



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Εκτίμηση της Φθοράς Κοπτικών Άκρων στην Εξόρυξη Πετρωμάτων
με Μηχανικά Μέσα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σασσίν Στέφανου - Μάρκου

Επιβλέπων: Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Εκτίμηση της Φθοράς Κοπτικών Άκρων στην Εξόρυξη Πετρωμάτων
με Μηχανικά Μέσα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σασσίν Στέφανου - Μάρκου

Επιβλέπων: Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις _____

Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. _____

Πάυλος Νομικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π. _____

Ιωάννης Ζευγώλης, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. _____

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε, σύμφωνα με το πρόγραμμα σπουδών της Σχολής, στο πλαίσιο του μαθήματος «Εξόρυξη Πετρωμάτων II (Εξόρυξη με Μηχανικά Μέσα)».

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Θεόδωρο Μιχαλακόπουλο για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και τις πάντα εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις του. Όλα τα παραπάνω καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την οικογένειά μου για τη βοήθεια, τις παρατηρήσεις και τη διαρκή υλική και πνευματική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια και συνεχίζουν να μου προσφέρουν. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου φίλους που συνέβαλαν στη διαδικασία της συγγραφής.

Η εργασία αφιερώνεται σε όσους αναφέρθηκαν παραπάνω και σε αυτούς που μοχθούν για την ανάπτυξη της τεχνολογίας με σκοπό ένα καλύτερο μέλλον.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία υπό τον τίτλο «Εκτίμηση της φθοράς κοπτικών άκρων στην εξόρυξη πετρωμάτων με μηχανικά μέσα» πραγματεύεται τη σημαντικότητα των χαρακτηριστικών των υλικών τόσο των πετρωμάτων, όσο και των κοπτικών άκρων στη φθορά που προκαλείται στα κοπτικά άκρα λόγω απόξεσης κατά τις εξορύξεις με μηχανικά μέσα. Το μέτρο της φθοράς είναι μείζονος σημασίας στον οικονομικό σχεδιασμό ενός έργου, πράγμα που σημαίνει πως η σωστή εκτίμησή της είναι σημαντική.

Για την εκτίμηση της φθοράς, αρχικά προσδιορίζονται οι μηχανισμοί φθοράς που μπορούν να δρουν στα κοπτικά άκρα κατά την εξόρυξη, μεταξύ των οποίων η φθορά απόξεσης και η φθορά προσκόλλησης. Ο κύριος μηχανισμός που εκτιμάται να δρα είναι η φθορά λόγω απόξεσης δυο σωμάτων ή τριών σωμάτων, λόγω της υψηλής εμφάνισης χαλαζία στον φλοιό της Γης.

Η φθορά απόξεσης ορίζεται ως η εκτόπιση υλικού που προκαλείται από την παρουσία σκληρών σωματιδίων ανάμεσα σε δύο επιφάνειες, ή ενσωματωμένων σε τουλάχιστον μια εκ των δύο, οι οποίες βρίσκονται σε σχετική μεταξύ τους κίνηση, ή από την παρουσία σκληρών ανωμαλιών σε τουλάχιστον μια από τις σχετικώς κινούμενες επιφάνειες. Έτσι, η μελέτη του αντικειμένου της εκτίμησης της φθοράς επικεντρώνεται τόσο στα χαρακτηριστικά του πετρώματος, όπως είναι η συνέχεια, η αντοχή και η σκληρότητά του, όσο και στα χαρακτηριστικά του κοπτικού άκρου.

Για τη συνέχεια του πετρώματος αναλύεται το σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας RMR (Rock Mass Rating) και ο δείκτης RQD (Rock Quality Designation).

Η σκληρότητα μπορεί να προσδιοριστεί από διάφορες δοκιμές που μετρούνε τη σκληρότητα, οι οποίες ταξινομούνται σε δοκιμές χάραξης, δοκιμές διείδυσης και δοκιμές με αναπήδηση ή δυναμικές δοκιμές. Στις δοκιμές αντοχής, το πέτρωμα μελετάται ως προς την ικανότητά του να αντέχει υπό την άσκηση ενός φορτίου χωρίς να αστοχήσει ή να παραμορφωθεί πλαστικά. Οι δοκιμές που αναλύονται υπολογίζουν την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, την αντοχή σε αντιδιαμετρική θλίψη και τον δείκτη αντοχής σημειακής φόρτισης.

Ακόμα, πέρα από τις μετρήσεις των παραπάνω χαρακτηριστικών, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για τον υπολογισμό της αποξεστικότητας ενός πετρώματος. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, μεταξύ των οποίων οι πιο διαδεδομένες είναι οι νορβηγικές μέθοδοι NTNU/SINTEF και η μέτρηση του δείκτη αποξεστικότητας CERCHAR.

Συνδυάζοντας τιμές των διαφόρων χαρακτηριστικών του πετρώματος, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα υπολογισμού της εκτιμώμενης φθοράς των κοπτικών άκρων. Η αρχική προσέγγιση των μοντέλων είχε θεωρητική βάση, αναλύοντας τη φθορά σε στοιχειώδες επίπεδο και περιγράφοντας τους μηχανισμούς της φθοράς με διαφορετικές εξισώσεις. Τα μοντέλα αυτά δεν βρίσκουν πρακτική εφαρμογή. Στις τελευταίες ενότητες της εργασίας, αναλύονται εφαρμοσμένα μοντέλα εκτίμησης της φθοράς και στη συνέχεια παρουσιάζεται μια εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τη χρήση των μοντέλων αυτών.

Abstract

This diploma thesis, under the title “Evaluation of the wear of cutting tools in the mechanical excavation of rock” presents the significance of the characteristics of both rock and cutting tool materials for the wear of the cutting tools during mechanical excavations due to abrasion. The quantity of wear is important for the financial planning of an excavation, rendering its correct calculation of high importance.

For the evaluation of the quantity of wear, the wear mechanisms at work of rock cutting tools in excavations are studied. The main mechanism at work is considered to be two-body and three-body abrasion wear, mostly because of the abundance of quartz in the Earth’s crust.

“Abrasive wear is the displacement of material caused by the presence of hard particles, of hard particles between or embedded in one or both of the two surfaces in relative motion, or by the presence of hard protuberances on one or both of the relatively moving surfaces” (Zum Gahr, 1987). Thus, the study of the evaluation of wear is focused on both the rock’s and the cutting tool’s characteristics, such as hardness, toughness and rock coherence.

For the rock coherence, the Rock Mass Rating system is used for the classification of the rock mass and the Rock Quality Designation index is used for the consistency of the rock.

Hardness can be defined by a number of tests, which are grouped as scratching tests, indentation tests and rebound or dynamic tests.

With toughness tests, a specimen is tested upon its ability to withstand a load without being fractured or plastically deformed. The tests presented are for the calculation of the uniaxial compressive strength, the brazilian tensile strength and the point load strength index.

Furthermore, methods have been developed for calculating the abrasivity of a rock. There is a number of laboratory tests, among which the most widespread are the Norwegian methods NTNU/SINTEF and the CERCHAR abrasivity index test.

By combining values of rock characteristics, there is a variety of models that have been developed for estimating the expected wear of the cutting tools. The original approach of the models was theoretical, analyzing the wear on a basic level and describing the wear mechanisms with differential equations. The use of those models has no practical value.

In the last segments of the thesis, practical models for the evaluation of wear are being analyzed, being followed by the presentation of an application developed for the use of those models.

Copyright © Σασσίν Στέφανος - Μάρκος, 2023.

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	5
Περίληψη	6
Abstract	7
Κατάλογος Εικόνων	12
Κατάλογος Πινάκων	14
Κατάλογος Διαγραμμάτων	15
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	16
1.1. Η φθορά των κοπτικών στις εξορύξεις με μηχανικά μέσα	16
1.2. Στόχοι της εργασίας	16
1.3. Δομή της εργασίας	17
Κεφάλαιο 2: Η φθορά των κοπτικών άκρων	18
2.1. Ιστορική αναδρομή	18
2.2. Μηχανισμοί φθοράς	20
2.3. Αξιολόγηση του προβλήματος	21
2.4. Χαρακτηρισμός του πετρώματος	23
2.5. Χαρακτηρισμός του πετρώματος με χρήση του δείκτη RQD και του συστήματος RMR	24
Κεφάλαιο 3: Σκληρότητα και αντοχή του πετρώματος	27
3.1. Σκληρότητα	27
3.1.1. Δοκιμή χάραξης κατά Mohs.....	27
3.1.2. Μέτρηση της σκληρότητας κατά Brinell.....	28
3.1.3. Μέτρηση της σκληρότητας κατά Knoop.....	30
3.1.4. Μέτρηση της Σκληρότητας κατά Vickers.....	32
3.1.5. Μέτρηση της σκληρότητας κατά Rockwell.....	34
3.1.6. Υπολογισμός της σκληρότητας κατά Rosiwal.....	38
3.1.7. Μέτρηση της σκληρότητας με κρούση κατά Shore (ISRM, 2007).....	40
3.1.8. Μέτρηση της σκληρότητας με κρούση κατά Schmidt (ISRM, 2015).....	42
3.2. Δείκτες μηχανικής αντοχής	45
3.2.1. Μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Uniaxial Compressive Strength - UCS).....	46

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

3.2.2. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Tensile Strength - BTS)	48
3.2.3. Δείκτης σημειακής αντοχής (Point Load Strength Index - PLI)	51
Κεφάλαιο 4: Απόξεση των υλικών	60
4.1. Ορισμός	60
4.1.1. Αντίσταση στην απόξεση	60
4.1.2. Αποξεστική ικανότητα ενός πετρώματος.....	61
4.1.3. Σκληρότητα των κοπτικών άκρων	62
4.2. Δοκιμές προσδιορισμού της ικανότητας απόξεσης των υλικών	65
4.2.1. Δοκιμή pin-on-disc και συντελεστής φθοράς F του Schimazek	65
4.2.2. Δείκτης αποξεστικής ικανότητας του πετρώματος (Rock Abrasivity Index - RAI).....	67
4.2.3. Νορβηγικές δοκιμές	68
4.2.3.1. Δείκτης ψαθυρότητας S_{20}	69
4.2.3.2. Sievers' J-Value (SJ)	70
4.2.3.3. Abrasion Value (AV) και Abrasion Value Cutting Steel (AVS).....	71
4.2.4. Δοκιμή αποξεστικότητας κατά CERCHAR και Δείκτης CAI	74
Κεφάλαιο 5: Μοντέλα εκτίμησης της φθοράς κοπτικών άκρων . . .	86
5.1. Ποσοτικοποίηση της φθοράς σε μικροσκοπικό επίπεδο	86
5.1.1. Μοντέλο Holm (1946 από Bhushan, 2013).....	86
5.1.2. Μοντέλο Archard (1953).....	86
5.1.3. Μοντέλα Rabinowicz (1995, από Bhushan, 2013).....	87
5.1.4. Ποσοτικές εξισώσεις φθοράς απόξεσης σε υλικά με ψαθυρή συμπεριφορά	89
5.2. Εμπειρικά μοντέλα για κοπή πετρωμάτων	90
5.2.1. Μοντέλο κατά Bruland (1998)	90
5.2.1.1. Θεωρητική ζωή κοπτικού δίσκου σε TBM H_0	90
5.2.1.2. Διορθωτικός παράγοντας k_D από τη διάμετρο της κεφαλής του TBM	91
5.2.1.3. Διορθωτικός παράγοντας k_{rpm} από τη γωνιακή ταχύτητα της κεφαλής του TBM	92
5.2.1.4. Διορθωτικός παράγοντας k_N από το πλήθος των κοπτικών στην κεφαλή του TBM.....	92
5.2.1.5. Διορθωτικός παράγοντας k_Q από την περιεκτικότητα σε χαλαζία του πετρώματος.....	93

5.2.1.6. Αναμενόμενη κατανάλωση κοπτικών άκρων	93
5.2.2. Εμπειρικό μοντέλο κατά Hassanpour et al. (2014).....	94
5.2.2.1. Γενικά	94
5.2.2.2. Μοντέλα συσχέτισης με χαρακτηριστικά του πετρώματος.....	94
5.2.2.3. Μοντέλο πρόβλεψης της ζωής των κοπτικών δίσκων με χρήση των VHNR και UCS	98
5.2.3. Μοντέλο κατά Maidl (2008).....	100
5.2.4. Μοντέλο κατά Sandvik (2020)	101
5.2.5. Μοντέλο κατά Bieniawski (2009)	102
5.2.5.1. Η φθορά των άκρων όταν $\sigma_{ci} > 45$ MPa.....	104
5.2.5.2. Η φθορά των άκρων όταν $\sigma_{ci} < 45$ MPa.....	105
5.2.6. Μοντέλα κατά Plinninger et al. (2002)	105
Κεφάλαιο 6: Ανάπτυξη εφαρμογής για την εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών	108
6.1. Γλώσσα Προγραμματισμού Python	108
6.1.1. Δυνατότητες και χαρακτηριστικά της Python	109
6.2. Ανάπτυξη εφαρμογής	111
6.3. Η εφαρμογή	112
6.3.1. Μοντέλο Bruland (CLI)	114
6.3.2. Μοντέλο Bieniawski (RME/CAI).....	117
6.3.3. Μοντέλο Maidl (CAI/UCS).....	119
6.3.4. Μοντέλο Gehring (CAI).....	121
6.3.5. Μοντέλο Hassanpour (VHNR/UCS)	123
6.3.6. Μοντέλο Johannessen (VHNR).....	125
6.3.7. Μοντέλα Plinninger (CAI και RAI).....	127
6.3.7.1. Μοντέλο Plinninger (CAI)	127
6.3.7.2 Μοντέλο Plinninger (RAI)	128
6.3.8 Μοντέλο Sandvik (CAI/UCS)	130
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	132
Βιβλιογραφία	133
Ιστότοποι.....	137

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 - Εργαλεία για εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες. Τα υπ' αριθμόν XIII, XV και XVI είναι είδη εργαλείων διάτρησης με κρούση από σφυρί (VIII) ή σφύρα (VIII). Πηγή: M.A. della Fratta et Montalbano, <i>Practica minerale</i> , Bologna (1678), reproduced in Vergani (2009).....	18
Εικόνα 2.2 - Συσχετίσεις κατά την εξόρυξη με βυθοκόρο. Πηγή: Verhoef (1997)....	22
Εικόνα 2.3 - Παράδειγμα μέτρησης RQD. Πηγή: Deere and Deere (1988).....	25
Εικόνα 3.1 - Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης Brinell. Πηγή: ISO 6506-1:2014.	28
Εικόνα 3.2 - Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης Knoop. Πηγή: ISO 4545-1: 2017.	31
Εικόνα 3.3 - Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης Vickers. Πηγή: ISO 6507-1: 2018.	33
Εικόνα 3.4 - Σκληροσκόπιο Shore τύπου C-2. Πηγή: ISRM (2007).	40
Εικόνα 3.5 - Εξοπλισμός για τη μέτρηση Schmidt. Πηγή: ISRM (2015).	43
Εικόνα 3.6 - Εξοπλισμός για τον υπολογισμό της UCS. Πηγή: www.isrm.net.	46
Εικόνα 3.7 - Εξοπλισμός για τον υπολογισμό της BTS. Πηγή: www.isrm.net.	49
Εικόνα 3.8 - Σχηματική απεικόνιση του εξοπλισμού της BTS. Πηγή: ISRM (2007)	49
Εικόνα 3.9 - Σχηματική απεικόνιση κώνου στη δοκιμή PL. Πηγή: ISRM (2007).	52
Εικόνα 3.10 - Πιθανά γεωμετρικά σχήματα δείγματος για τον υπολογισμό του PLI. a) Κυλινδρικό δοκίμιο, b) Δοκίμιο σχήματος δίσκου, c) Πρισματικό δοκίμιο, d) Δοκίμιο ακανόνιστου σχήματος. Πηγή: ISRM (2007).	54
Εικόνα 3.11 - Άκυρη δοκιμή για τη μέτρηση του PLI σε κυλινδρικό δοκίμιο κάθετα στη διεύθυνση του άξονα της βάσης. Πηγή: ISRM (2007).	55
Εικόνα 3.12 - Άκυρη δοκιμή για τη μέτρηση του PLI σε κυλινδρικό δοκίμιο (δίσκο) παράλληλα στον άξονα του κέντρου των βάσεων. Πηγή: ISRM (2007).	56
Εικόνα 4.1 - Σκληρότητα Vickers του WC-Co του οίκου Sandvik. Πηγή: Sandvik (nd).	64
Εικόνα 4.2 - Δυσθραυστότητα του WC-Co του οίκου Sandvik σε $MN/m^{3/2}$. Πηγή: Sandvik (nd).	64
Εικόνα 4.3 - Διαδικασία για τον υπολογισμό της τιμής S_{20} . Πηγή: Dahl et al. (2012).	69
Εικόνα 4.4 - Δοκιμή για τη μέτρηση της τιμής SJ. Πηγή: Dahl et al. (2012).....	70
Εικόνα 4.5 - Δοκιμή υπολογισμού των AV, AVS και SAT. Πηγή: Dahl et al. (2012).	72
Εικόνα 4.6 - Οι δύο βασικοί τύποι του εξοπλισμού για τη μέτρηση του CAI. Πηγή: ISRM (2015).	75
Εικόνα 4.7 - Μέτρηση της διαμέτρου d: a) κατά την πλάγια όψη, b) κατά την κάτοψη και c) κατά την κάτοψη με ψηφιακό εξοπλισμό με διάμετρο ισοδύναμης επιφάνειας κυκλικού δίσκου. Πηγή: ISRM (2015).....	77
Εικόνα 4.8 - Μέτρηση της διαμέτρου πεπλατυσμένης επιφάνειας σε πλάγια όψη a) σε 90° , σε συμφωνία με τη γωνία της κωνικής αιχμής της ακίδας, b) σε λανθασμένη γωνία 85.90° . Πηγή: ISRM (2015).	77

