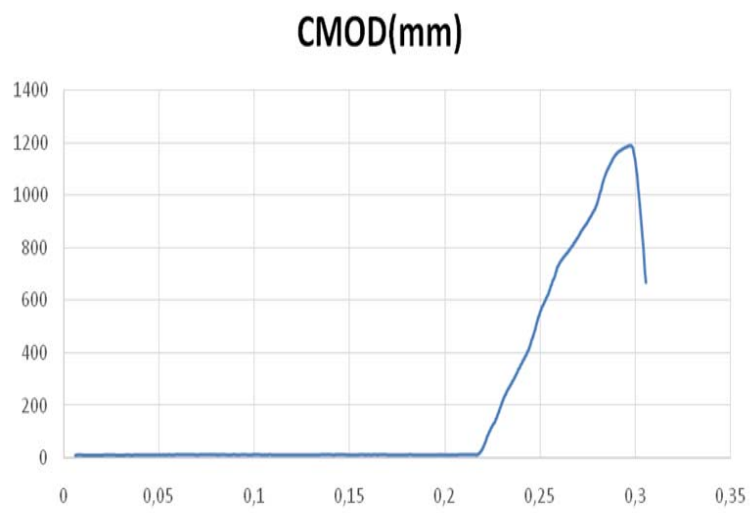
K_03



K_04

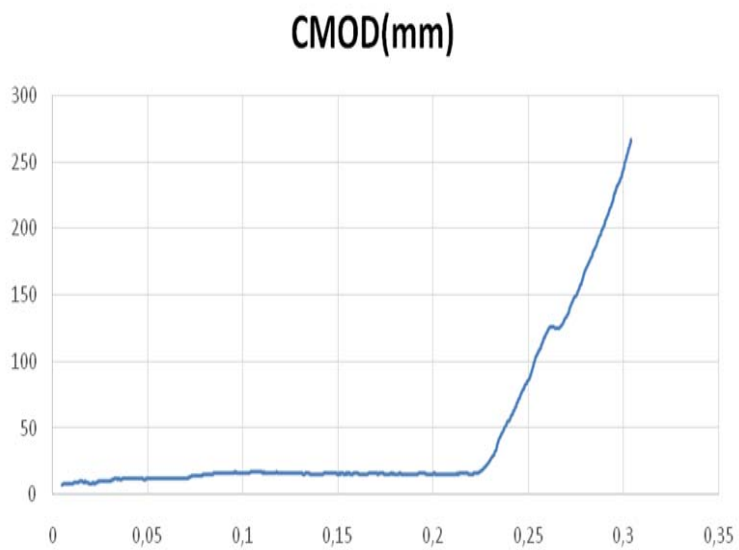


K_05

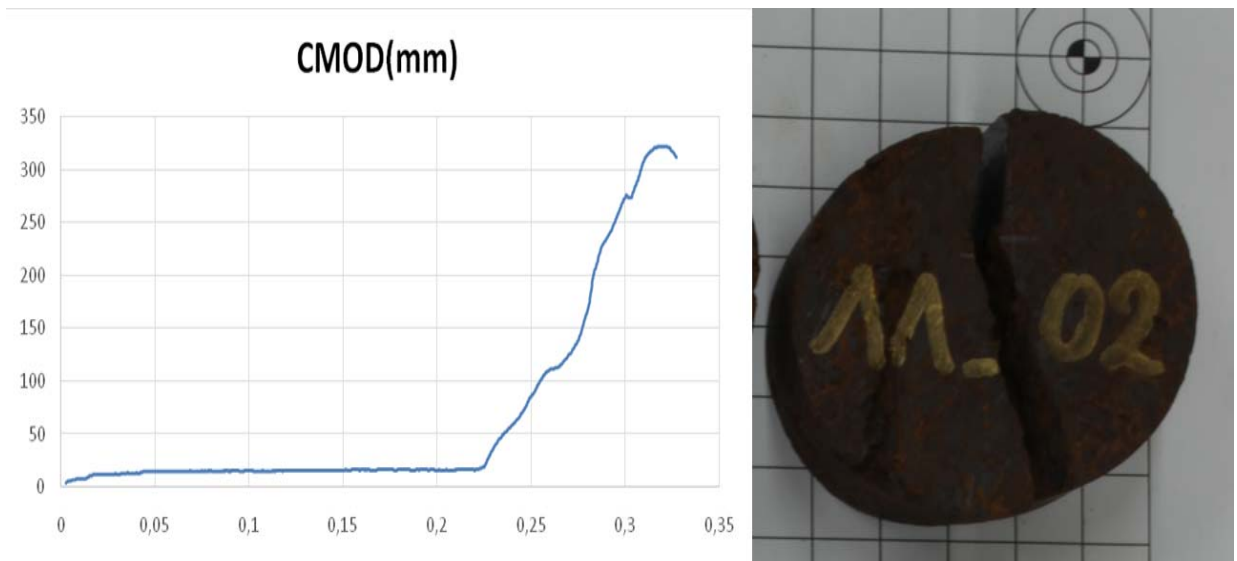


Λατερίτης ΛΑΡΚΟ

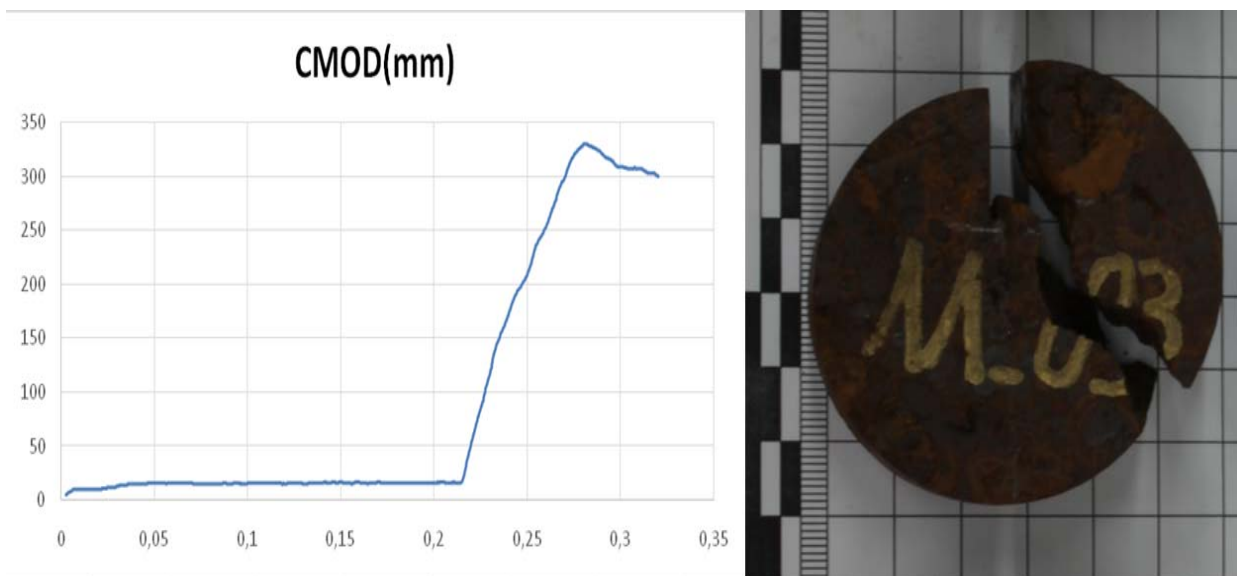