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

Εικόνα 4.9 - Σχηματική απεικόνιση μετρήσεων σε πλάγια τομή για διάφορα προφίλ φθοράς. Πηγή: ISRM (2015).	78
Εικόνα 5.1 - Σχηματική απεικόνιση φθοράς με δημιουργία σωματιδίου ημισφαιρικού σχήματος σε ολίσθηση. Πηγή: Bhushan (2013).	86
Εικόνα 5.2 - Μοντέλα με βάση τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).	96
Εικόνα 5.3 - Μοντέλα με βάση τους δείκτες κατηγοριοποίησης του πετρώματος. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).	97
Εικόνα 6.1 - Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.	111
Εικόνα 6.2 - Παράδειγμα προγραμματισμού εξίσωσης μέσα στον κώδικα.	112
Εικόνα 6.3 - Αρχικό menu της εφαρμογής.	113
Εικόνα 6.4 - Μοντέλο Bruland.	114
Εικόνα 6.5 - Ειδοποίηση σφάλματος.	115
Εικόνα 6.6 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Bruland	115
Εικόνα 6.7 - Γράφημα μοντέλου Bruland	116
Εικόνα 6.8 - Μοντέλο Bieniawski.	117
Εικόνα 6.9 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Bieniawski.	117
Εικόνα 6.10 - Γράφημα μοντέλου Bieniawski.....	118
Εικόνα 6.11 - Μοντέλο Maidl.....	119
Εικόνα 6.12 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Maidl.	119
Εικόνα 6.13 - Γράφημα μοντέλου Maidl.....	120
Εικόνα 6.14 - Μοντέλο Gehring.	121
Εικόνα 6.15 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Gehring.....	121
Εικόνα 6.16 - Γράφημα μοντέλου Gehring	122
Εικόνα 6.17 - Μοντέλο Hassanpour.....	123
Εικόνα 6.18 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Hassanpour.	123
Εικόνα 6.19 - Γράφημα μοντέλου Hassanpour.....	124
Εικόνα 6.20 - Μοντέλο Johannessen.....	125
Εικόνα 6.21 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Johannessen.	125
Εικόνα 6.22 - Γράφημα μοντέλου Johannessen.....	126
Εικόνα 6.23 - Μοντέλο Plinninger (CAI).....	127
Εικόνα 6.24 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Plinninger (CAI).	127
Εικόνα 6.25 - Γράφημα μοντέλου Plinninger (CAI).....	128
Εικόνα 6.26 - Μοντέλο Plinninger (RAI).....	128
Εικόνα 6.27 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Plinninger (RAI).	129
Εικόνα 6.28 - Γράφημα μοντέλου Plinninger (RAI).....	129
Εικόνα 6.29 - Μοντέλο Sandvik.	130
Εικόνα 6.30 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Sandvik.....	131
Εικόνα 6.31 - Γράφημα μοντέλου Sandvik.	131

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 - Μηχανισμοί φθοράς στα μηχανήματα εξόρυξης. Τα μαυρισμένα κουτάκια υποδεικνύουν την κυρίαρχη διαδικασία φθοράς. Πηγή: Verhoef (1997), μεταφρασμένο από DIN 50 320 (1979).....	20
Πίνακας 2.2 - Δείκτες των βασικών χαρακτηριστικών στον υπολογισμό του RMR. Πηγή: Bieniawski (1989).....	26
Πίνακας 2.3 - Παραμετροποίηση του RMR και κατηγοριοποίηση του πετρώματος με βάση την τιμή του. Πηγή: Bieniawski (1989).....	26
Πίνακας 3.1 - Ανάλυση συμβολισμών στη μέτρηση σκληρότητας Rockwell. Στην αριστερή στήλη φαίνονται οι συμβολισμοί, στην κεντρική στήλη ο ορισμός τους, στη δεξιά στήλη οι μονάδες μέτρησής τους. Πηγή: ISO 6508-1: 2016.....	35
Πίνακας 3.2 - Κατηγορίες της κανονικής δοκιμής Rockwell. a: Το εύρος της HRC μπορεί να διευρυνθεί έως και HRC 10 αν η επιφάνεια του διεσδυτή λειανθεί για βάθος διεσδυσης τουλάχιστον 0.4 mm. Πηγή: ISO 6508-1: 2016.	37
Πίνακας 3.3 - Κατηγορίες της επιφανειακής δοκιμής Rockwell. Πηγή: ISO 6508-1: 2016.	37
Πίνακας 4.1 - Η σκληρότητα Vickers και Rosiwal των ορυκτών της κλίμακας Mohs. Πηγή: Deketh (1995).....	62
Πίνακας 4.2 - Παράδειγμα χαρακτηριστικών πετρώματος για τον υπολογισμό του συντελεστή φθοράς F του Schimazek. Πηγή: Verhoef (1997).....	66
Πίνακας 4.3 - Κατηγοριοποίηση της αποξεστικής ικανότητας των πετρωμάτων με βάση τον συντελεστή φθοράς F του Schimazek. Πηγή: Verhoef (1997).....	67
Πίνακας 4.4 - Κατηγοριοποίηση της ψαθυρότητας με βάση τον δείκτη S ₂₀ . Πηγή: Dahl et al. (2012).....	73
Πίνακας 4.5 - Κατηγοριοποίηση της σκληρότητας της επιφάνειας με βάση τον δείκτη SJ. Πηγή: Dahl et al. (2012).....	73
Πίνακας 4.6 - Κατηγοριοποίηση της φθοράς απόξεσης σε καρβίδιο του βολφραμίου με βάση τον δείκτη AV. Πηγή: Dahl et al. (2012).....	74
Πίνακας 4.7 - Κατηγοριοποίηση της φθοράς απόξεσης σε χάλυβα με βάση τον δείκτη AVS. Πηγή: Dahl et al. (2012)	74
Πίνακας 4.8 - Παράδειγμα καταγραφής μετρήσεων και υπολογισμού CAI. Πηγή: ISRM (2015).....	79
Πίνακας 4.9 - Κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων ως προς την αποξεστική τους ικανότητα κατά CAI. Πηγή: ISRM (2015).....	80
Πίνακας 5.1 - Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και από τους δείκτες κατηγοριοποίησης του πετρώματος. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).....	98
Πίνακας 5.2 - Παρουσίαση της στατιστικής ανάλυσης του μοντέλου δύο μεταβλητών του Hassanpour. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).....	98
Πίνακας 5.3 - Υπολογισμός του δείκτη RME. Πηγή: Bieniawski (2008).	103

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1 - Η διαδικασία της δοκιμής Rockwell. Πηγή: ISO 6508-1:2016.....	36
Διάγραμμα 4.1 - Σχέση του λόγου αντοχής δύο υλικών με την φθορά απόξεσης. Πηγή: Zum Gahr (1987).....	61
Διάγραμμα 4.2 - Η σκληρότητα Vickers για διάφορα υλικά εργαλείων εξόρυξης. Πηγή: Zum Gahr (1987).....	63
Διάγραμμα 4.3 - Προσεγγιστική πτώση της θλιπτικής αντοχής του WC-Co του οίκου Sandvik με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πηγή: Sandvik (nd).....	64
Διάγραμμα 5.1 - Γράφημα υπολογισμού της ζωής των κοπτικών άκρων με το μοντέλο Bruland (χωρίς διόρθωση συντελεστών). Πηγή: Bruland (1998).....	91
Διάγραμμα 5.2 - Παράμετρος k_p για τη διάμετρο της κεφαλής του TBM. Πηγή: Bruland (1998).....	92
Διάγραμμα 5.3 - Παράμετρος k_Q για το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία στο πέτρωμα. Πηγή: Bruland (1998).....	93
Διάγραμμα 5.4 - Σύγκριση υπολογισμένων με πραγματικές τιμές του μοντέλου δύο μεταβλητών του Hassanpour. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).....	99
Διάγραμμα 5.5 - Βοηθητικό γράφημα για τον χαρακτηρισμό των πετρωμάτων ως προς την ικανότητα απόξεσής τους σε ζώνες συνδυασμών τιμών UCS και VHNR. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).....	99
Διάγραμμα 5.6 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Gehring. Πηγή: Maidl (2008).	100
Διάγραμμα 5.7 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Maidl. Πηγή: Maidl (2008)..	101
Διάγραμμα 5.8 - Γράφημα εκτίμησης της φθοράς σε κοπτικά άκρα της Sandvik. Πηγή: Sandvik (2020).....	102
Διάγραμμα 5.9 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Bieniawski για $\sigma_{ci} > 45$ MPa. Πηγή: Bieniawski (2009).....	104
Διάγραμμα 5.10 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Bieniawski για $\sigma_{ci} < 45$ MPa. Πηγή: Bieniawski (2009).....	105
Διάγραμμα 5.11 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Plinninger με χρήση του δείκτη CAI. Πηγή: Plinninger et al. (2002).....	106
Διάγραμμα 5.12 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Plinninger με χρήση του δείκτη RAI. Πηγή: Plinninger et al. (2002).....	107
Διάγραμμα 5.13 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Johannessen. Πηγή: Plinninger et al. (2002).....	107

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Η φθορά των κοπτικών στις εξορύξεις με μηχανικά μέσα

Με την πρόοδο της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση μηχανικών μέσων στην εξόρυξη πετρωμάτων έχει αυξηθεί, καθιστώντας τη μελέτη της αναγκαία για τη βελτιστοποίησή της. Μια σημαντική κατεύθυνση που ερευνάται είναι η εκτίμηση και η μείωση της φθοράς που υφίστανται τα κοπτικά άκρα κατά τις εξορυκτικές διεργασίες. Με βάση τις αρχές της επιστήμης και τεχνολογίας των υλικών, γίνεται χρήση χαρακτηριστικών του πετρώματος και του υλικού των κοπτικών άκρων για την εκτίμηση της φθοράς, ενώ με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών, επιτυγχάνεται η μείωση της φθοράς με τη βελτίωση των ιδιοτήτων των κοπτικών ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εξόρυξης.

1.2. Στόχοι της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η φθορά (wear) που προκαλείται στα κοπτικά άκρα κατά τη μηχανική εξόρυξη πετρωμάτων. Η φθορά οφείλεται στο χαρακτηριστικό των πετρωμάτων που καλείται αποξεστικότητα (abrasivity/abrasiveness).

Στις εξορύξεις με μηχανικά μέσα, είναι αναπόφευκτη η φθορά των κοπτικών άκρων και είναι σημαντική η εκτίμησή της. Αν και κατά κανόνα ενεργούν περισσότεροι από ένας μηχανισμοί φθοράς σε ένα κοπτικό άκρο, η παρούσα εργασία εστιάζει στη φθορά λόγω της αποξεστικής ικανότητας που έχει ένα πέτρωμα. Από τις κυριότερες δοκιμές για τον προσδιορισμό της αποξεστικότητας ενός πετρώματος είναι η δοκιμή CERCHAR, μια ιδιαίτερα απλή και αξιόπιστη δοκιμή που γνωρίζει μεγάλη αποδοχή και διάδοση, και οι Νορβηγικές δοκιμές NTNU/SINTEF, οι οποίες βασίζονται σε ένα μεγάλο αρχείο δεδομένων από πλήθος μετρήσεων για σύγκριση και ταξινόμηση των πετρωμάτων.

Για την εκτίμηση της φθοράς απόξεσης, λαμβάνονται υπόψη τόσο χαρακτηριστικά του πετρώματος, όσο και χαρακτηριστικά του υλικού του κοπτικού άκρου. Στα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα που παρουσιάζονται στην εργασία, η εκτίμηση της φθοράς γίνεται με χρήση τιμών σκληρότητας και αντοχής του πετρώματος.

Στόχοι της εργασίας είναι η καταγραφή των υπάρχοντων μοντέλων εκτίμησης της φθοράς απόξεσης, η ανάλυση όλων των χαρακτηριστικών που απαιτούνται για τη χρησιμοποίηση των μοντέλων αυτών και η παρουσίαση μιας ηλεκτρονικής εφαρμογής που αναπτύχθηκε για την εύκολη και γρήγορη χρήση των μοντέλων.

1.3. Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια:

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την Εισαγωγή, παρουσιάζοντας το κεντρικό θέμα και τους στόχους της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρεται η τριβολογία ως επιστημονικό αντικείμενο και παρουσιάζονται οι μηχανισμοί φθοράς. Αναπτύσσεται το πρόβλημα της μελέτης ενός έργου με αρχική προσέγγιση το χαρακτηρισμό του πετρώματος με χρήση του δείκτη κερματισμού του και του συστήματος ταξινόμησης Rock Mass Rating.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι δοκιμές σκληρότητας και οι δοκιμές αντοχής που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται η ιδιότητα της απόξεσης σε σχέση με τη σκληρότητα, οι δοκιμές αντίστασης στην απόξεση και η φθορά που προκαλούν τα πετρώματα λόγω της αποξεστικότητάς τους. Αναφέρεται η σημαντικότητα της σκληρότητας του υλικού των κοπτικών άκρων, καθώς και η κατεύθυνση στη χρήση προηγμένων κεραμικών, όπως είναι το καρβίδιο του βολφραμίου. Τέλος, αναλύονται οι δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της αποξεστικότητας ενός πετρώματος.

Στο Κεφάλαιο 5 καταγράφονται από τη βιβλιογραφία τα υπάρχοντα μοντέλα εκτίμησης της φθοράς απόξεσης, τόσο θεωρητικών όσο και εμπειρικών.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας κάνοντας αναφορά στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Η εφαρμογή έχει ως μοναδικό στόχο τη διευκόλυνση ενός μηχανικού που επιχειρεί να εκτιμήσει την αναμενόμενη φθορά κοπτικών με βάση μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά του πετρώματος που έχει στη διάθεσή του.

Το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο είναι τα Συμπεράσματα, όπου αναφέρονται οι σημαντικότερες πληροφορίες που παρουσιάστηκαν στην εργασία.

Κεφάλαιο 2: Η φθορά των κοπτικών άκρων

2.1. Ιστορική αναδρομή

Από την αρχή του ανθρώπινου είδους, υπήρξε η ανάγκη εξόρυξης πετρωμάτων για την κατασκευή εργαλείων. Η εξέλιξη της τεχνολογίας κατέστησε απαραίτητη την ανάπτυξη των μεθόδων εξόρυξης, αν και για πολλά χρόνια μετά την εποχή του σιδήρου φάνηκε να μένει σε σταθερό επίπεδο, δεδομένου ότι η εξόρυξη γινόταν χειρωνακτικά από τους μεταλλωρύχους. Με μια σύντομη ματιά στο παρελθόν, η εξόρυξη γινόταν για χιλιετίες αποκλειστικά με κοπτικά εργαλεία, όπως αξίνες, με μια από τις πρώτες αναφορές σε διαφορετική μέθοδο να είναι κάπου στα μέσα του 16^{ου} αιώνα, όπου σημειώνεται η χρήση πυράς για τη θραύση πετρωμάτων υψηλής αντοχής, όπου τα σκαπτικά εργαλεία δεν μπορούσαν να ανταπεξέλθουν (Hoover and Hoover, 1912 μεταφρασμένο από Agricola, 1556). Παρά τη λογική χρήσης της πυράς, σημειώνεται ότι στην πράξη ήταν μια σύνθετη διαδικασία. Έτσι, η χειρωνακτική μέθοδος εξόρυξης συνεχίστηκε να είναι η πρωταρχική μέχρι την εμφάνιση της πυρίτιδας και της χρήσης της στις εξορυκτικές διεργασίες. Μετά την εμφάνισή της, η χρήση της πυρίτιδας ως μέθοδος εξόρυξης εξαπλώθηκε ραγδαία σε πολλές εκσκαφές ανά την Ευρώπη στις αρχές του 17ου αιώνα. Το διάτρημα γινόταν με χρήση διαφόρων εργαλείων, όπως αυτά που φαίνονται στην Εικόνα 2.1, και στη συνέχεια γινόταν πλήρωση με πυρίτιδα (Barnatt et al., 1997, Vergani, 2009 μεταφρασμένο από Vergani, 2002).



Εικόνα 2.1 - Εργαλεία για εξόρυξη με εκρηκτικές ύλες. Τα υπ' αριθμόν XIII, XV και XVI είναι είδη εργαλείων διάτρησης με κρούση από σφυρί (VIII) ή σφύρα (VIII). Πηγή: M.A. della Fratta et Montalbano, *Practica minerale*, Bologna (1678), reproduced in Vergani (2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

Η δυναμίτιδα εφευρέθηκε το 1867 (Nobel, 1868) και η διατρητική σφύρα στα τέλη του 19ου αιώνα (Drinker, 1882). Ο συνδυασμός αυτών των δύο έγινε η προτιμητέα επιλογή εξόρυξης σε υπόγεια έργα σκληρών πετρωμάτων.

Στους άνθρακες, η εξέλιξη ήταν λίγο διαφορετική. Οι άνθρακες σε αρκετές περιπτώσεις έχουν αρκετά χαμηλή αντοχή ώστε ακόμα να μπορούν να εξορυχτούν ικανοποιητικά χρησιμοποιώντας αξίνες. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν λεπτά στρώματα ανθράκων, όπως αυτά κοντά στο Durham της Αγγλίας, όπου το ύψος των εξορύξεων ήταν χαμηλό, οι χειρωνακτικές εξορύξεις συνέχισαν μέχρι την εμφάνιση των διατρητικών (Trist et al., 1964). Σε περιπτώσεις ανθράκων και πετρωμάτων υψηλής αντοχής γινόταν χρήση εκρηκτικών, όπου ήταν αναγκαίο, όμως γενικά δεν ήταν προτιμητέα εφόσον οι εκρηκτικές ύλες είχαν υψηλό κόστος αγοράς και ο χειρισμός τους μπορούσε να γίνει μόνο από εξειδικευμένο προσωπικό.

Η εξόρυξη με εργαλεία χειρός στο Ηνωμένο Βασίλειο συνεχίστηκε σε ανθρακωρυχεία μέχρι και μέσα στον 20ο αιώνα. Άλλωστε, σε περιπτώσεις όπου μπορεί να γίνει εξόρυξη με χειρωνακτικό τρόπο θεωρείται πως ο τρόπος αυτός είναι ο λιγότερο ενεργοβόρος χάρη στην ανθρώπινη ικανότητα να αναγνωρίζει αδυναμίες στα πετρώματα και να τις εκμεταλλεύεται με ευελιξία (Roxborough et al., 1981).

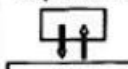
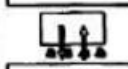
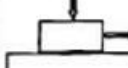


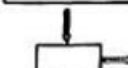
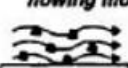
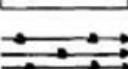
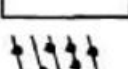
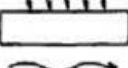
Παρά την εμφάνιση και την ανάπτυξη των μεθόδων εξόρυξης με εκρηκτικές ύλες, δεν σταμάτησε η ανάπτυξη στις μηχανικές μεθόδους. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών και των μηχανολογικών μέσων και σε συνδυασμό με τις συλλογικές εμπειρίες των μηχανικών μεταλλείων, των γεωτεχνολόγων και των επιστημόνων σε παρεμφερείς τομείς, τα μηχανικά μέσα μπορούν να προτιμώνται από τη χρήση εκρηκτικών υλών ακόμα και σε πετρώματα υψηλής αντοχής. Συνεπώς, για την αξιοποίηση των κοπτικών εργαλείων είναι φανερό ότι λαμβάνονται υπόψη αρκετά βασικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, όπως αντοχή σε θλίψη, ψαθυρότητα, ασυνέχειες, υγρασία κ.α., όμως η κατεύθυνση μελέτης των τελευταίων δεκαετιών επικεντρώνεται ταυτόχρονα στα χαρακτηριστικά της κοπτικής κεφαλής που έρχεται σε επαφή με το πέτρωμα, όπως σκληρότητα, αντοχή σε εφελκυσμό, πλαστική παραμόρφωση σε αυξημένες θερμοκρασίες κ.α..

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για ένα έργο, και για οικονομικούς λόγους αλλά και για τη διεκπεραίωση του ίδιου του έργου, είναι η φθορά των εργαλείων κατά τη χρήση τους. Υπάρχουν πολλά είδη φθοράς, όμως υπάρχει μια γενική παραδοχή πως οι περισσότερες απώλειες οφείλονται στη φθορά απόξεσης (abrasion), δηλαδή στην ιδιότητα του πετρώματος να φθείρει το κοπτικό μέσο στα σημεία επαφής εξαιτίας της σχετικά μεγαλύτερης σκληρότητάς του. Η επιστήμη που ασχολείται με τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο επαφής δύο ή περισσότερων υλικών είναι η τριβολογία. Τριβολογία είναι η επιστήμη και η τεχνολογία επιφανειών που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με σχετική κίνηση. Η τριβολογία περιλαμβάνει την επιστημονική έρευνα όλων των ειδών τριβής, λίπανσης και διάβρωσης, καθώς επίσης και την τεχνολογική εφαρμογή της συσσωρευμένης αυτής γνώσης.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

2.2. Μηχανισμοί φθοράς

Η φθορά των κοπτικών μέσων είναι ένα περίπλοκο αντικείμενο μελέτης και, παρά τις έρευνες που έχουν γίνει μέσα στα χρόνια, οι γνώσεις αυτές χρειάζονται εμπειρία για να εφαρμοστούν στην πράξη, δεδομένου ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση ενός έργου είναι πολλοί και ποικίλοι. Οι μηχανισμοί φθοράς των μηχανημάτων κατά τη λειτουργία τους συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

PROCESS	MECHANISM				WEAR TYPE
	adhesion	abrasion	surface fatigue	tribo-chem. reaction	
<p>Impact motion</p>  <p><i>solid - solid</i></p>  <p><i>solid - particle - solid</i></p>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<p><i>cracks, dimples (surface fatigue)</i></p>
<p>sliding motion</p>  <p><i>solid - solid</i></p>  <p><i>solid - particle</i></p>  <p><i>solid - particle</i></p>  <p><i>solid - particle - solid</i></p>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 2 body <input checked="" type="checkbox"/> 2 body <input checked="" type="checkbox"/> 2 body <input checked="" type="checkbox"/> 3 body	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<p><i>pits, hills, scaling, material transfer (adhesion); reaction products (trib.chem.reaction)</i></p> <p><i>parallel oriented scratches, grooves (abrasion)</i></p> <p><i>Irregular scratches, grooves, pits and hills (abrasion)</i></p>
<p>flowing motion</p>  <p><i>fluid with particles</i></p>  <p><i>gas with particles</i></p>  <p><i>fluid- or gas with particles</i></p>  <p><i>fluid-solid</i></p>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<p><i>parallel or irregular scratches, grooves, pits and hills (abrasion)</i></p> <p><i>cracks, dimples (surface fatigue)</i></p> <p><i>cavitation erosion: cracks, dimples (surface fatigue)</i></p>

Πίνακας 2.1 - Μηχανισμοί φθοράς στα μηχανήματα εξόρυξης. Τα μαυρισμένα κουτάκια υποδεικνύουν την κυρίαρχη διαδικασία φθοράς. Πηγή: Verhoef (1997), μεταφρασμένο από DIN 50 320 (1979).

Από παρατηρήσεις μηχανικών και από ερευνητικές εργασίες στα κοπτικά εργαλεία βυθοκόρων, έχουν αντιστοιχηθεί κάποιοι μηχανισμοί φθοράς με τους συνήθεις λόγους εμφάνισής τους:

- Αυλακώσεις (παρατηρούνται στα κοπτικά άκρα σε δύσκαμπτες, πηλώδεις άμμους, πλούσιες σε χαλαζία): υψηλού επιπέδου φθορά απόξεσης δύο σωμάτων.
- Άτακτες βαθιές χαραγές: υψηλού επιπέδου φθορά απόξεσης τριών σωμάτων.
- Λείανση επιφάνειας, ορατές χαραγές: χαμηλού επιπέδου φθορά απόξεσης, επιφανειακή κόπωση.
- Πλαστική παραμόρφωση της επιφάνειας, μερικές φορές συνοδευόμενη από ορατή αύξηση της θερμοκρασίας (πυράκτωση των άκρων): φθορά απόξεσης σε συνδυασμό με απολέπιση.
- Ανάπτυξη ρωγμών στην επιφάνεια φθοράς: επιφανειακή κόπωση (παρατηρείται στα άκρα όταν κόβουν ασβεστόλιθο, χωρίς εμφάνιση σκληρών ενώσεων).

Δύο κύρια είδη φθοράς είναι η φθορά απόξεσης (abrasion wear), όπως αναφέρθηκε, και η φθορά προσκόλλησης (adhesive wear). Η φθορά απόξεσης είναι η απώλεια μάζας λόγω της τριβής και της διαφοράς τραχύτητας και σκληρότητας ανάμεσα στα σώματα σε επαφή και οφείλεται στην παρουσία σκληρών, αποξεστικών σωματιδίων ανάμεσα στα σώματα επαφής, εντός της επιφάνειας τουλάχιστον ενός εκ των δύο σωμάτων ή στην παρουσία σκληρών εξογκωμάτων πάνω σε μία τουλάχιστον επιφάνεια. Η φθορά προσκόλλησης προκαλείται από τον σχηματισμό και τη θραύση δεσμών. Η θραύση γίνεται λόγω παρουσίας ανωμαλιών στην επιφάνεια, δηλαδή την τραχύτητα της επιφάνειας (Verhoef, 1997).

2.3. Αξιολόγηση του προβλήματος

Για τη μελέτη ενός έργου πρέπει, αρχικά, να επιλεγεί ένα σχέδιο εξόρυξης, ώστε να υπάρξει η οικονομική εκτίμηση του έργου, καθώς και το σχέδιο προχώρησης. Το πρόβλημα, σύμφωνα με τον Verhoef (1997), εξετάζεται από δύο όψεις, αφενός τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και αφετέρου τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος κοπής.

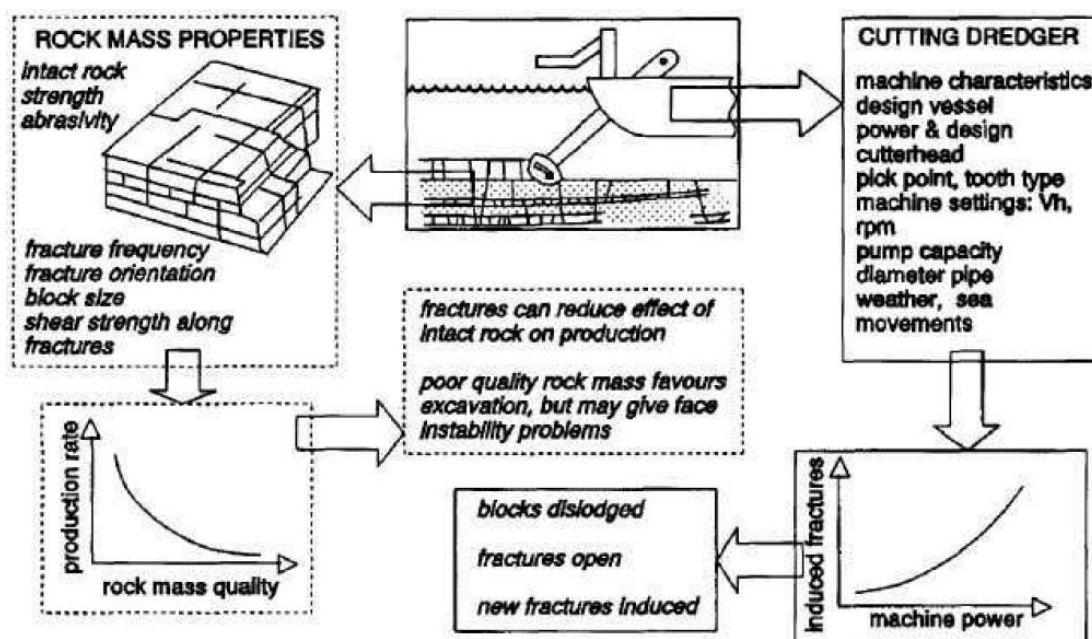
- Ως βασικότερα χαρακτηριστικά του πετρώματος θεωρούνται η αντοχή του συμπαγούς πετρώματος, η αποξεστική του ικανότητα, ο κερματισμός της

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

βραχώμαζας, η διεύθυνση των ασυνεχειών, το μέγεθος των *in-situ* μπλοκ πετρώματος και η διατμητική αντοχή στην επιφάνεια των ασυνεχειών. Γενικά, η παραγωγικότητα της εργασίας είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποιότητας/συνοχής του πετρώματος, όμως στην περίπτωση χαμηλής ποιότητας πετρώματος υπάρχουν πιθανά προβλήματα αστάθειας στο μέτωπο της εξόρυξης.

- Ως βασικότερα χαρακτηριστικά των μηχανημάτων σημειώνονται ο σχεδιασμός του μηχανήματος, ο σχεδιασμός και η ισχύς της κοπτικής κεφαλής, το είδος και η τοποθέτηση των κοπτικών άκρων. Στη συνέχεια, υπολογίζονται η ταχύτητα προχώρησης καθώς και η ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής. Στη μελέτη του, ο Verhoef, δεδομένου ότι αναφέρεται σε βυθοκόρους και σε εκσκαφές σε υδάτινο περιβάλλον, σημειώνει κι άλλες παραμέτρους όπως είναι η δυνατότητα άντλησης, η διάμετρος των σωληνώσεων (κυρίως της ρόφησης) και λαμβάνονται υπόψη οι καιρικές συνθήκες και οι κινήσεις της θάλασσας. Όπως είναι λογικό, ο θρυμματισμός των πετρωμάτων είναι ανάλογος, συνήθως μη γραμμικά, της ισχύος των μηχανημάτων, αυξάνοντας την παραγωγικότητα.

Στην Εικόνα 2.2 φαίνονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε πρόβλημα με βυθοκόρους, όμως οι γενικές αρχές του αφορούν σε οποιοδήποτε πρόβλημα εξόρυξης.



Εικόνα 2.2 - Συσχετίσεις κατά την εξόρυξη με βυθοκόρο. Πηγή: Verhoef (1997).

2.4. Χαρακτηρισμός του πετρώματος

Η προετοιμασία για την εξόρυξη ενός πετρώματος ξεκινάει από το ίδιο το πέτρωμα. Υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά που μελετά ένας μηχανικός προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα και να εκτιμήσει την αναμενόμενη κατανάλωση αναλωσίμων. Στη συνέχεια αναφέρονται χαρακτηριστικά που λαμβάνει υπόψη ο μηχανικός, καθώς και κάποιοι τρόποι αξιοποίησής τους, όπως η κατάταξή τους σε κάποιο κατάλληλο σύστημα σύγκρισης ή ταξινόμησης.

Για το χαρακτηρισμό των γεωλογικών σχηματισμών συλλέγονται οι εξής πληροφορίες:

1. Για την περιγραφή του υλικού: χρώμα, μορφολογία συστατικών, μέγεθος των κόκκων, σημαντικά (προς αναφορά) ορυκτά, είδος/οικογένεια του πετρώματος, ψαθυρότητα, μηχανική αντοχή, αποξεστική ικανότητα, βαθμός διάβρωσης.
2. Για την περιγραφή της βραχόμαζας: πάχος στρώματος, μέγεθος block πετρώματος, σχήμα του block, πλήθος και χαρακτηρισμός των ασυνεχειών.

Για την ταξινόμηση μιας βραχόμαζας χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα, όπως το Rock Mass Rating (RMR), ανεπτυγμένο από τον Bieniawski (1979, από Bieniawski, 1989) και το σύστημα Q, ανεπτυγμένο από τον Barton (1974). Αρχικά τα συστήματα ταξινόμησης αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο της σταθερότητας υπόγειων ανοιγμάτων, όμως στη συνέχεια βρήκαν χρήση και σε άλλους τομείς, όπως υπολογισμός παραμόρφωσης θεμελίων ή εκτίμηση πιθανότητας κατολίσθησης. Επίσης, βρήκαν εφαρμογή και στις εξορυκτικές διεργασίες, λαμβάνοντας υπόψη κάποιες παραμετροποιήσεις.

Το RMR προτάθηκε το 1974 και αναθεωρήθηκε το 1979. Από μια βάση δεδομένων που συσσωρεύτηκαν από εμπειρία και πειραματικές μελέτες, το πέτρωμα στο RMR εξετάζεται με βάση:

- Την αντοχή του συμπαγούς πετρώματος.
- Τον κερματισμό (Rock Quality Designation), την πυκνότητα των ασυνεχειών και την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της επικρατούσας ομάδας.
- Τα χαρακτηριστικά των επιφανειών των ασυνεχειών.
- Την υγρασία και την υδροπερατότητά του.

Οι Fowell and Johnson (1991) έδωσαν παραμέτρους προσαρμογής ανάλογα με το είδος της εκσκαφής που εξετάζεται. Σημειώνεται ότι στα συστήματα ταξινόμησης

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

εξετάζεται η μηχανική αντοχή των πετρωμάτων και όχι όλοι οι δείκτες φθοράς, όπως είναι η αποξεστική ικανότητα του πετρώματος. Έτσι, τα συστήματα χρησιμοποιούνται επικουρικά, ιδιαίτερα για τον υπολογισμό της απαραίτητης ισχύος που απαιτείται για μια διεργασία.

Δύο χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στη μελέτη της εξόρυξης ενός πετρώματος είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Unconfined Compressive Strength - UCS) και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength - TS). Η UCS είναι η μέγιστη αξονική θλιπτική τάση που μπορεί να αντέξει ένα δείγμα σε σχήμα κανονικού κυλίνδρου χωρίς πλευρικό περιορισμό. Η TS είναι η αντοχή ενός υλικού σε εφελκυσμό μέχρι την τελική του αστοχία. Για τον υπολογισμό της TS υπάρχει η άμεση μέτρηση της, όμως δεν προτιμάται λόγω της δυσκολίας προετοιμασίας των δειγμάτων και η ανάγκη συγκεκριμένου τρόπου αστοχίας για να είναι αποδεκτή η τιμή της, πράγμα ιδιαίτερος δύσκολο σε μη μεταλλικά υλικά. Αντ' αυτού, η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τον υπολογισμό της TS είναι η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Tensile Strength - BTS), όπου χάρη στη γεωμετρία του σχήματος και το επιβαλλόμενο φορτίο μπορεί να υπολογιστεί μια τιμή αντοχής σε εφελκυσμό εμμέσως. Η δοκιμή αυτή γίνεται με την άσκηση αξονικής τάσης διαμετρικά σε δοκίμιο μορφής δίσκου μέχρι την τελική του διαμετρική αστοχία και στη συνέχεια υπολογίζεται η BTS με τη χρήση σχέσεων από τη θεωρία ελαστικότητας. Η BTS συνήθως έχει μικρές διαφορές με την TS και χρησιμοποιείται ευρέως ως χαρακτηριστικό των πετρωμάτων με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τέλος, συνδυάζοντας αυτά τα δύο, ο λόγος της αντοχής σε θλίψη προς την αντοχή σε εφελκυσμό δίνει ένα μέτρο της ιδιότητας των υλικών να παρουσιάζουν παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται ψαθυρότητα. Ένας γνώμονας για την κατηγοριοποίηση ενός υλικού με βάση την ψαθυρότητα είναι:

- Ψαθυρότητα < 9: Εύπλαστο υλικό
- Ψαθυρότητα 9-15: Ενδιάμεσο υλικό
- Ψαθυρότητα >15: Ψαθυρό υλικό

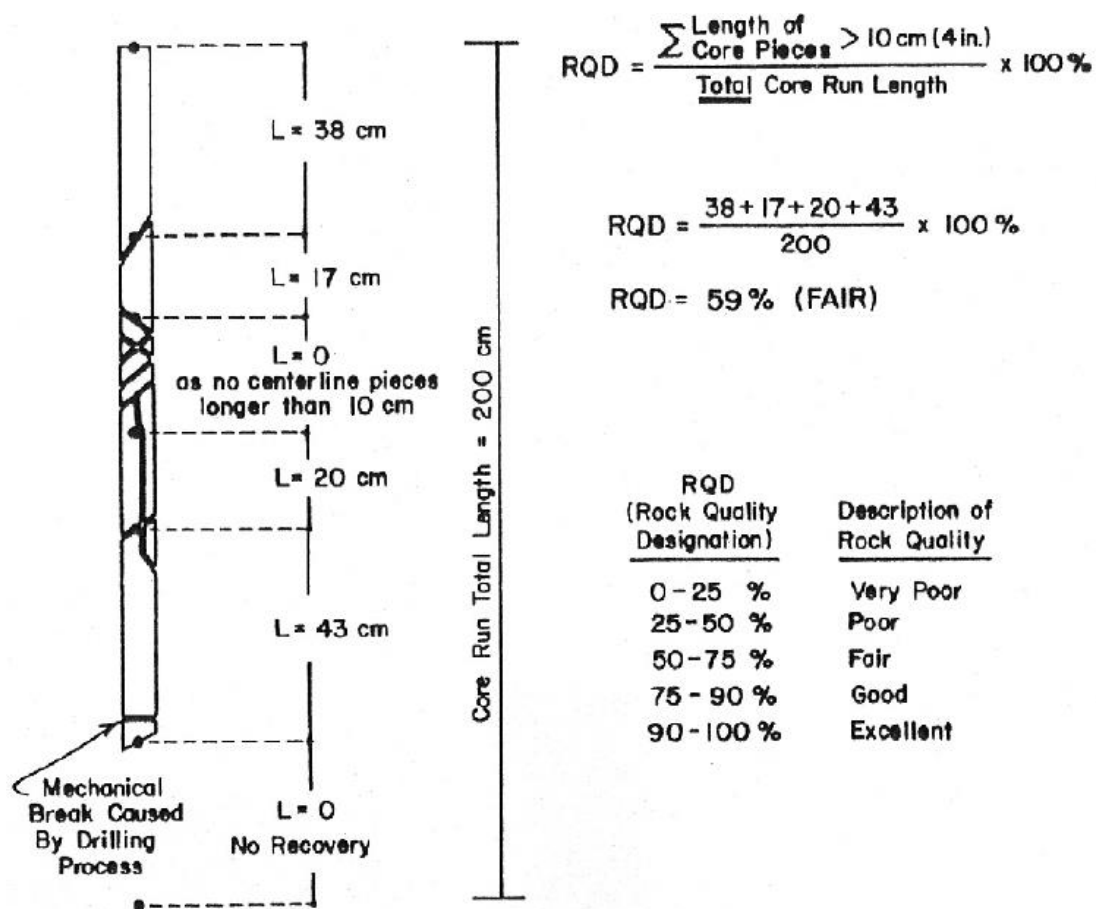
2.5. Χαρακτηρισμός του πετρώματος με χρήση του δείκτη RQD και του συστήματος RMR

Για τον χαρακτηρισμό ενός πετρώματος, στη θεωρία απαιτείται κυρίως η ορυκτολογική σύστασή του. Στην πράξη, όμως, υπάρχουν πολλές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το σχεδιασμό και την περάτωση ενός έργου. Μια από τις παραμέτρους που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της μεταλλευτικής είναι ο δείκτης προσδιορισμού της ποιότητας του πετρώματος (Rock Quality Designation index - RQD) (Deere and Deere, 1988). Ο RQD προσδιορίζεται σε δείγμα του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

πετρώματος και είναι μέτρο του κερματισμού του. Είναι διαδομένος για την απλότητα και την ευκολία της διαδικασίας προσδιορισμού του.