ΛΛ_01



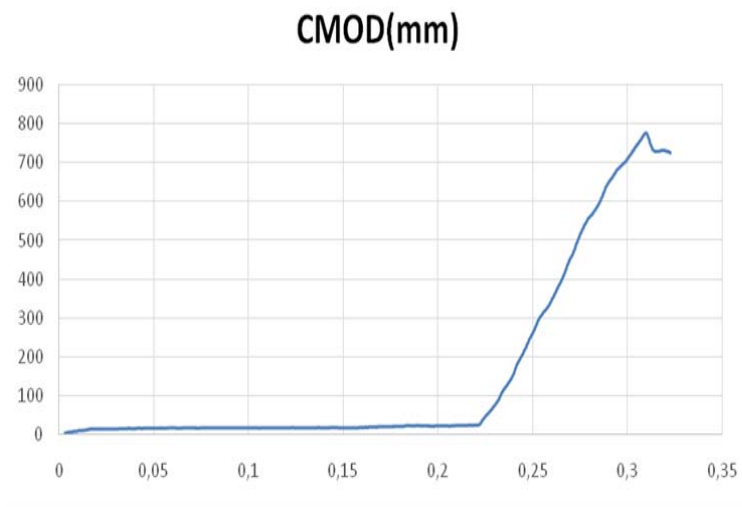
ΛΛ_02



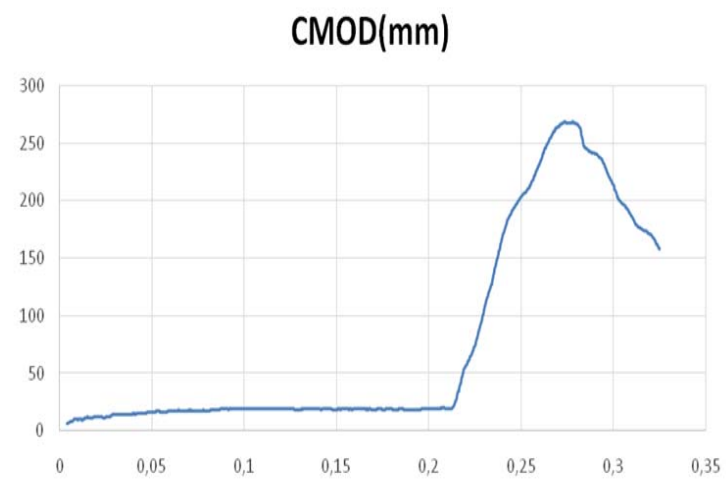
ΛΛ_03(Μη αποδεκτή δοκιμή. Η θραύση δεν ξεκίνησε από το άκρο της εκγοπής)



ΛΛ_04(Μη αποδεκτή δοκιμή)