Για τον προσδιορισμό του RQD χρειάζεται ένα δείγμα από πυρήνα γεώτρησης δειγματοληψίας («καρότο») του πετρώματος με διάμετρο, προτεινόμενη κατά την International Society of Rock Mechanics (ISRM), ίση με 54 mm (NX). Το συνολικό μήκος του δείγματος συνήθως είναι από 1 έως 3 m. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το μήκος των συμπαγών τεμαχίων του δείγματος με μήκος τουλάχιστον 10 cm. Ο RQD ισούται με τον λόγο του αθροίσματος των μηκών των επιμέρους τεμαχίων προς το συνολικό μήκος του δείγματος. Ανάλογα με την τιμή του ποσοστού RQD το πέτρωμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως προς την ποιότητά του. Στο Εικόνα 2.3 φαίνεται η απεικόνιση της διαδικασίας, μαζί με την κατηγοριοποίηση της ποιότητας του πετρώματος ως προς τους Deere and Deere (1988).



Εικόνα 2.3 - Παράδειγμα μέτρησης RQD. Πηγή: Deere and Deere (1988).

Ένας εύκολος οδηγός για την αξιοποίηση χαρακτηριστικών του πετρώματος δίνεται στον Πίνακα 2.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Η ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

Parameter		Ranges of Values							
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	For this low range, uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial compressive strength (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core quality RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered wall	Slickensided-surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (L/min)	None	<10	10-25	25-125	>125		
		Joint water pressure Ratio Major principal stress	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		

Πίνακας 2.2 - Δείκτες των βασικών χαρακτηριστικών στον υπολογισμό του RMR. Πηγή: Bieniawski (1989).

Με την πρόσθεση των τιμών της κάθε κατηγορίας εξάγεται η αρχική τιμή του RMR με μέγιστο αριθμό το 100 (15 + 20 + 20 + 30 + 15). Η κατεύθυνση των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται με βάση το ποιοτικό κριτήριο της παρατήρησης, ανάλογα αν η κατεύθυνση είναι ευνοϊκή ή δυσμενής για το έργο, και εξαρτάται από την κρίση του αρμόδιου εμπειρογνώμονα. Στην περίπτωση που η κατεύθυνση είναι απολύτως ευνοϊκή, δεν επηρεάζεται το RMR, ειδάλλως μειώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3.

Strike and Dip Orientations of Discontinuities	Very Favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable
Tunnels and mines	0	-2	-5	-10	-12
Foundations	0	-2	-7	-15	-25
Slopes	0	-5	-25	-50	-60

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Class no.	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

D. MEANING OF ROCK MASS CLASSES

Class no.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 yr for 15-m span	1 yr for 10-m span	1 wk for 5-m span	10 h for 2.5-m span	30 min for 1-m span
Cohesion of the rock mass (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Friction angle of the rock mass (deg)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Πίνακας 2.3 - Παραμετροποίηση του RMR και κατηγοριοποίηση του πετρώματος με βάση την τιμή του. Πηγή: Bieniawski (1989).

Τέλος, με την τελική τιμή του RMR, το πέτρωμα κατατάσσεται σε κατηγορίες από I έως V με χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω σε άλλες μετρήσεις, όπως ο χρόνος που αντέχει το πέτρωμα μετά από εκσκαφή χωρίς υποστύλωση μέχρι να αστοχήσει (stand-up time).

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

Κεφάλαιο 3: Σκληρότητα και αντοχή του πετρώματος

3.1. Σκληρότητα

Η σκληρότητα είναι μια προσέγγιση της σχετικής συμπεριφοράς ενός υλικού και όχι μια θεμελιώδης ιδιότητα του. Οι δοκιμές που χρησιμοποιούνται ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: δοκιμές με διείδυση (Brinell, Knoop, Vickers, Rosiwal, Rockwell), δοκιμές με αναπήδηση ή δυναμικές δοκιμές (Shore, Schmidt) και δοκιμές χάραξης (Mohs, CERCHAR)

3.1.1. Δοκιμή χάραξης κατά Mohs

Η πιο γνωστή κλίμακα μέτρησης της σκληρότητας είναι αυτή του Mohs (Mohs, 1995). Η δοκιμή αυτή παρουσιάζει τη σκληρότητα συγκριτικά μεταξύ δέκα αντιπροσωπευτικών ορυκτών. Έτσι, δεν ενδείκνυται η χρήση της σε μαθηματικά μοντέλα, εφόσον δεν υπάρχει η αριθμητική καταγραφή κάποιας τιμής του ορυκτού. Επίσης, η κλίμακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τη συγκριτική κατάταξη ορυκτών και όχι πετρωμάτων ή άλλων υλικών. Παρόλα αυτά, η χρήση της κλίμακας από κάποιον με εμπειρία στον τομέα των υλικών είναι πολύ βοηθητική για μια μακροσκοπική προσέγγιση της σκληρότητας ή και της κατηγορίας ενός πετρώματος.

Η δοκιμή βασίζεται στην αρχή ότι ένα σκληρό σώμα χαράσσει ένα μαλακό σώμα. Η κλίμακα έχει ακέραιες τιμές από 1 έως 10, με τα ορυκτά σε κάθε τιμή να είναι τα εξής:

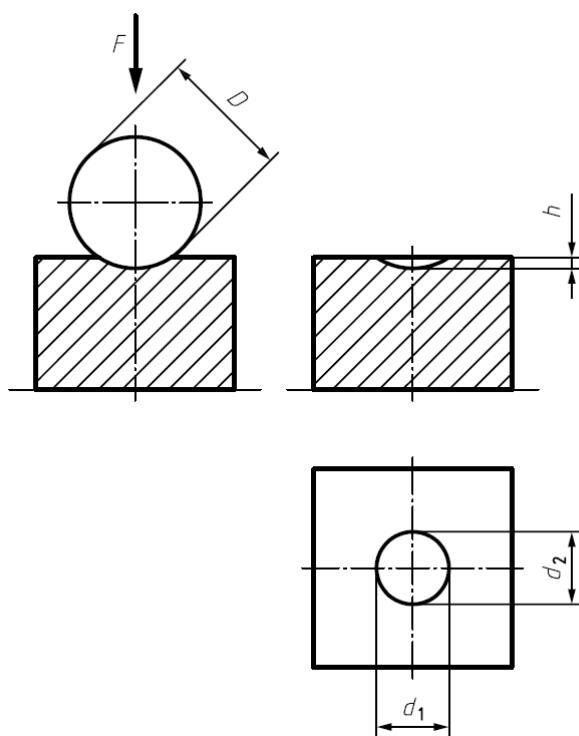
1. Τάλκης
2. Γύψος
3. Ασβεστίτης
4. Φθορίτης
5. Απατίτης
6. Ορθόκλαστο (Άστριοι)
7. Χαλαζίας
8. Τοπάζιο
9. Κορούνδιο
10. Διαμάντι

Το κάθε υλικό υψηλότερης θέσης μπορεί να χαράξει κάθε υλικό χαμηλότερης θέσης, χωρίς να μπορεί να ισχύσει το αντίθετο. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα, το αλουμίνιο που έχει σκληρότητα περίπου 2.5 στην κλίμακα μπορεί να χαράξει τη γύψο αλλά όχι τον ασβεστίτη. Εναλλακτικά, μπορεί να εξεταστεί ένα υλικό με βάση ποιο ορυκτό της λίστας χαράσσει και ποιο όχι και να γίνει η κατανομή της σκληρότητάς του στην κλίμακα ανάμεσα στα δύο ορυκτά.

Η ταξινόμηση της κλίμακας δεν είναι βαθμονομημένη γραμμικά, οπότε και δεν προσφέρει μαθηματικό ενδιαφέρον. Παρόλα αυτά, η κλίμακα μπορεί να είναι χρησιμοποιηθεί ως ένας ποιοτικός δείκτης φθοράς από την άποψη ότι η χάραξη υποδεικνύει την αποξεστική ικανότητα ενός υλικού. Πράγματι, με δοκιμές που αναφέρονται σε επόμενες παραγράφους, έχει υπάρξει μια συσχέτιση της αποξεστικής ικανότητας των ορυκτών και της θέσης τους στην κλίμακα Mohs. Έτσι, ο χαλαζίας και τα ορυκτά που κατατάσσονται υψηλά στη λίστα συνήθως δείχνουν να έχουν επίπτωση στο μέγεθος της φθοράς στα κοπτικά εργαλεία από χάλυβα, δεδομένου ότι η σκληρότητα των χαλύβων συνήθως παίρνει τιμές από 4 έως 6 στην κλίμακα, ανάλογα με τη σύστασή τους. Παρά τη μακροσκοπική χρησιμότητά της, η χρήση της κλίμακας δεν είναι ουσιώδης σε αντίθεση με τις μετρήσεις των υπόλοιπων δοκιμών.

3.1.2. Μέτρηση της σκληρότητας κατά Brinell

Η μέτρηση σκληρότητας κατά Brinell (ISO 6506-1:2014) γίνεται με την πίεση ενός συνθετικού άκρου από καρβίδιο του βολφραμίου σε σφαιρικό σχήμα πάνω στην επιφάνεια ενός δείγματος του υλικού για το οποίο ζητείται η σκληρότητα. Μετά από συγκεκριμένο χρόνο, μελετάται το καμπυλωτό αποτύπωμα της σφαίρας πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 3.1, και υπολογίζεται η σκληρότητα Brinell.



Εικόνα 3.1 - Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης Brinell. Πηγή: ISO 6506-1:2014.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Για την εύρεση της σκληρότητας, ενδιαφέρουν τα εξής μεγέθη:

D: η διάμετρος της σφαίρας σε mm

F: η ασκούμενη δύναμη σε N

d₁, d₂: οι διάμετροι του αποτυπώματος σε διαφορά γωνίας 90° σε mm

d: ο μέσος όρος των διαμέτρων του αποτυπώματος σε mm

h: το βάθος της εσοχής σε mm

BH ή HBW: η σκληρότητα Brinell του δείγματος

0.102(F/D²): ο δείκτης δύναμης-διαμέτρου.

Το βάθος h υπολογίζεται από τη σχέση (3.1).

$$h = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right) \quad (3.1)$$

Η σκληρότητα HBW υπολογίζεται από τη σχέση (3.2).

$$HBW = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)} \quad (3.2)$$

Σημειώνεται πως αν η δύναμη δίνεται σε kgf θα πρέπει να γίνει η ανάλογη μετατροπή από kgf σε N, δηλαδή 1 kgf ≈ 9.80665 N.

Ο εξοπλισμός για τη διεξαγωγή της δοκιμής πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να ασκηθεί σταθερή δύναμη από 9.807 N έως 29.42 kN (1 kgf έως 3000 kgf). Η επιφάνεια του δείγματος πρέπει να είναι καθαρή, επίπεδη και λειασμένη για τη σωστή δημιουργία και μέτρηση του αποτυπώματος. Το πάχος του δείγματος πρέπει να είναι ίσο με τουλάχιστον οκτώ φορές το βάθος του αποτυπώματος, δηλαδή $t \geq 8h$. Σε περίπτωση που υπάρχουν παραμορφώσεις στο πίσω μέρος του δείγματος υποδεικνύεται πως το δείγμα δεν έχει επαρκές πάχος. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται από 10 °C έως 35 °C, με προτεινόμενο εύρος στους 23 °C ± 5 °C για χαμηλότερη πιθανότητα απόκλισης των αποτελεσμάτων. Πριν τη δοκιμή, ο εξοπλισμός εξετάζεται αν είναι σε καλή κατάσταση ώστε να λειτουργήσει σωστά. Η δύναμη F επιλέγεται έτσι ώστε η διάμετρος d του αποτυπώματος να είναι μεταξύ 0.24D και 0.6D, ειδάλως πρέπει να σημειώνεται ο λόγος d/D. Προτιμάται να επιλέγεται η μεγαλύτερη δυνατή διάμετρος D της σφαίρας ώστε το αποτέλεσμα της δοκιμής να αφορά σε όσο δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια του δείγματος.

Για τη δοκιμή, η σφαίρα πιέζεται κάθετα στην επιφάνεια του δείγματος. Η δύναμη αυξάνει γραμμικά μέχρι την επιθυμητή τιμή μέσα σε 2 έως 8 s, τυπική διάρκεια είναι ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

τα 7 s. Όταν φτάσει στην επιθυμητή τιμή, το σύστημα πιέζεται σταθερά για 10 έως 15 s, με τυπική διάρκεια τα 14 s. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, πρέπει να αποφεύγεται οποιαδήποτε ενέργεια που μπορεί να αλλοιώσει το αποτέλεσμα, όπως μετακίνηση του εξοπλισμού. Το κέντρο του αποτυπώματος της κάθε δοκιμής πρέπει να απέχει τουλάχιστον 2.5d από τα άκρα του δείγματος και τουλάχιστον 3d από το κέντρο κάθε άλλου αποτυπώματος. Σε περίπτωση που το δείγμα έχει λειανθεί, προτείνεται η μέτρηση των χαρακτηριστικών του αποτυπώματος να γίνεται σε γωνία 45° σε σχέση με την κατεύθυνση της λείανσης. Η μέτρηση του αποτυπώματος μπορεί να γίνει είτε κανονικά είτε με αυτόματο σύστημα μέτρησης. Η πλήρης αναγραφή της σκληρότητας ενός υλικού κατά Brinell είναι:

600 HBW 1 / 30 / 20

όπου 600: η τιμή της σκληρότητας

HBW: η κλίμακα Brinell

1: η διάμετρος της σφαίρας σε mm

30: η δύναμη που ασκήθηκε σε kgf

20: η διάρκεια της διαδικασίας σε s, αναφέρεται όταν δεν είναι μέσα στα όρια 10 έως 15 s.

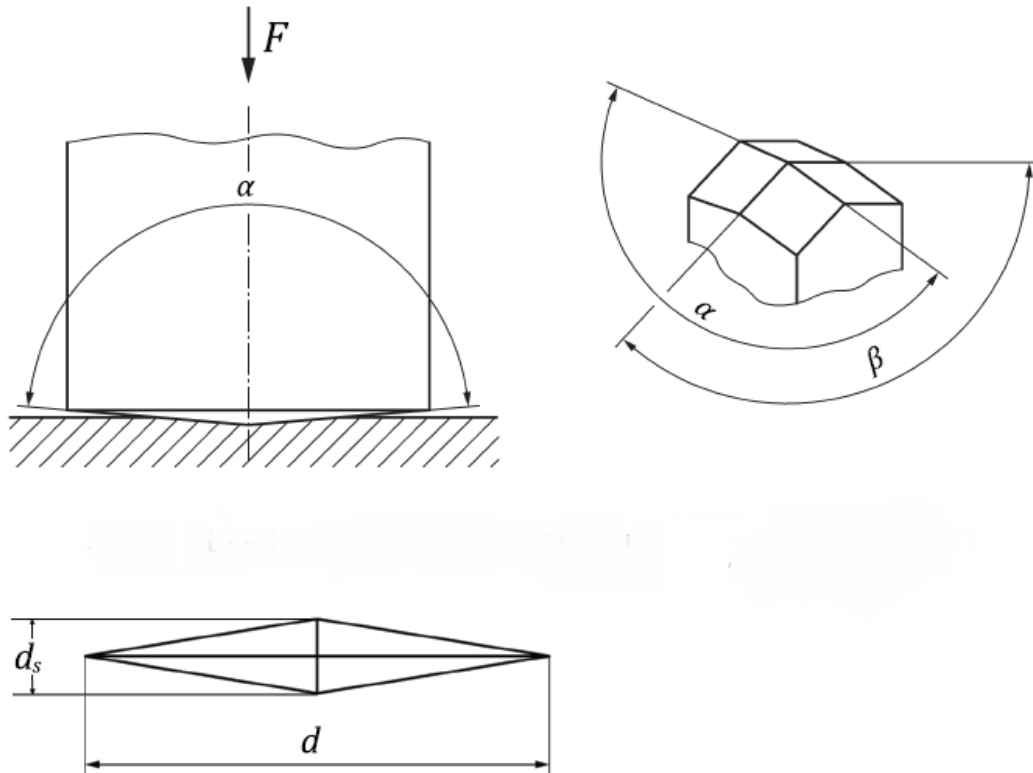
Για την ολοκληρωμένη αποτύπωση μιας δοκιμής, θα πρέπει να αναφέρονται οι παρακάτω πληροφορίες:

- a) Η αναφορά προτύπου που χρησιμοποιήθηκε, εδώ ISO 6506-1:2014.
- b) Όλες οι πληροφορίες αναγνώρισης του υλικού του δείγματος.
- c) Η ημερομηνία διεξαγωγής της δοκιμής.
- d) Η θερμοκρασία του δείγματος όταν δεν είναι στο εύρος 10 °C ως 35 °C.
- e) Ο λόγος της διαμέτρου του αποτυπώματος προς τη διάμετρο της σφαίρας d/D όταν δεν είναι μεταξύ 0.24 και 0.6.
- f) Η αναγραφή της σκληρότητας όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.
- g) Ο τρόπος μετατροπής της σκληρότητας από Brinell σε άλλη σκληρότητα, όταν αυτή γίνεται.
- h) Οποιοδήποτε συμβάν μπορεί να έχει επηρεάσει τη μέτρηση, όπως τυχόν δόνηση κατά τη διάρκεια της πίεσης της σφαίρας στην επιφάνεια του δείγματος.