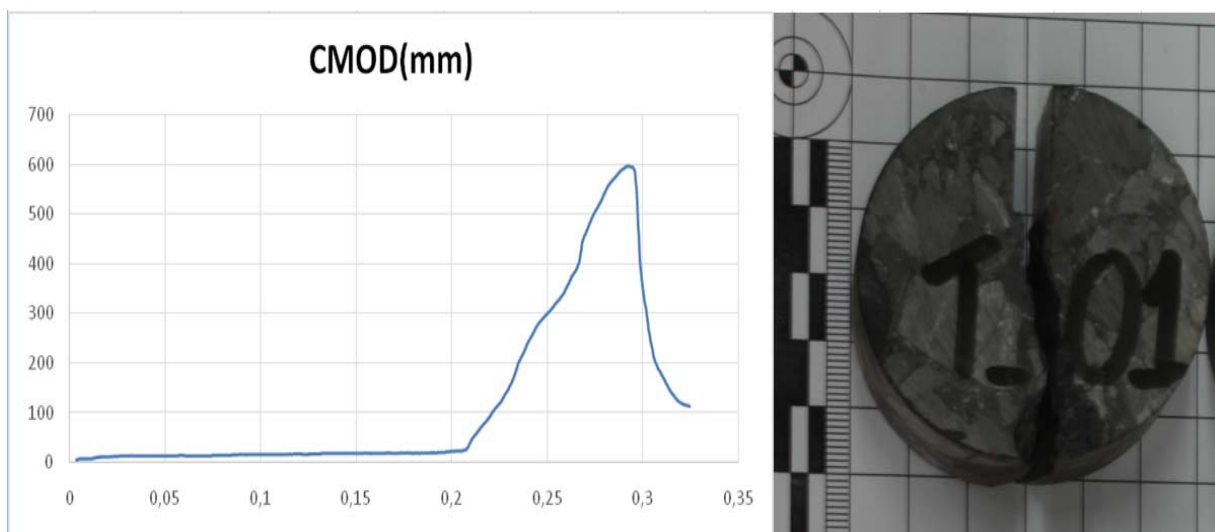


ΛΛ_05

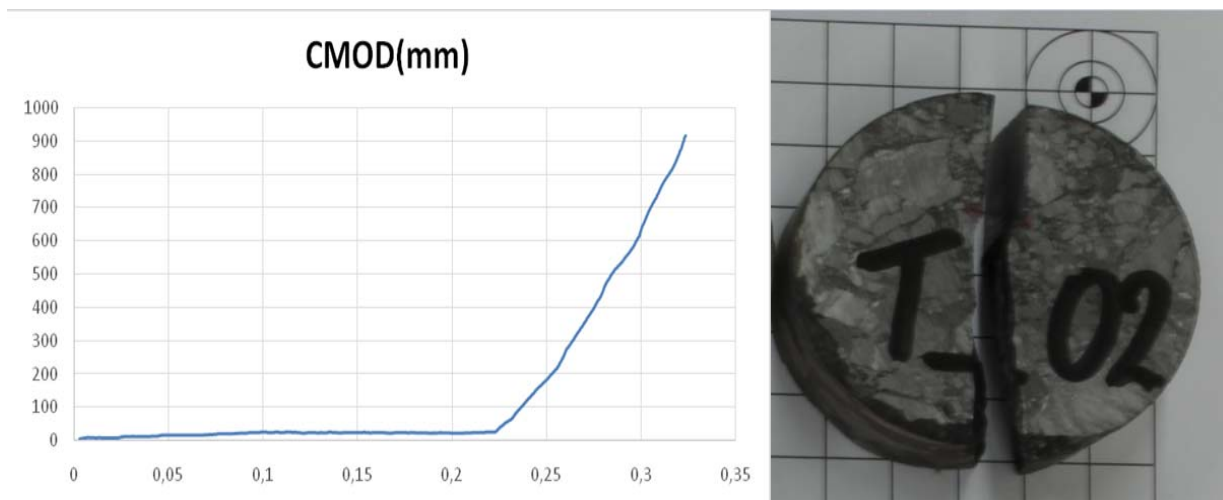