3.1.3. Μέτρηση της σκληρότητας κατά Κnoop

Η δοκιμή σκληρότητας Κnoop (ISO 4545-1: 2017) είναι μια δοκιμή διεϊσδυσης στο υλικό το οποίο μετριέται. Ένας αδαμάντινος διεϊσδυτής, σχήματος όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.2, πιέζεται στην επιφάνεια του δείγματος για μερικά δευτερόλεπτα και στη συνέχεια απομακρύνεται, αφήνοντας ένα αποτύπωμα πάνω στο δείγμα. Για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Κnoop μετριοούνται οι διαστάσεις από το αποτύπωμα της εσοχής πάνω στην επιφάνεια του ορυκτού.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ



Εικόνα 3.2 - Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης Knoop. Πηγή: ISO 4545-1: 2017.

Βασικά μεγέθη που χρειάζονται για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Knoop είναι:

F: η δύναμη διείδυσης σε N

d: η μεγάλη διαγώνιος σε mm

a: η γωνία που σχηματίζει η μεγάλη διαγώνιος στην άκρη της πυραμίδας, προτείνεται στις 172.5°

b: η γωνία που σχηματίζει η μικρή διαγώνιος στην άκρη της πυραμίδας, προτείνεται στις 130°

c: σταθερά που υπολογίζεται από τη γεωμετρία της πυραμίδας από τη σχέση (3.3).

$$c = \frac{\tan\left(\frac{b}{2}\right)}{2 \tan\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (3.3)$$

Σημειώνεται ότι $c \approx 0.07028$ στις προτεινόμενες τιμές a και b.

g: η σταθερά της βαρύτητας ($g=9.80665 \text{ m/s}^2$)

KH: η σκληρότητα κατά Knoop, γνωστή και ως KHN (Knoop Hardness Number). Η

σχέση υπολογισμού της είναι η (3.4).

$$KH = \frac{1}{g_n} * \frac{F}{cd^2} \quad (3.4)$$

Γενικά, για τη σωστή μέτρηση της σκληρότητας κατά Κνοορ, πρέπει να επιλεγθεί δύναμη τέτοια ώστε να αφήσει αποτύπωμα με μεγάλη διαγώνιο τουλάχιστον 0.02 mm. Η μέτρηση του μήκους της διαγωνίου γίνεται με ακρίβεια το πολύ 0.5% της απόστασης d, ενώ σε τιμές d από 0.02 mm έως 0.08 mm ενδείκνυται ακρίβεια 0.0004 mm. Τυπικά, ο χρόνος που πιέζεται η άκρη στην επιφάνεια του δείγματος είναι από 10 έως 15 s. Η επιφάνεια του δείγματος πρέπει να έχει υποστεί λείανση ώστε να είναι καθαρή και επίπεδη για να γίνει σωστή μέτρηση του αποτυπώματος. Είναι απαραίτητη η σωστή προετοιμασία της επιφάνειας για να μην υπάρχουν στρώματα οξείδωσης που θα επηρεάσουν τη δοκιμή. Για το δείγμα σημειώνεται, ακόμα, ότι το πάχος του πρέπει να είναι τουλάχιστον το 1/3 της μεγάλης διαγωνίου και μετά το πέρας της δοκιμής δεν πρέπει να υπάρχουν ορατές παραμορφώσεις στο πίσω μέρος του δείγματος.

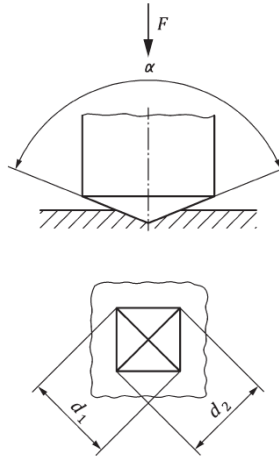
Για την ολοκληρωμένη παρουσίαση της σκληρότητας σημειώνονται τα εξής στοιχεία:

1. Η τιμή της σκληρότητας.
2. Η κλίμακα της σκληρότητας.
3. Η τιμή της δύναμης που ασκήθηκε σε kgf.
4. Ο χρόνος κατά τον οποίο ασκούνταν η δύναμη στο δείγμα, όταν διαφέρει από τα προτεινόμενα όρια των 10 έως 15 s.

Δίνεται το παράδειγμα: 640 HK 0.1 / 20, όπου 640 είναι η τιμή σκληρότητας, HK η κλίμακα Κνοορ, 0.1 kgf η δύναμη που ασκήθηκε (ίση με 0.9807 N) και 20 s η διάρκεια της δοκιμής.

3.1.4. Μέτρηση της Σκληρότητας κατά Vickers

Μία ακόμη δοκιμή σκληρότητας με διείσδυση στο υλικό είναι η δοκιμή σκληρότητας Vickers (ISO 6507-1: 2018). Η βασικότερη διαφορά με τη μέτρηση κατά Κνοορ είναι πως η πυραμίδα στη δοκιμή κατά Vickers είναι προσεγγιστικά τετραγωνική, με τις γωνίες της κορυφής της πυραμίδας κατά τη διεύθυνση των διαγωνίων της να είναι σχεδόν ίσες με α, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Η προτεινόμενη γωνία είναι α = 136°.



Εικόνα 3.3 - Σχηματική απεικόνιση της μέτρησης Vickers. Πηγή: ISO 6507-1: 2018.

Η διαδικασία παραμένει η ίδια με αυτή κατά Κnoop, ο τρόπος υπολογισμού της σκληρότητας όμως γίνεται από τις εξισώσεις (3.5) και (3.6).

$$HV = \frac{1}{g_n} \times \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (3.5)$$

ή όταν $\alpha = 136^\circ$:

$$HV = 0.1981 \times \frac{F}{d^2} \quad (3.6)$$

όπου HV: η τιμή της σκληρότητας κατά Vickers

g_n : η σταθερά της βαρύτητας (9.80665 m/s^2)

F: η δύναμη διείσδυσης σε N

d: η μέση τιμή των διαγωνίων του σχήματος του αποτυπώματος σε mm.

Μια ακόμα διαφορά είναι πως το πάχος του δείγματος πρέπει να είναι τουλάχιστον $1.5d$, και το βάθος της διείσδυσης είναι περίπου $0.143d$. Για τα σκληρομέταλλα είναι απαραίτητο πάχος τουλάχιστον 1 mm.

Ένα παράδειγμα από πλήρη παρουσίαση της σκληρότητας ενός υλικού είναι:

640 HV 30 / 20

όπου 640: η τιμή της σκληρότητας που υπολογίστηκε

HV: η κλίμακα Vickers

30: η μέγιστη δύναμη που ασκήθηκε σε kgf

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

20: η διάρκεια κατά την οποία ασκούνται η μέγιστη δύναμη σε s , αναφέρεται όταν δεν είναι μέσα στα τυπικά όρια των 10 έως 15 s.

3.1.5. Μέτρηση της σκληρότητας κατά Rockwell

Η δοκιμή μέτρησης της σκληρότητας κατά Rockwell είναι μια δοκιμή με διείδυση που υπολογίζεται από το βάθος του αποτυώματος (ISO 6508-1: 2016). Είναι αρκετά διαφορετική από τις άλλες δοκιμές από την άποψη ότι γίνεται διείδυση σε δύο στάδια και η σκληρότητα υπολογίζεται από τη διαφορά δύο καταστάσεων ισορροπίας.

Μεγέθη που ενδιαφέρουν στη μέτρηση αυτή είναι:

F_0 : Η αρχική ασκούμενη δύναμη σε N

F_1 : Η επιπλέον ασκούμενη δύναμη σε N

F : Η συνολική δύναμη, το άθροισμα των F_0 και F_1 , σε N

S, N : Σταθεροί συντελεστές που εξαρτώνται από την κλίμακα στην οποία θα γίνει η μέτρηση, το S σε mm και το N αδιάστατο

h : Το τελικό βάθος ανάμεσα στα δύο σημεία ισορροπίας, δηλαδή η απόσταση με συμβολισμό «4» στο Διάγραμμα 3.1

HR(κατηγορία): Η κλίμακα της σκληρότητας Rockwell.

Η κλίμακα Rockwell έχει κατηγορίες ανάλογα το υλικό και το σχήμα του άκρου που θα διειδύσει στην επιφάνεια του δείγματος και το μέγεθος των δυνάμεων που θα ασκηθούν σε αυτό. Ο γενική σχέση υπολογισμού της σκληρότητας στην εκάστοτε κατηγορία της είναι η (3.7).

$$HR(\text{κατηγορία}) = N - \frac{h}{S} \quad (3.7)$$

Οι τιμές δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΙΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Symbol/ Abbreviated term	Definition	Unit
F_0	Preliminary test force	N
F_1	Additional test force (total force minus preliminary force)	N
F	Total test force	N
S	Scaling constant, specific to the scale	mm
N	Full range constant, specific to the scale	-
h	Permanent depth of indentation under preliminary test force after removal of additional test force (permanent indentation depth)	mm
HRA HRC HRD	Rockwell Regular hardness = $100 - \frac{h}{0,002}$	
HRBW HREW HRFW HRGW HRHW HRKW	Rockwell Regular hardness = $130 - \frac{h}{0,002}$	
HRN HRTW	Rockwell Superficial hardness = $100 - \frac{h}{0,001}$	

Πίνακας 3.1 - Ανάλυση συμβολισμών στη μέτρηση σκληρότητας Rockwell. Στην αριστερή στήλη φαίνονται οι συμβολισμοί, στην κεντρική στήλη ο ορισμός τους, στη δεξιά στήλη οι μονάδες μέτρησής τους. Πηγή: ISO 6508-1: 2016.

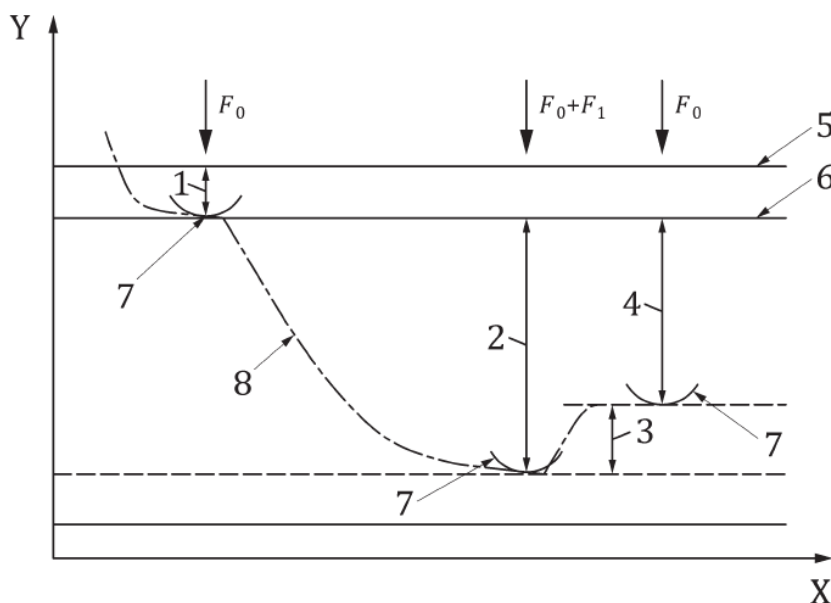
Η διαδικασία της μεθόδου γίνεται ως εξής:

- Σε λεία και επίπεδη επιφάνεια διεισδύει κάθετα ένας διεισδυτής συγκεκριμένων διαστάσεων με τελική δύναμη F_0 , η οποία αναπτύσσεται το πολύ μέσα σε 2 s, και διατηρείται σταθερά για 1 έως 4 s, προτείνεται 3 s.
- Με το πέρας της χρονικής διάρκειας, σημειώνεται το βάθος διείσδυσης ως το πρώτο σημείο αναφοράς και ξεκινάει να ασκείται σταδιακά η επιπλέον δύναμη F_1 .
- Για την άσκηση της F_1 , δηλαδή από F_0 έως F , χρειάζεται χρόνος από 1 έως 8 s στην κανονική δοκιμή Rockwell και το πολύ 4 s στην επιφανειακή δοκιμή Rockwell.
- Όταν ασκηθεί, πλέον, δύναμη F , το σύστημα ισορροπεί για 2 έως 6 s και στη συνέχεια αφαιρείται η επιπλέον δύναμη F_1 , δηλαδή μένει ξανά μόνο η δύναμη F_0 στο σύστημα.
- Η F_0 διατηρείται για 1 έως 5 s, προτείνεται 4 s, και σημειώνεται το βάθος διείσδυσης ως το δεύτερο σημείο αναφοράς.
- Υπολογίζεται το h ως η απόσταση των δύο σημείων αναφοράς.

Σημειώνεται πως για υλικά που παραμορφώνονται με πλαστική ροή και χρειάζεται περισσότερος χρόνος από 6 s για να σταθεροποιηθεί ο διεισδυτής στην τελική δύναμη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

F, δίπλα στην αναφορά της σκληρότητάς του αναφέρεται και η χρονική διάρκεια αυτή. Η διαδικασία φαίνεται σχηματικά στο Διάγραμμα 3.1 διείσδυσης - χρόνου.



Διάγραμμα 3.1 - Η διαδικασία της δοκιμής Rockwell. Πηγή: ISO 6508-1:2016.

X: άξονας του χρόνου

Y: άξονας του βάθους της κάθετης τομής της επιφάνειας διείσδυσης

1: αρχικό βάθος διείσδυσης από την F_0

2: συνολικό βάθος διείσδυσης από την $F = F_0 + F_1$

3: διαφορά βάθους από την αφαίρεση της F_1

4: τελικό βάθος διείσδυσης h από την F_0

5: επιφάνεια δείγματος

6: επιφάνεια αναφοράς της αρχικής διείσδυσης

7: σχηματική απεικόνιση του διεισδυτή

8: καμπύλη διείσδυσης - χρόνου

Η μέτρηση στην κλίμακα Rockwell, όπως αυτή γίνεται με χρήση της εξίσωσης (3.7), γίνεται με αφαίρεση από μία ανώτατη τιμή N. Έτσι, ανάλογα με το είδος και το σχήμα του άκρου διείσδυσης και τη δύναμη διείσδυσης, οι τιμές ταξινομούνται σε κατηγορίες. Η πιο συχνή κατηγορία στα σκληρά μέταλλα είναι η HRC. Η επιφανειακή δοκιμή γίνεται για εξέταση λεπτών στρωμάτων ή πιο συγκεκριμένων περιοχών μιας επιφάνειας. Δίνονται αναλυτικά οι κατηγορίες με τις προδιαγραφές τους στους Πίνακες 3.2 και 3.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Rockwell Regular hardness scale	Hardness symbol Unit	Type of indenter	Preliminary force F_0	Total force F	Scaling Constant S	Full Range Constant N	Applicable range of application (Rockwell Regular hardness scales)
A	HRA	Diamond cone	98,07 N	588,4 N	0,002 mm	100	20 HRA to 95 HRA
B	HRBW	Ball 1,587 5 mm	98,07 N	980,7 N	0,002 mm	130	10 HRBW to 100 HRBW
C	HRC	Diamond cone	98,07 N	1,471 kN	0,002 mm	100	20 HRC ^a to 70 HRC
D	HRD	Diamond cone	98,07 N	980,7 N	0,002 mm	100	40 HRD to 77 HRD
E	HREW	Ball 3,175 mm	98,07 N	980,7 N	0,002 mm	130	70 HREW to 100 HREW
F	HRFW	Ball 1,587 5 mm	98,07 N	588,4 N	0,002 mm	130	60 HRFW to 100 HRFW
G	HRGW	Ball 1,587 5 mm	98,07 N	1,471 kN	0,002 mm	130	30 HRGW to 94 HRGW
H	HRHW	Ball 3,175 mm	98,07 N	588,4 N	0,002 mm	130	80 HRHW to 100 HRHW
K	HRKW	Ball 3,175 mm	98,07 N	1,471 kN	0,002 mm	130	40 HRKW to 100 HRKW

Πίνακας 3.2 - Κατηγορίες της κανονικής δοκιμής Rockwell. α: Το εύρος της HRC μπορεί να διευρυνθεί έως και HRC 10 αν η επιφάνεια του διεισδυτή λειανθεί για βάθος διείσδυσης τουλάχιστον 0.4 mm. Πηγή: ISO 6508-1: 2016.

Rockwell Superficial hardness scale	Hardness symbol Unit	Type of indenter	Preliminary force F_0	Total force F	Scaling Constant S	Full Range Constant N	Applicable range of application (Rockwell Superficial hardness scales)
15N	HR15N	Diamond cone	29,42 N	147,1 N	0,001 mm	100	70 HR15N to 94 HR15N
30N	HR30N	Diamond cone	29,42 N	294,2 N	0,001 mm	100	42 HR30N to 86 HR30N
45N	HR45N	Diamond cone	29,42 N	441,3 N	0,001 mm	100	20 HR45N to 77 HR45N
15T	HR15TW	Ball 1,587 5 mm	29,42 N	147,1 N	0,001 mm	100	67 HR15TW to 93 HR15TW
30T	HR30TW	Ball 1,587 5 mm	29,42 N	294,2 N	0,001 mm	100	29 HR30TW to 82 HR30TW
45T	HR45TW	Ball 1,587 5 mm	29,42 N	441,3 N	0,001 mm	100	10 HR45TW to 72 HR45TW

Πίνακας 3.3 - Κατηγορίες της επιφανειακής δοκιμής Rockwell. Πηγή: ISO 6508-1: 2016.

Υπάρχουν τρία κύρια είδη διεισδυτών δύο διαφορετικών υλικών: αδαμάντινος διεισδυτής κωνικού σχήματος με πεπλατυσμένη μύτη, σφαίρα από καρβίδιο του βολφραμίου με διάμετρο 1.5875 mm και σφαίρα από καρβίδιο του βολφραμίου με διάμετρο 3.175 mm. Στην περίπτωση του αδαμάντινου διεισδυτή, η γωνία του κώνου είναι 120° και η ακτίνα της καμπύλης του άκρου του διεισδυτή ισούται με 0.2 mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το δείγμα προς μελέτη πρέπει να έχει λεία και επίπεδη επιφάνεια, χωρίς ανωμαλίες και ξένα σώματα. Σε περιπτώσεις όπου το υλικό μπορεί να προσκολληθεί στον δεισδυτή, μπορούν να χρησιμοποιούνται ειδικά λιπαντικά στην επιφάνεια του δείγματος. Η διαδικασία της προετοιμασίας του δείγματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην επηρεαστεί η σκληρότητα του υλικού, όπως διαδικασίες που αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες. Το δείγμα πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 10 φορές το δεύτερο βάθος διείσδυσης στην περίπτωση χρήσης αδαμάντινου δεισδυτή και τουλάχιστον 15 φορές στην περίπτωση χρήσης δεισδυτή από καρβίδιο του βολφραμίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μικρότερο πάχος αν δεν επηρεάζεται η μέτρηση της σκληρότητας, δηλαδή αν δεν εμφανιστούν παραμορφώσεις στο πίσω μέρος του δείγματος μετά τη δοκιμή. Η θερμοκρασία του δείγματος κυμαίνεται από 10 °C έως 35 °C, ειδάλως αναφέρονται οι εκάστοτε συνθήκες. Με κάθε αλλαγή του δεισδυτή, προτείνεται να γίνουν δύο δοκιμές που θα ακυρωθούν και στη συνέχεια να γίνει ο έλεγχος και η βαθμονόμηση του εξοπλισμού.

Ένα παράδειγμα πλήρους παρουσίασης της σκληρότητας ενός υλικού είναι:

70 HR 30T W

όπου 70: η τιμή της σκληρότητας

HR: η κλίμακα κατά Rockwell

30T: η κατηγορία της κλίμακας στην οποία έγινε η μέτρηση

W: το υλικό του δεισδυτή, σε αυτή την περίπτωση βολφράμιο.

Για την ολοκληρωμένη αναφορά μιας μέτρησης της μεθόδου Rockwell, χρειάζονται οι εξής πληροφορίες:

- a) Αναφορά στο σύστημα καταγραφής, εδώ ISO 6508-1:2016.
- b) Όλες οι πληροφορίες αναγνώρισης του δείγματος, συμπεριλαμβανομένης της καμπυλότητας της επιφάνειας.
- c) Η θερμοκρασία, όταν αυτή δεν είναι στο εύρος 10 έως 35 °C.
- d) Η ολοκληρωμένη παρουσίαση της σκληρότητας του υλικού.
- e) Οποιαδήποτε διεργασία δεν αναφέρεται στην τυπική μεθοδολογία.
- f) Συμβάντα που μπορεί να επηρέασαν το αποτέλεσμα, όπως δονήσεις.
- g) Η χρονική διάρκεια της άσκησης της συνολικής δύναμης, αν αυτή υπερβαίνει τα 6 s.
- h) Η ημερομηνία διεξαγωγής της δοκιμής.
- i) Η μέθοδος μετατροπής της σκληρότητας σε άλλη κλίμακα σκληρότητας, αν αυτή γίνει.

3.1.6. Υπολογισμός της σκληρότητας κατά Rosiwal

Η κλίμακα σκληρότητας Rosiwal είναι βασισμένη σε μια δοκιμή σκληρότητας που αναπτύχθηκε το 1896 και δεν διεξάγεται πλέον, όμως η κλίμακα ακόμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

χρησιμοποιείται σε διάφορες αναφορές, όπως για την εύρεση του Rock Abrasivity Index. Η δοκιμή στη σημερινή εποχή θα χαρακτηριζόταν ως δοκιμή της αντίστασης σε απόξεση ενός ορυκτού. Σύμφωνα με τις τελικές προσαρμογές της μεθόδου (Rosival, 1916), η διαδικασία της δοκιμής είχε ως εξής:

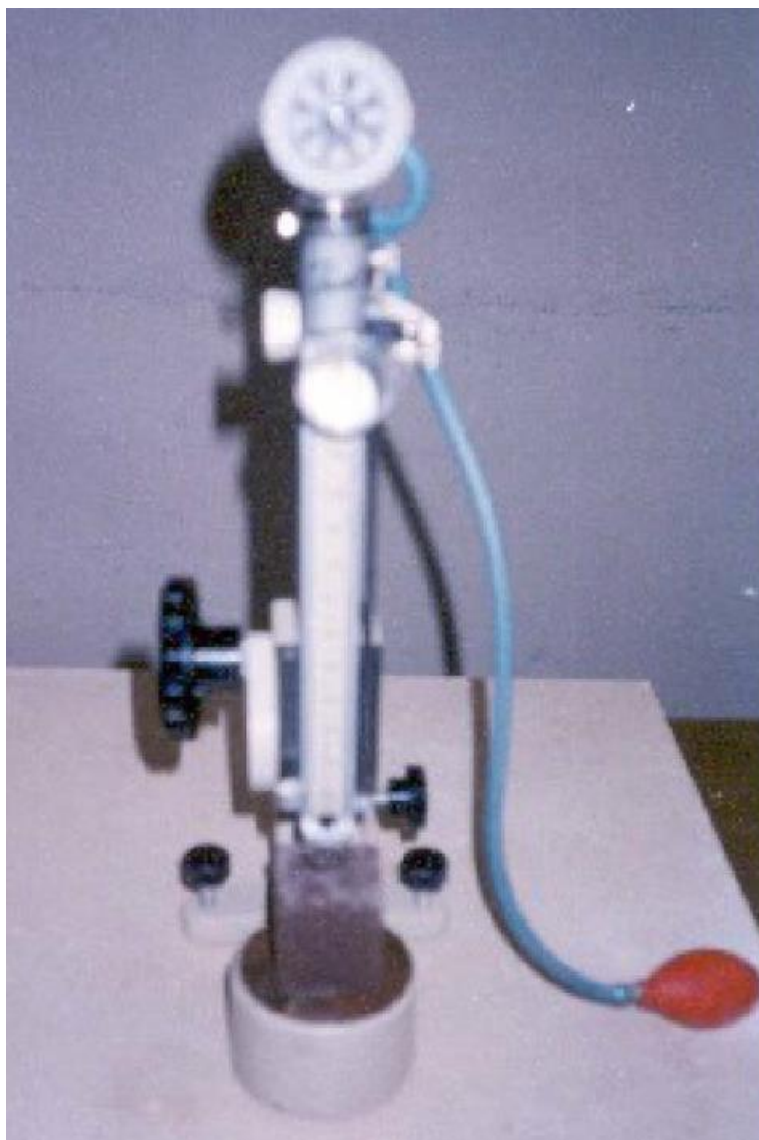
- Πάνω σε μεταλλικό ή γυάλινο περιστροφικό δίσκο χρησιμοποιούνται 100 mg σκόνης κορουνδίου κοκκομετρίας 0.2 mm.
- Δείγμα ορυκτού επιφάνειας 400 mm² πιέζεται δια χειρός στην επιφάνεια του δίσκου με το κορούνδιο όσο αυτός περιστρέφεται.
- Μετά από 8 λεπτά τριβής, μετριέται ο όγκος των απωλειών του ορυκτού.

Η μέτρηση αυτή είναι συγκριτική και είναι καθαρός αριθμός. Ως ορυκτό σύγκρισης, ο Rosival θεωρεί το κορούνδιο, το οποίο έχει σκληρότητα 1000 στην κλίμακα Rosival (RosH). Ακόμα, μια καλή σχέση σύγκρισης των τιμών της κλίμακας Rosival με τις τιμές της κλίμακας Mohs είναι η (3.8) (Verhoef, 1997).

$$MH = 2.53 + 0.906 \ln(RosH) \quad (3.8)$$

, με συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.88$ και τυπική απόκλιση περίπου 0.6 (MH = Mohs Hardness).

3.1.7. Μέτρηση της σκληρότητας με κρούση κατά Shore (ISRM, 2007)



Εικόνα 3.4 - Σκληροσκόπιο Shore τύπου C-2. Πηγή: ISRM (2007).

Η μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο κατά Shore είναι μια μη καταστροφική κρουστική μέθοδος αναπήδησης με σφύρα. Η δοκιμή γίνεται με ειδικό εξοπλισμό, το σκληροσκόπιο σκληρότητας Shore. Το σκληροσκόπιο περιέχει σφύρα με άκρο σχήματος πυραμίδας, η οποία πέφτει κάθετα σε λειασμένη επιφάνεια δείγματος ορυκτού από συγκεκριμένο ύψος στο οποίο αφήνεται ελεύθερα. Μετά την κρούση με το δείγμα, μετρείται το ύψος της αναπήδησης της σφύρας για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Shore (SH - Shore Hardness). Το εύρος των τιμών σε αυτή την κλίμακα κυμαίνεται από 0 έως 140 SH.

Για την προετοιμασία του δείγματος δίνονται:

- Το δείγμα του εξεταζόμενου ορυκτού πρέπει να έχει όγκο περίπου 80 cm^3 και να αποφεύγεται η χρήση μικρότερου όγκου, αφού διάφορες μετρήσεις δείχνουν ότι κάτω από αυτό τον όγκο η σκληρότητα που μετριέται μειώνεται με σχετικά γραμμικό ρυθμό, ενώ μεγαλύτερες τιμές όγκου δείχνουν τη σκληρότητα να μένει σχετικά σταθερή. Το σχήμα του δείγματος μπορεί να είναι είτε κυλινδρικό είτε κυβικό.
- Για την προετοιμασία του δείγματος, η επιφάνεια του δείγματος πρέπει να λειανθεί με γυαλόχαρτο 220. Το δείγμα πρέπει να είναι ξηρό, δεδομένου ότι δείγματα με υγρασία δίνουν χαμηλότερες τιμές SH. Πρέπει να δοκιμαστούν τουλάχιστον τρία δείγματα του ίδιου ορυκτού προς δοκιμή, με περισσότερα δείγματα να δίνουν πιο αξιόπιστες τιμές.
- Η επιφάνεια του δείγματος A πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 cm^2 και το πάχος του δείγματος t τουλάχιστον 1.5 cm. Έτσι, από την εξίσωση του όγκου $V = At = 80 \text{ cm}^3$, μπορούν να κατασκευαστούν κατάλληλα δείγματα με δεδομένο το ένα από τα δύο μεγέθη. Σημειώνεται ότι για $t = 1.5 \text{ cm}$: $A = 53.33 \text{ cm}^2$ και για $A = 10 \text{ cm}^2$: $t = 8 \text{ cm}$.

Η διαδικασία της δοκιμής έχει ως εξής:

- Το δείγμα τοποθετείται στο σκληροσκόπιο με τη λειασμένη επιφάνεια να έχει κατεύθυνση προς τα πάνω. Η σφύρα, σχήματος πυραμίδας και βάρους 2.44 g, αφήνεται να πέσει από το συγκεκριμένο ύψος που ενδείκνυται από τον εξοπλισμό πάνω στην επιφάνεια του δείγματος. Στη συνέχεια σημειώνεται το ύψος αναπήδησης της σφύρας που μετρήθηκε από την κλίμακα του εξοπλισμού, με τιμές από 0 έως 140.
- Πάνω στην επιφάνεια του δείγματος πρέπει να γίνουν συνολικά 20 μετρήσεις, δηλαδή 20 αναπηδήσεις, με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αναπηδήσεων και μεταξύ αναπήδησης και των ορίων του δείγματος να είναι τουλάχιστον 5 mm. Στο τέλος σημειώνεται η μέση τιμή των αναπηδήσεων ως SH του ορυκτού. Πρέπει να ληφθεί υπόψη πως οι τιμές στο κέντρο της επιφάνειας του δείγματος μπορεί να είναι αρκετά υψηλότερες από τις τιμές πιο κοντά στα άκρα της επιφάνειας.
- Σε περιπτώσεις που το ορυκτό έχει χαρακτηριστικά ως προς κάποια διεύθυνση, όπως φυλλώσεις, προτείνεται να γίνουν μετρήσεις κάθετα και οριζόντια στα επίπεδα των χαρακτηριστικών αυτών, ώστε να υπάρχει καλύτερη προσέγγιση στις υψηλότερες και χαμηλότερες τιμές της σκληρότητας του ορυκτού.
- Πριν από κάθε δοκιμή, το σκληρόμετρο πρέπει να καθαρίζεται επαρκώς και να βαθμονομείται για να διατηρείται η ακρίβεια της μέτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Στις περιπτώσεις που ο όγκος του δείγματος διαφέρει του προτεινόμενου των 80 cm³, η σκληρότητα που θα μετρηθεί από τη δοκιμή με το σκληρόμετρο:

1. Θα διατηρηθεί όταν ο όγκος είναι μεγαλύτερος από τον προτεινόμενο, εφόσον η σκληρότητα διατηρείται σχετικά σταθερή από εκείνο το σημείο και πάνω.
2. Θα αναπροσαρμοστεί με βάση τη σχέση (3.9):

$$SH_e = 0.248(80 - V_s) + SH_m \quad (3.9)$$

όπου SH_e: η υπολογιζόμενη ανάλογη σκληρότητα στα 80 cm³

V_s: ο όγκος του δείγματος που μετρήθηκε

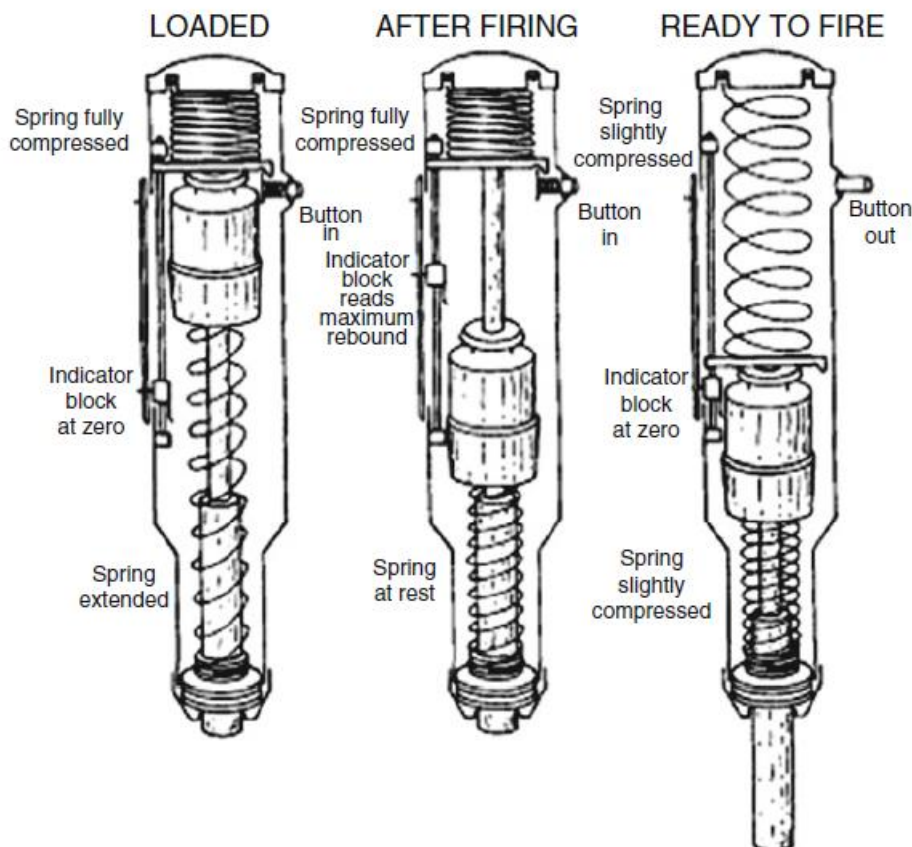
SH_m: η σκληρότητα που μετρήθηκε σε όγκο V_s.

Οι πληροφορίες που πρέπει να αναγράφονται σε αναφορές για τη διεξαγωγή της δοκιμής μέτρησης της σκληρότητας Shore είναι:

- a) Προέλευση του δείγματος, συμπεριλαμβανομένης της γεωγραφικής τοποθεσίας, του βάθους και της κατεύθυνσης του πετρώματος κατά τη δειγματοληψία του.
- b) Πετρογραφική περιγραφή του πετρώματος.
- c) Το πλήθος των δειγμάτων που μετρήθηκαν και ο μέσος όρος SH από το κάθε είδος πετρώματος.
- d) Ο προσανατολισμός των δειγμάτων σε σχέση με τα διάφορα χαρακτηριστικά του πετρώματος.
- e) Σχετική σύσταση ορυκτών, σχήμα των κόκκων και μέγεθος των δειγμάτων.
- f) Ημερομηνία λήψης του δείγματος, ημερομηνία προετοιμασίας δοκιμής του, τρόπος προετοιμασίας του δείγματος.
- g) Διαστάσεις του δείγματος: πάχος, επιφάνεια μέτρησης και όγκος.
- h) Τιμή SH της κάθε δοκιμής.