Ασβεστόλιθος Τρίπολης

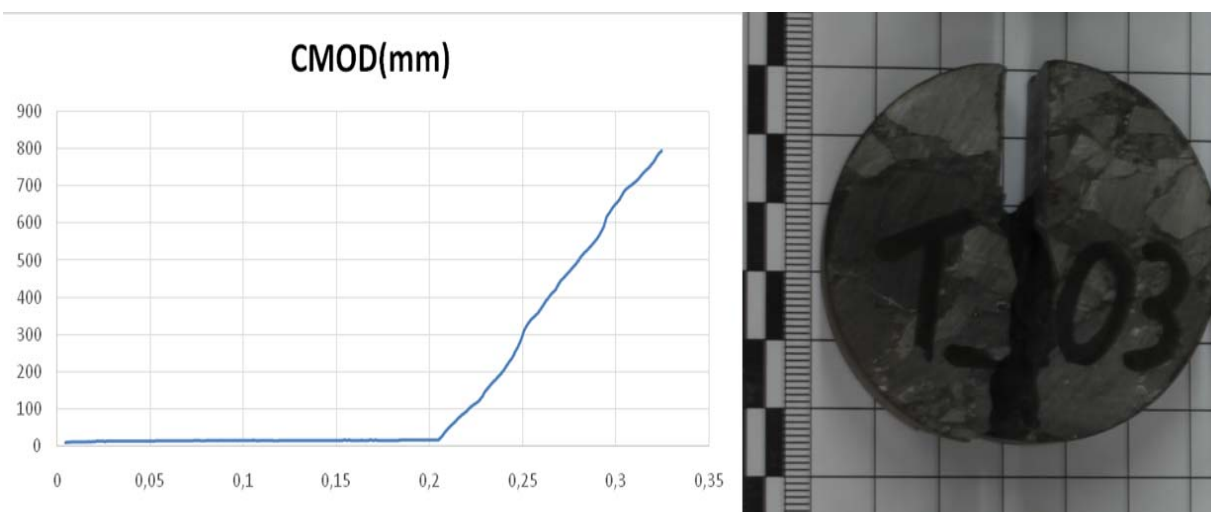
T_01



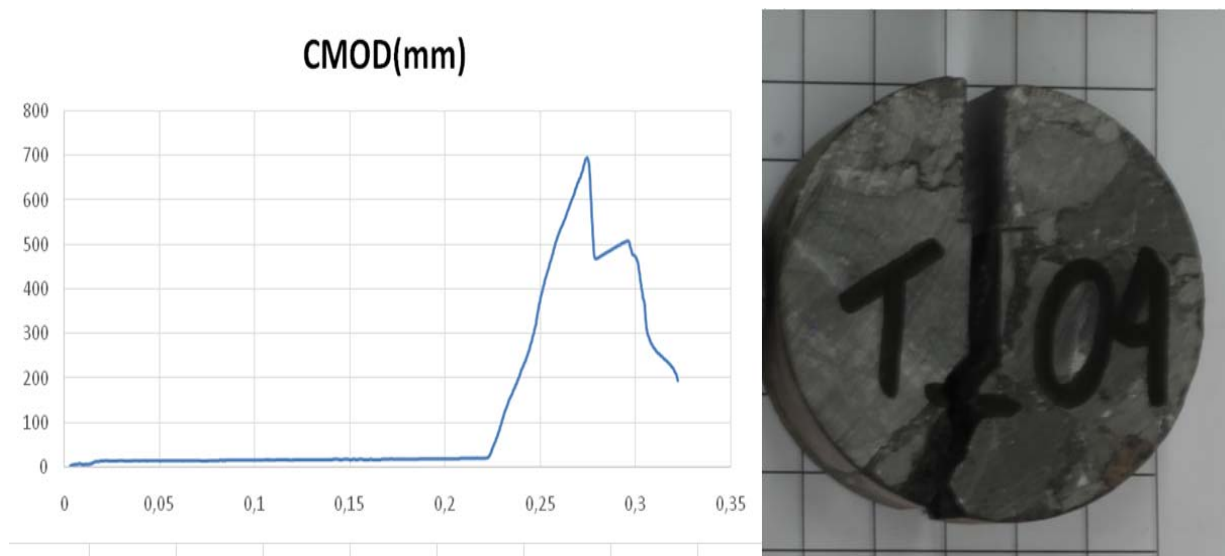