3.1.8. Μέτρηση της σκληρότητας με κρούση κατά Schmidt (ISRM, 2015)

Η μέτρηση της σκληρότητας κατά Schmidt είναι μια μη καταστροφική μέθοδος υπολογισμού της σκληρότητας με αναπήδηση στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Η ευρεία χρήση της μεθόδου αυτής οφείλεται στο μέγεθος του εξοπλισμού για τη μέτρηση, καθώς ακόμα και στην ευκολία της λειτουργίας του και της διαδικασίας της δοκιμής.



Εικόνα 3.5 - Εξοπλισμός για τη μέτρηση Schmidt. Πηγή: ISRM (2015).

Ο εξοπλισμός είναι μία συσκευή χειρός, το εσωτερικό της οποίας αποτελείται από ένα ελατήριο στην έξοδό της, συνδεδεμένο με μία χαλύβδινη σφύρα πάνω σε ένα ραβδόμορφο χαλύβδινο έμβολο και την άκρη της συσκευής. Η μια άκρη του εμβόλου είναι το σημείο επαφής με το υπό μελέτη δείγμα, οπότε είναι στο εξωτερικό μέρος του εξοπλισμού. Η άλλη άκρη του εμβόλου είναι συνδεδεμένη με τη σφύρα και με ένα ελατήριο συγκράτησης. Το ελατήριο συγκράτησης, ή βάσης, είναι συνδεδεμένο με τη βάση του εξοπλισμού και με το έμβολο. Όταν το ελατήριο βάσης συμπιεστεί σε μια ενδεδειγμένη θέση, ένας μηχανισμός μανδάλωσης το συγκρατεί σε εκείνη τη θέση ενώ αποδεσμεύει τη σφύρα από το έμβολο. Στο πλάγιο μέρος του μηχανισμού υπάρχει η καταγραφή της σκληρότητας.

Η διαδικασία είναι ως εξής:

- Σε θέση ετοιμότητας του εξοπλισμού, ένα μέρος του εμβόλου είναι εξωτερικά του μηχανήματος και η ένδειξη του μηχανισμού μανδάλωσης είναι ανοιχτή, δηλαδή υπάρχει ένα κουμπί στο πλάγιο μέρος εξωτερικά του εξοπλισμού που είναι σηκωμένο. Στα ελατήρια δεν ασκείται κάποια εξωτερική δύναμη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

- Πάνω στην επίπεδη επιφάνεια του δείγματος προς μελέτη πιέζεται κάθετα το εξωτερικό άκρο, πιέζοντας με τη σειρά του και το εσωτερικό άκρο, τη σφύρα και τα δύο ελατήρια. Σε αυτό το σημείο τα ελατήρια φορτίζονται με δυναμική ενέργεια.
- Όταν φτάσει στην ενδεδειγμένη θέση το έμβολο, το πάνω ελατήριο συγκρατείται και η σφύρα αποδεσμεύεται. Τα δύο ελατήρια σε αυτό το σημείο έχουν τη μέγιστη δυναμική ενέργεια κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- Εφόσον η σφύρα αποδεσμεύεται από το ελατήριο βάσης, αυτό κινείται επιταχυνόμενο με τη συσπείρωση του ελατηρίου εξόδου κατά μήκος του κορμού του εμβόλου.
- Η σφύρα έρχεται σε σύγκρουση με το άλλο άκρο του εμβόλου που είναι με τη σειρά του σε επαφή με το εξεταζόμενο δείγμα.
- Μετά την κρούση, η σφύρα αναπηδά σε μια μέγιστη απόσταση, η οποία και καταγράφεται ως σκληρότητα.

Ο μηχανισμός της μέτρησης είναι απλός και στην ενδεδειγμένη θέση ο μηχανισμός λειτουργεί αυτόματα, έτσι μικραίνει το περιθώριο μιας λανθασμένης μέτρησης. Προτείνονται δύο έλεγχοι του εξοπλισμού πριν και δύο μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής με τυποποιημένα δοκίμια βαθμονόμησης, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του εξοπλισμού. Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι η μέση τιμή τουλάχιστον 20 μετρήσεων. Σημειώνεται ότι αν οι οριακές τιμές έχουν διαφορά από 4 και κάτω, η δοκιμή μπορεί να τερματιστεί και μετά από 10 μετρήσεις.

Το υλικό που μελετάται πρέπει να έχει όσο γίνεται πιο λεία επιφάνεια, χωρίς ρωγμές ή άλλες επιφανειακές ανωμαλίες. Επίσης, σε υψηλή κοκκομετρία περιεχόμενων ορυκτών, τέτοια ώστε να μεταβάλλεται ουσιωδώς η μέτρηση της σκληρότητας, προτείνεται η μέτρηση της σκληρότητας τόσο των διακριτών ορυκτών όσο και του συνδυαστικού υλικού. Η συσχέτιση των δύο και η χρήση της μέσης σκληρότητας μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη καταγραφή σκληρότητας. Ακόμα, είναι σημαντική η μεταβολή στη μέτρηση από την περιεχόμενη υγρασία του υλικού. Προτείνεται να ταιριάζει με το ποσοστό υγρασίας *in-situ* όταν πρόκειται για κάποιο έργο. Γενικά, αποφεύγεται η χρήση της μεθόδου Schmidt σε ανισότροπα υλικά και αν γίνει χρήση θα πρέπει να σημειωθεί η σχετική κατεύθυνση της κρούσης.

Για την πλήρη αναφορά μιας δοκιμής με τη μέθοδο με κρούση κατά Schmidt χρειάζονται οι εξής πληροφορίες:

- a) Πετρογραφική περιγραφή του υλικού. Προτείνεται η σειρά: τάξη αντοχής, χρώμα, υφή, φθορές, ονοματολογία πετρώματος, μέγεθος κόκκων.
- b) Γεωγραφική περιοχή και βάθος της προέλευσης του πετρώματος.
- c) Ημερομηνία και συνθήκες επί τόπου δοκιμής ή λήψης δείγματος.
- d) Αναγνωριστικό μετώπου ή δείγματος.
- e) Είδος δείγματος (π.χ. μέτωπο, μπλοκ, πυρήνας).
- f) Μέθοδος προετοιμασίας του δείγματος.

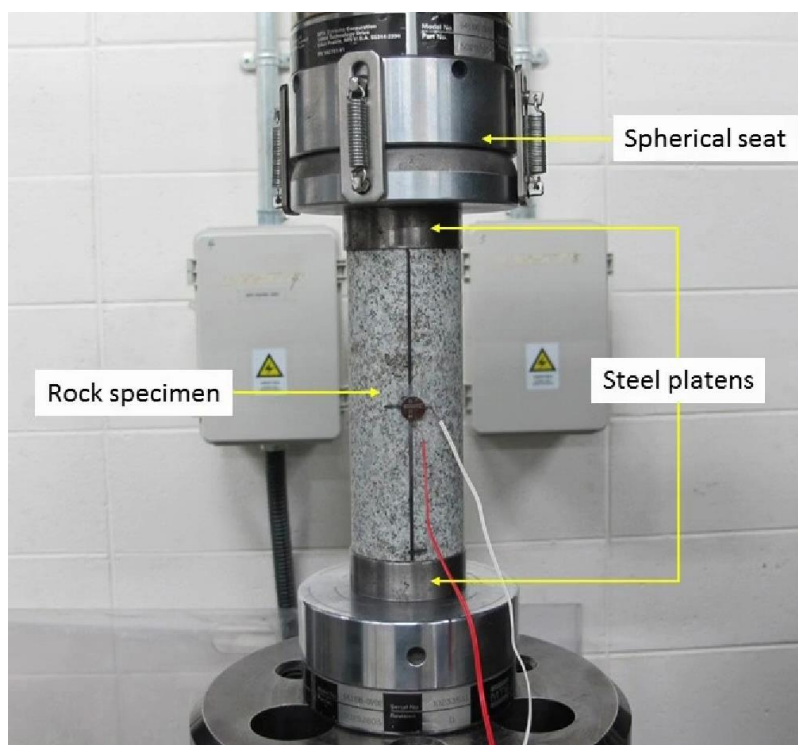
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

- g) Διαστάσεις του δείγματος ή εμβαδόν επιφάνειας.
- h) Υγρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- i) Τύπος σφύρας (L ή N).
- j) Τρόπος συγκράτησης του δείγματος.
- k) Γωνία κρούσης σε σχέση με το επίπεδο της επιφάνειας.
- l) Γωνία κρούσης με πιθανή ανισοτροπία.
- m) Ιστόγραμμα των 20 μετρήσεων με τις καταγεγραμμένες τιμές και τη μέση τιμή στρογγυλεμένη στον πλησιέστερο ακέραιο.
- n) Περιγραφή ή φωτογράφιση των επιφανειών πριν και μετά τη δοκιμή.

3.2. Δείκτες μηχανικής αντοχής

Στη μηχανική των στερεών, η αντοχή ορίζεται ως η ικανότητα του υλικού να αντέχει υπό την άσκηση ενός φορτίου χωρίς να αστοχήσει ή να παραμορφωθεί πλαστικά. Ενώ μπορεί να υπάρξει πιθανή συσχέτιση της αντοχής με τη σκληρότητα, η μέτρηση της αντοχής γίνεται με διαφορετικές δοκιμές από αυτές της σκληρότητας (Hamzaban et al., 2022). Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται ο υπολογισμός των δεικτών αντοχής UCS, BTS και PLI (ή $I_{s(50)}$) που χρησιμοποιούνται συχνά στην εκτίμηση της αναμενόμενης φθοράς κοπτικών άκρων.

3.2.1. Μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Uniaxial Compressive Strength - UCS)



Εικόνα 3.6 - Εξοπλισμός για τον υπολογισμό της UCS. Πηγή: www.isrm.net.

Η μέθοδος για τον υπολογισμό της UCS σύμφωνα με το πρότυπο της ISRM (2007), γίνεται ως εξής:

- Τα δείγματα του πετρώματος πρέπει να έχουν κυλινδρικό σχήμα, με σχέση ύψους/διάμετρο από 2.5 έως 3, με προτεινόμενη διάμετρο τουλάχιστον 54 mm, δηλαδή διαστάσεων NX. Η διάμετρος του δείγματος επιλέγεται έτσι ώστε η αναλογία της προς το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου μέσα στο πέτρωμα να είναι τουλάχιστον 10:1.
- Οι επίπεδες επιφάνειες του κυλίνδρου πρέπει να έχουν λειανθεί έτσι ώστε οι ανωμαλίες της επιφάνειας να μην ξεπερνούν τα 0.02 mm και τα επίπεδά τους να είναι κάθετα στον άξονα του κυλίνδρου με ακρίβεια τουλάχιστον 0.001 ακτίνια, δηλαδή κατακόρυφη απόκλιση 0.05 mm σε διάμετρο 50 mm.
- Οι πλάγιες επιφάνειες πρέπει να είναι λείες χωρίς εμφανείς, απότομες ανωμαλίες και να διατηρούν τη διεύθυνση τους σε ολόκληρο το μήκος του δείγματος με απόκλιση το πολύ 0.3 mm.
- Δεν επιτρέπεται η χρήση επικαλύψεων ούτε η κατεργασία των επιφανειών, πέρα από τα απαραίτητα της μεθόδου.
- Για τη μέτρηση της διαμέτρου, υπολογίζονται δύο διαμέτροι με διαφορά 90°, εκ των οποίων υπολογίζεται η μέση διάμετρος με ακρίβεια 0.1 mm. Γίνονται

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

τρεις μετρήσεις, μια κοντά σε κάθε άκρο και μια στο κέντρο του δείγματος. Η μέτρηση του ύψους του κυλίνδρου γίνεται με ακρίβεια 1 mm.

- f) Τα δείγματα πρέπει να αποθηκεύονται το πολύ έως 30 ημέρες με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αλλοιώνεται η υγρασία του πετρώματος, η οποία είναι σημαντικός παράγοντας στον υπολογισμό της UCS και καταγράφεται.
- g) Ο ρυθμός φόρτισης του δείγματος είναι τέτοιος ώστε το δείγμα να αστοχήσει μέσα σε 5 έως 10 min. Εναλλακτικά, ο ρυθμός φόρτισης μπορεί να επιλεγθεί μέσα στο εύρος από 0.5 έως 1.0 MPa/s.
- h) Το τελικό φορτίο αστοχίας καταγράφεται σε N, kN ή MN, ανάλογα με το πέτρωμα και την τάξη μεγέθους στην οποία αστοχεί.
- i) Το πλήθος των δειγμάτων που θα μετρηθούν προτείνεται να είναι τουλάχιστον πέντε.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη μέτρηση της UCS πρέπει να είναι τέτοιος να ώστε να μπορεί να συγκρατεί το δείγμα σταθερό, να μπορεί να αυξάνει σταθερά και υπό έλεγχο το φορτίο και να μπορεί να κρατάει τις μετρήσεις του φορτίου και των παραμορφώσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να κατασκευαστεί η καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης μετά τη δοκιμή. Στις βάσεις του κυλινδρικού δείγματος τοποθετούνται μεταλλικοί δίσκοι σκληρότητας τουλάχιστον HRC 58, διαμέτρου τουλάχιστον ίση με τη διάμετρο του κυλίνδρου έως μεγαλύτερη το πολύ κατά 2 mm από αυτή. Το πάχος του κάθε δίσκου είναι τουλάχιστον το 1/3 της διαμέτρου του δείγματος, ή τουλάχιστον 15 mm. Η επιφάνεια του κύκλου των δίσκων πρέπει να είναι επίπεδη και λεία ώστε οι ανωμαλίες να είναι μικρότερες από 0.005 mm. Σε έναν από τους δίσκους ενσωματώνεται μία σφαιρική έδρα η οποία είναι στην ίδια διεύθυνση με τον κεντρικό άξονα του δείγματος.

Όταν το δείγμα τοποθετηθεί στη μηχανή θλίψης, ξεκινάει η σταδιακή αύξηση του φορτίου μέχρι την τελική του αστοχία. Όταν το δείγμα αστοχήσει, καταγράφεται το φορτίο και υπολογίζεται η UCS με τη σχέση (3.10).

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad (3.10)$$

όπου σ_c : η μέγιστη τάση πριν την αστοχία του δείγματος, που ορίζεται ως UCS, σε Pa ή πολλαπλάσια του

P: το μέγιστο φορτίο πριν την αστοχία του δείγματος, σε N

A_0 : το αρχικό μέσο εμβαδό της επιφάνειας της βάσης του δείγματος, σε m.

Για την πλήρη αναφορά της μέτρησης UCS ενός υλικού, χρειάζονται οι εξής πληροφορίες:

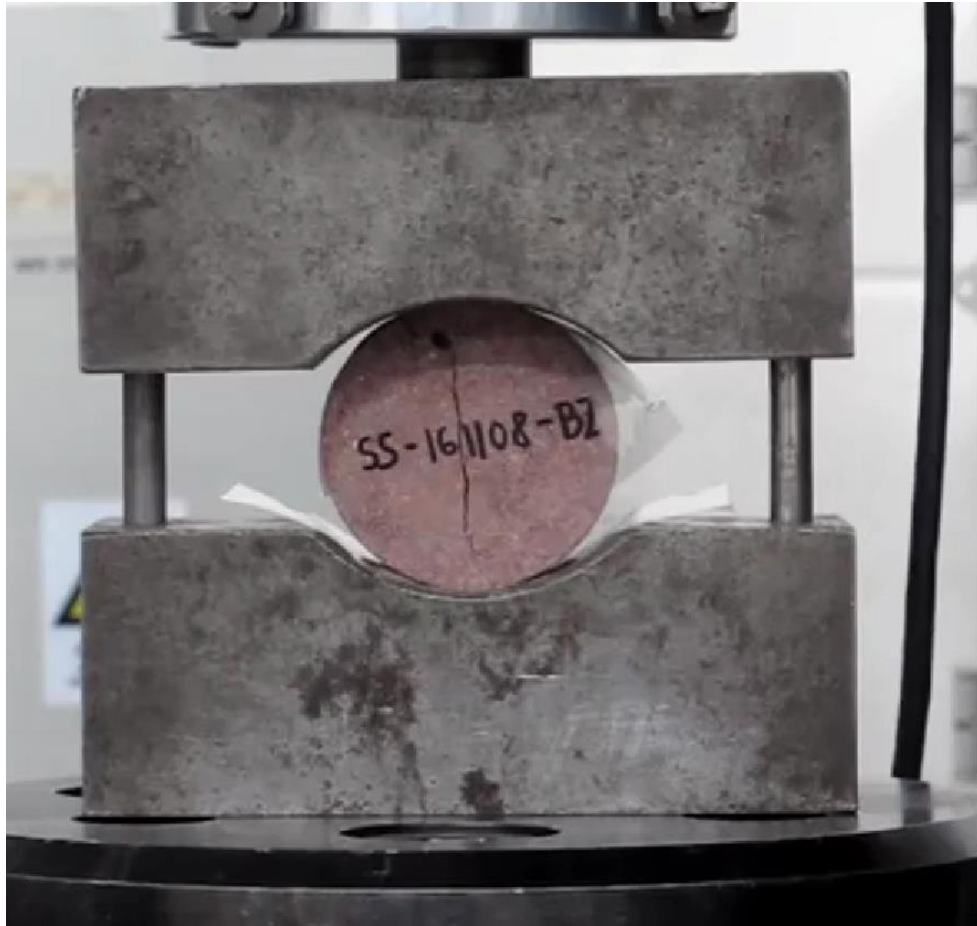
- a) Η πετρογραφική περιγραφή του υλικού.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

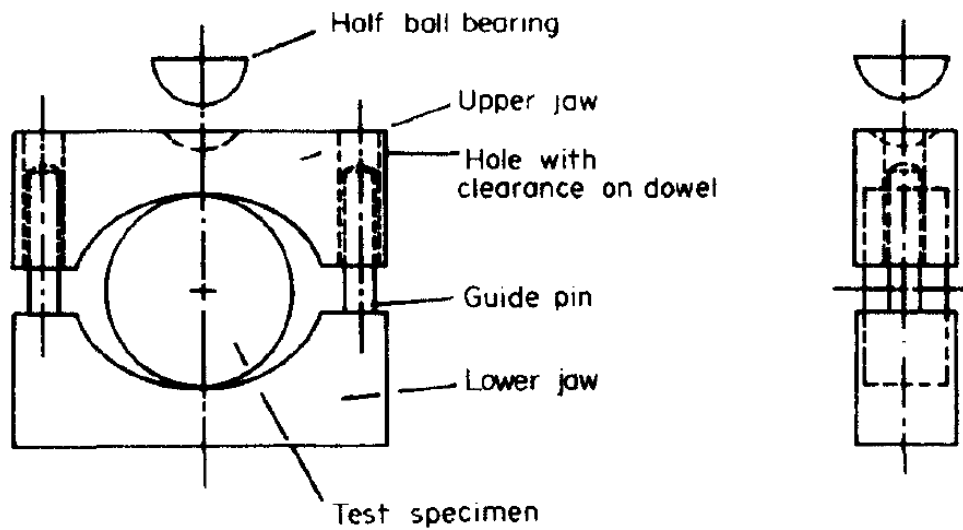
- b) Η κατεύθυνση της άσκησης του φορτίου σε σχέση με πιθανή ανισοτροπία του πετρώματος.
- c) Τα χαρακτηριστικά της δειγματοληψίας, συμπεριλαμβανομένης της γεωγραφικής τοποθεσίας, του βάθους και της κατεύθυνσης του πετρώματος, της ημερομηνίας και της μεθόδου δειγματοληψίας και του τρόπου και του περιβάλλοντος αποθήκευσης του πετρώματος μέχρι τη μέτρηση.
- d) Το πλήθος δειγμάτων που μετρήθηκαν.
- e) Το ύψος και η διάμετρος δείγματος.
- f) Η περιεχόμενη υγρασία και το ποσοστό κορεσμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.
- g) Η χρονική διάρκεια της διαδικασίας και ο ρυθμός αύξησης του φορτίου.
- h) Η ημερομηνία διεξαγωγής της δοκιμής και το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.
- i) Ο μηχανισμός αστοχίας του δείγματος.
- j) Οποιαδήποτε παρατήρηση ή φυσικό χαρακτηριστικό είναι διαθέσιμο, όπως ειδικό βάρος και πορώδες, και ο τρόπος που υπολογίστηκε.
- k) Η UCS για το κάθε δείγμα με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων μαζί με τον μέσο όρο τους. Ως μονάδα μέτρησης αντοχής θεωρείται το Pa και τα πολλαπλάσιά του.
- l) Σε περίπτωση που το δείγμα που εξετάζεται είναι εκτός προδιαγραφών, θα πρέπει να σημειώνονται οι αποκλίσεις από το πρότυπο.