T_02



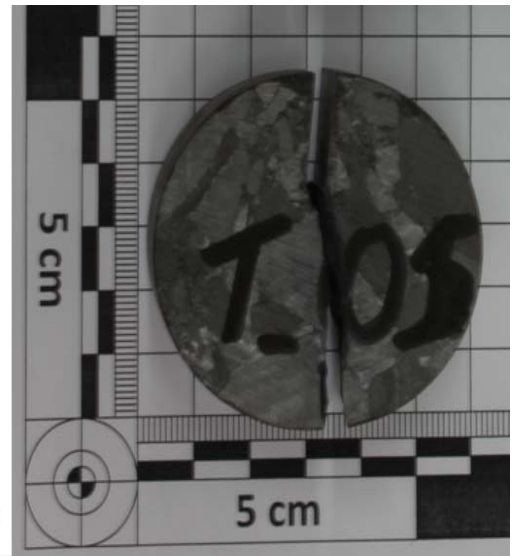
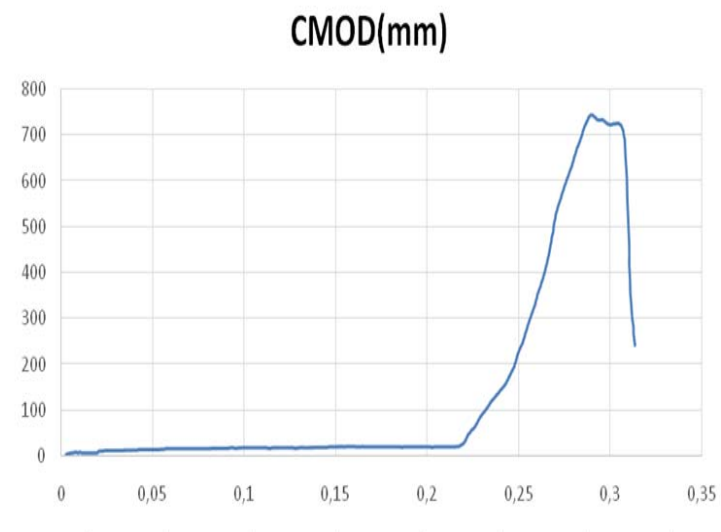
T_03



T_04

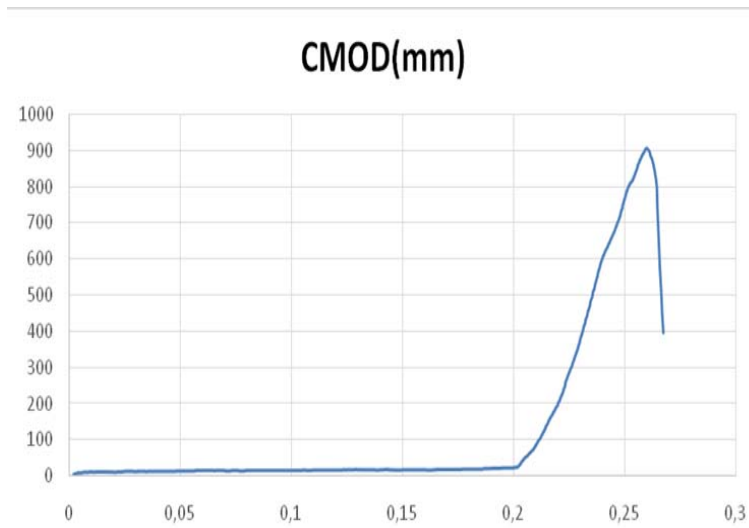


T_05

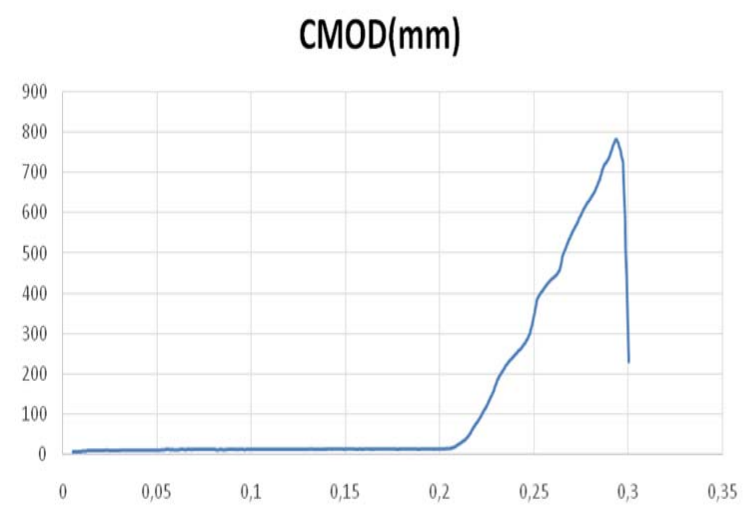


Ασβεστόλιθος ΤΙΤΑΝ

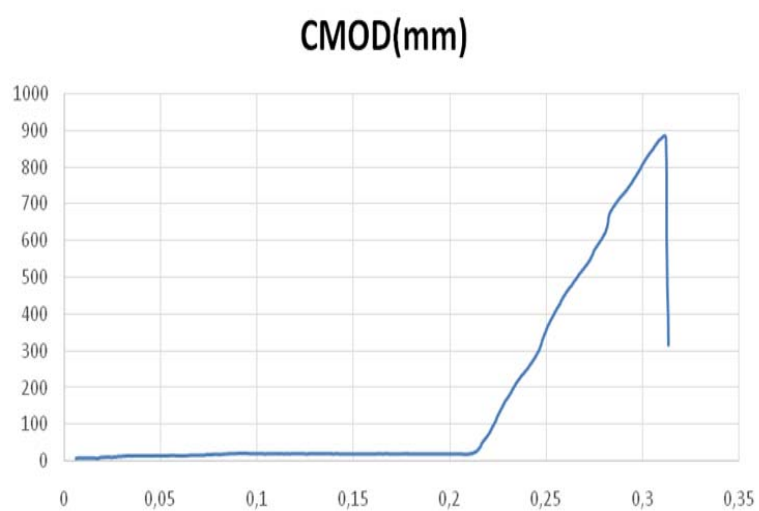
KY_01



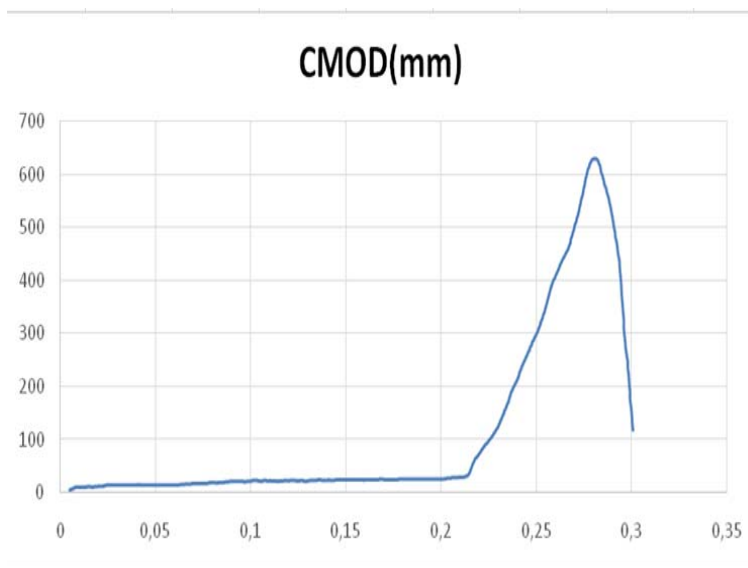
KY_02 (Μη αποδεκτή δοκιμή)



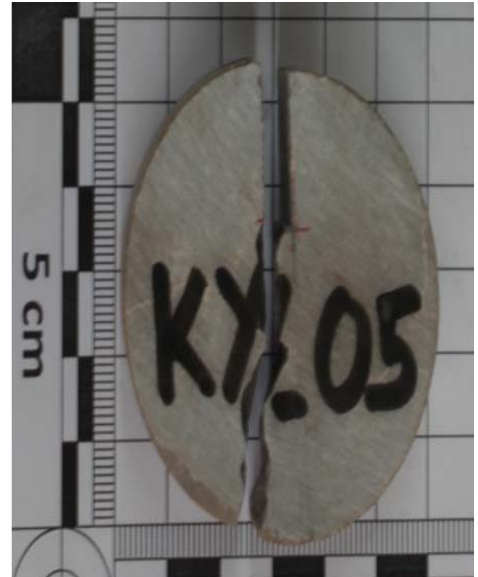
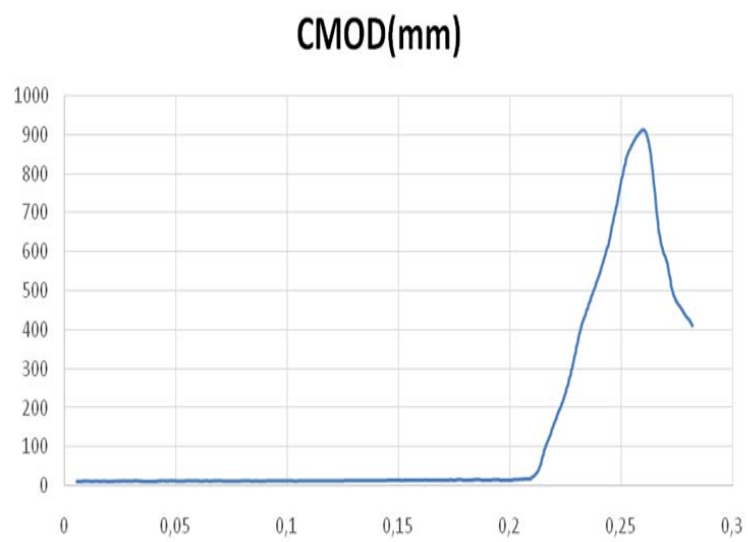
KY_03 (Μη αποδεκτή δοκιμή)



KY_04



KY_05



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Συντελεστές Τριβής

δοκίμιο	γωνία τριβής	rad	συντελεστής τριβής
	$\Phi(^{\circ})$		μ
T_01	15	0,262	0,268
T_02	16	0,279	0,287
T_03	17	0,297	0,306
T_04	17	0,297	0,306
T_05	17	0,297	0,306
ΛΛ_01	17	0,297	0,306
ΛΛ_02	18	0,314	0,325
ΛΛ_03	18	0,314	0,325
ΛΛ_04	19	0,332	0,344
ΛΛ_05	19	0,332	0,344
K_01	21	0,367	0,384
K_02	22	0,384	0,404
K_03	19,5	0,340	0,354
K_04	21	0,367	0,384
K_05	20	0,349	0,364
KY_01	20	0,349	0,364
KY_02	18,5	0,323	0,335
KY_03	19	0,332	0,344
KY_04	20	0,349	0,364
KY_05	19	0,332	0,344

Πάχη και Διάμετροι δοκιμίων

Ασβεστόλιθος Τρίπολης		
Δοκίμιο	Πάχος(mm)	Διάμετρος(mm)
T_01	26.20	54.18
T_02	25.87	54.15
T_03	26.05	54.19
T_04	26.10	54.17
T_05	25.98	54.15

Ασβεστόλιθος Τρικάλων		
Δοκίμιο	Πάχος(mm)	Διάμετρος(mm)
K_01	25.87	53.39
K_02	26.81	54.22
K_03	25.76	54.20
K_04	25.71	54.18
K_05	25.40	54.27

Λατερίτης Λάρκο		
Δοκίμιο	Πάχος(mm)	Διάμετρος(mm)
ΛΛ_01	26.60	53.90
ΛΛ_02	26.45	53.89
ΛΛ_03	26.70	54.24
ΛΛ_04	25.54	54.14
ΛΛ_05	26.77	54.25

Ασβεστόλιθος Τιτάν		
Δοκίμιο	Πάχος(mm)	Διάμετρος(mm)
KY_01	26.61	54.18
KY_02	26.60	54.13
KY_03	26.53	54.33
KY_04	26.62	54.30
KY_05	26.08	54.28

Πάχος εγκοπής

Δοκίμιο	μετ1	μετ2	μετ3	μετ4	μετ5	μετ6	μετ7	thickness
T_01	1,11	1,20	1,30	1,32	1,29	1,22	1,13	1,22
T_02	1,14	1,19	1,25	1,26	1,25	1,22	1,19	1,21
T_03	1,16	1,22	1,26	1,24	1,27	1,25	1,17	1,22
T_04	1,11	1,14	1,17	1,18	1,21	1,17	1,23	1,17
T_05	1,15	1,24	1,27	1,30	1,24	1,21	1,17	1,23
ΛΛ_01	1,15	1,18	1,30	1,32	1,24	1,13	1,18	1,21
ΛΛ_02	1,16	1,17	1,20	1,20	1,25	1,18	1,18	1,19
ΛΛ_03	1,18	1,20	1,22	1,25	1,18	1,19	1,26	1,21
ΛΛ_04	1,21	1,19	1,21	1,20	1,21	1,24	1,18	1,21
ΛΛ_05	1,17	1,21	1,19	1,17	1,20	1,23	1,18	1,19
K_01	1,27	1,19	1,30	1,15	1,18	1,21	1,22	1,22
K_02	1,23	1,28	1,35	1,38	1,34	1,32	1,19	1,30
K_03	1,20	1,30	1,21	1,12	1,17	1,19	1,20	1,20
K_04	1,20	1,22	1,26	1,19	1,26	1,20	1,22	1,22
K_05	1,21	1,27	1,32	1,32	1,23	1,24	1,20	1,26
KY_01	1,20	1,55	1,57	1,32	1,28	1,48	1,34	1,39
KY_02	1,14	1,15	1,32	1,39	1,33	1,23	1,20	1,25
KY_03	1,19	1,20	1,30	1,43	1,18	1,22	1,41	1,28
KY_04	1,22	1,23	1,25	1,35	1,25	1,18	1,19	1,24
KY_05	1,20	1,21	1,23	1,24	1,22	1,18	1,15	1,20