3.2.2. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian Tensile Strength - BTS)

Σε πολλές περιπτώσεις, ως αντοχή ενός πετρώματος σε εφελκυσμό χρησιμοποιείται η BTS που υπολογίζεται με την έμμεση δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης. Η αρχή της δοκιμής βασίζεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα πετρώματα στα οποία ασκούνται τάσεις σε δύο άξονες, στον έναν άξονα θλιπτική και στον άλλον εφελκυστική, αστοχούνε εφελκυστικά όταν η τάση σε θλίψη είναι το πολύ τρεις φορές όση η τάση σε εφελκυσμό.



Εικόνα 3.7 - Εξοπλισμός για τον υπολογισμό της BTS. Πηγή: www.isrm.net.



Εικόνα 3.8 - Σχηματική απεικόνιση του εξοπλισμού της BTS. Πηγή: ISRM (2007).

Οι προδιαγραφές της ISRM (2007) που αναφέρονται σε αυτή τη μέθοδο είναι:

- a) Το δείγμα πρέπει να κοπεί σε σχήμα κυλινδρικού δίσκου και να ετοιμαστεί χρησιμοποιώντας καθαρό νερό. Η περιφέρεια του δίσκου πρέπει να είναι λεία ώστε οι επιφανειακές ανωμαλίες να μην υπερβαίνουν τα 0.025 mm. Οι βάσεις του δίσκου πρέπει να έχουν επιφανειακές ανωμαλίες χαμηλότερες των 0.25 mm ενώ πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στην περιφέρεια με ακρίβεια 0.25°.
- b) Αναφέρεται ο προσανατολισμός του δοκιμίου και η περιεχόμενη υγρασία.
- c) Η διάμετρος πρέπει να είναι τουλάχιστον 54 mm και το πάχος να είναι περίπου ίσο με τη διάμετρο
- d) Η περιφέρεια του δίσκου τυλίγεται με ταινία επικάλυψης.
- e) Η αύξηση του φορτίου γίνεται με ρυθμό τέτοιο ώστε το δείγμα να αστοχήσει εντός 15 έως 30 s. Προτείνεται ρυθμός αύξησης 200 N/s.
- f) Πρέπει να καταγραφεί το φορτίο κατά την πρώτη αστοχία, παρά το γεγονός ότι κάποια πετρώματα μπορούν να δέχονται αυξημένα φορτία μετά από το σημείο εκείνο.
- g) Προτείνεται η μέτρηση δέκα δειγμάτων.

Η συσκευή για τη δοκιμή αποτελείται από δύο χαλύβδινες σιαγόνες, των οποίων το εσωτερικό είναι διαμορφωμένο σε σχήμα ημικυλινδρικό και τοποθετούνται η μία απέναντι από την άλλη. Οι σιαγόνες διαθέτουν οδηγούς που κρατάνε τη συσκευή στην επιθυμητή θέση, ενώ επιτρέπουν μια σχετικά μικρή μεταξύ τους κίνηση. Ανάμεσα στις σιαγόνες τοποθετείται το δείγμα σε σχήμα δίσκου και σταθεροποιείται. Οι σιαγόνες πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η γωνία του τόξου επαφής να είναι περίπου 10°. Ο γενικός κανόνας που ακολουθείται είναι η ακτίνα καμπυλότητας των σιαγόνων να είναι 1.5 φορές μεγαλύτερη της ακτίνας του δίσκου, ενώ το πάχος τους να είναι 1.1 φορές το πάχος του δείγματος. Στην πάνω σιαγόνα είναι διαμορφωμένο ημισφαιρικό έδρανο διαμέτρου 25 mm. Το πάχος της ταινίας επικάλυψης είναι από 0.2 έως 0.4 mm. Πρέπει να χρησιμοποιείται μηχανισμός κατάλληλος για τη σταδιακή και απαραίτητη αύξηση του φορτίου. Στη συνέχεια θα πρέπει να καταγραφεί η τιμή του φορτίου στο σημείο αστοχίας, αν και προτείνεται η τακτική σημείωση φορτίου/παραμόρφωσης για να κατασκευαστεί το σχετικό διάγραμμα. Τέλος, για τον υπολογισμό της BTS χρησιμοποιείται η σχέση (3.11).

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{Dt} \quad (3.11)$$

όπου σ_t : η εφελκυστική τάση τη στιγμή της πρώτης αστοχίας, ορίζεται ως η BTS του υλικού, σε Pa ή πολλαπλάσιά του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

P: το φορτίο κατά την αστοχία, σε N

D: η διάμετρος του δείγματος, σε mm

t: το πάχος του δείγματος, σε mm.

Ο συντελεστής 0.636 υπολογίζεται προσεγγιστικά από το λόγο $2/\pi$.

Για την πλήρη παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μέτρησης, χρειάζονται οι παρακάτω πληροφορίες:

- a) Η πετρογραφική περιγραφή του πετρώματος.
- b) Η κατεύθυνση της άσκησης του φορτίου σε σχέση με πιθανές ανισοτροπίες του πετρώματος.
- c) Τα χαρακτηριστικά της δειγματοληψίας της γεωγραφικής τοποθεσίας, του βάθους και της κατεύθυνσης του πετρώματος, της ημερομηνίας και της μεθόδου δειγματοληψίας και του τρόπου και του περιβάλλοντος αποθήκευσης του πετρώματος μέχρι τη μέτρηση.
- d) Το πλήθος δειγμάτων που μετρήθηκαν.
- e) Το ύψος και η διάμετρος του δείγματος.
- f) Η περιεχόμενη υγρασία και το ποσοστό κορεσμού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.
- g) Η χρονική διάρκεια της διαδικασίας και ο ρυθμός αύξησης του φορτίου.
- h) Η ημερομηνία εκτέλεσης της δοκιμής και το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.
- i) Ο μηχανισμός αστοχίας του δείγματος.
- j) Οποιαδήποτε παρατήρηση ή φυσικό χαρακτηριστικό είναι διαθέσιμο, όπως ειδικό βάρος και πορώδες, και ο τρόπος που υπολογίστηκε.
- k) Η BTS για το κάθε δείγμα με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων μαζί με τον μέσο όρο τους. Ως μονάδα μέτρησης αντοχής θεωρείται το Pa και τα πολλαπλάσιά του.

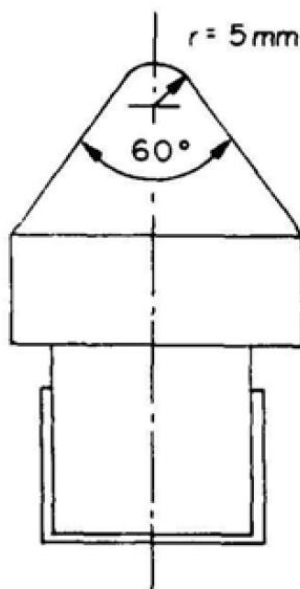
3.2.3. Δείκτης σημειακής αντοχής (Point Load Strength Index - PLI)

Ένας ακόμη δείκτης που αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων είναι ο δείκτης I_s , ή PLI, που βρίσκεται από τη δοκιμή σημειακής φόρτισης (Point Load strength test - δοκιμή PL). Η δοκιμή αυτή μοιάζει με αυτές των δοκιμών μέτρησης της UCS και της BTS, με τις κύριες διαφορές να είναι ότι στη δοκιμή PL μπορεί να γίνει μέτρηση σε κυλινδρικά δοκίμια, πρισματικά δοκίμια και δοκίμια ακανόνιστου σχήματος και ότι η άσκηση του φορτίου γίνεται από ζεύγος χαλύβδινων κώνων με σφαιρικά στρογγυλεμένες κορυφές, ο ένας απέναντι από τον άλλο (Nomikos, 2016). Η δοκιμή μπορεί να γίνει είτε εργαστηριακά είτε *in-situ*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Για τη δοκιμή, ο εξοπλισμός πρέπει να έχει σύστημα φόρτισης, σύστημα μέτρησης του φορτίου P και σύστημα μέτρησης της απόστασης D των δύο σημείων επαφής των κώνων με το δείγμα. Για το σύστημα φόρτισης:

- Η απόσταση μεταξύ των δύο άκρων συνήθως πρέπει να είναι 15 - 100 mm, με μεταβαλλόμενο μηχανισμό.
- Το φορτίο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορούν να αστοχήσουν ακόμη και πετρώματα υψηλής αντοχής.
- Οι άξονες των δύο κώνων πρέπει να έχουν κοινή διεύθυνση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της μέτρησης, με μέγιστη απόκλιση 0.2 mm.
- Η κορυφή των κώνων είναι πεπλατυσμένη με γωνία 60° και έχει σχήμα ημισφαιρίου με ακτίνα 5 mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Το υλικό τους είναι από χάλυβα ή καρβίδιο του βολφραμίου, δηλαδή σκληρό ώστε να παραμένουν άθικτα κατά τη δοκιμή.



Εικόνα 3.9 - Σχηματική απεικόνιση κώνου στη δοκιμή PL. Πηγή: ISRM (2007).

Για το σύστημα μέτρησης του φορτίου P :

- Πρέπει να μπορεί να υπολογιστεί το φορτίο P κατά την αστοχία του δείγματος.
- Η μέτρηση του P πρέπει να έχει περιθώριο σφάλματος έως το πολύ 5% της πραγματικής τιμής του P , ανεξάρτητα από το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος.
- Το σύστημα πρέπει να έχει αντίσταση σε υδραυλικούς αιφνιδιασμούς και δονήσεις για την ακριβή καταγραφή των τιμών.
- Η αστοχία γίνεται συνήθως απότομα και είναι σημαντικό να μετρηθεί το φορτίο στη μέγιστη τιμή του.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

Για τη σύστημα μέτρηση της απόστασης D:

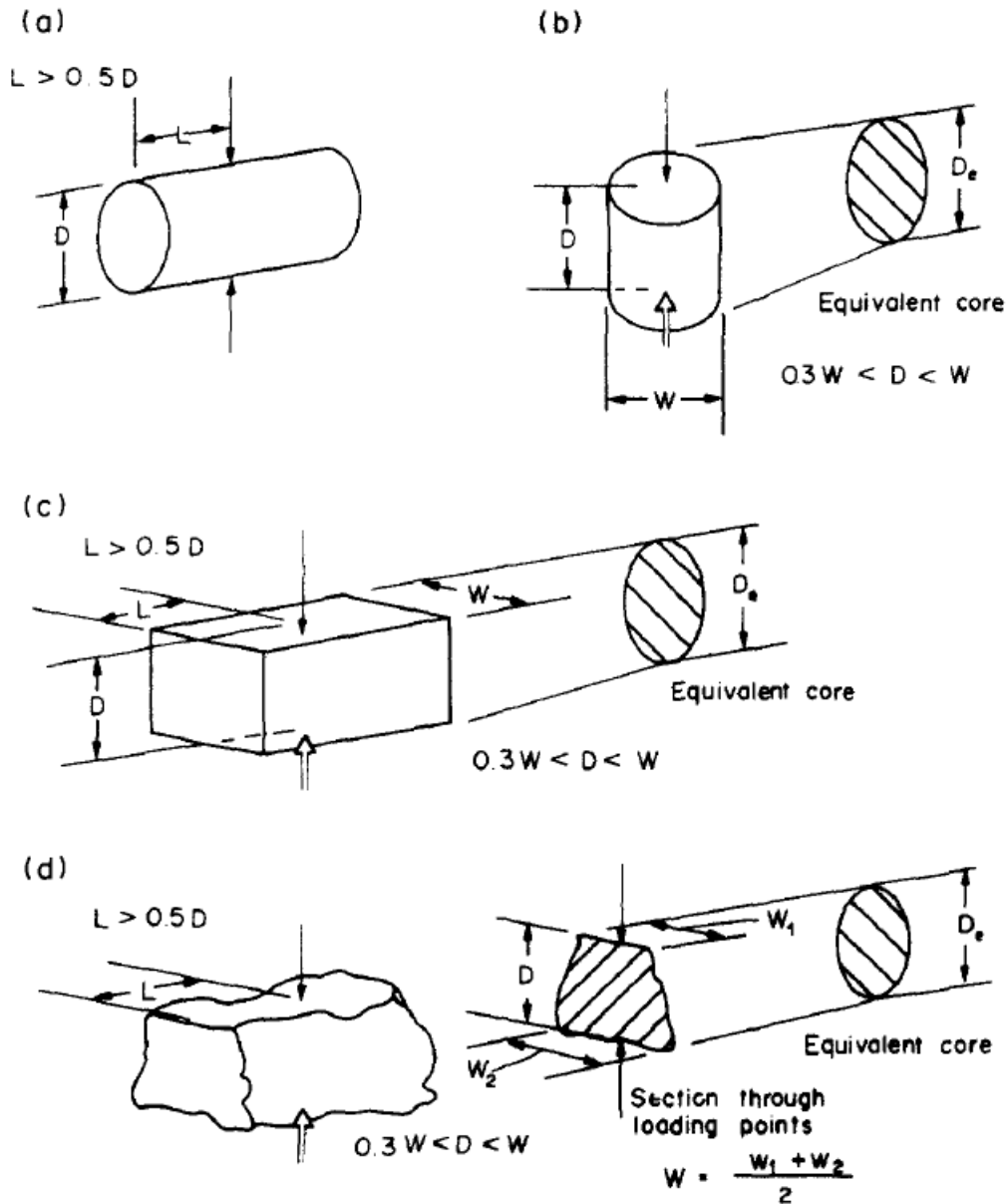
- a) Η μέτρηση της D πρέπει να έχει περιθώριο σφάλματος έως το πολύ 2% της πραγματικής απόστασης D, ανεξάρτητα από το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος.
- b) Το σύστημα πρέπει να έχει αντίσταση σε υδραυλικούς αιφνιδιασμούς και δονήσεις για την ακριβή καταγραφή των τιμών.
- c) Το σύστημα πρέπει να επιτρέπει τον έλεγχο της μηδενικής απόστασης D κατά την επαφή των κώνων.
- d) Για τα υπόλοιπα μεγέθη μήκους του δείγματος πέρα της απόστασης D χρησιμοποιείται παχύμετρο και βαθμονομημένος χάρακας.

Για την επιλογή του δείγματος λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Το δείγμα ορίζεται ως μια συλλογή δοκιμών παρόμοιας αντοχής ώστε να μετρηθεί η τιμή του PLI.
- Το δείγμα πρέπει να αποτελείται από επαρκές πλήθος δοκιμών κατάλληλων για τη δοκιμή.
- Τα δείγματα εξετάζονται ως προς την υγρασία είτε πλήρως κορεσμένα είτε στη φυσική υγρασία του πετρώματος.

Ο εξοπλισμός πρέπει να βαθμονομείται κατά περιόδους, χρησιμοποιώντας τυποποιημένα δείγματα γνωστών χαρακτηριστικών ώστε να ελέγχεται η καταγραφή των τιμών D και P.

Υπάρχουν τροποποιήσεις της δοκιμής ανάλογα με το σχήμα του δείγματος. Στην Εικόνα 3.10 φαίνονται οι διάφορες εκδοχές για τη γεωμετρία των δοκιμών και οι σχέσεις των διαστάσεών τους.



Εικόνα 3.10 - Πιθανά γεωμετρικά σχήματα δείγματος για τον υπολογισμό του PLI. a) Κυλινδρικό δοκίμιο, b) Δοκίμιο σχήματος δίσκου, c) Πρισματικό δοκίμιο, d) Δοκίμιο ακανόνιστου σχήματος. Πηγή: ISRM (2007).

Στην περίπτωση που το σχήμα του δείγματος είναι κύλινδρος, δηλαδή ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο της βάσης να είναι μεγαλύτερος από 1, εφαρμόζεται φόρτιση κάθετα στη διεύθυνση του άξονα στο κέντρο της βάσης:

- Τα δοκίμια πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα, ή περισσότερα σε περιπτώσεις που το πέτρωμα είναι ετερογενές ή ανισότροπο.
- Οι κώνοι τοποθετούνται κάθετα στη διεύθυνση του άξονα της βάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα (a) της Εικόνας 3.10. Η απόσταση L των σημείων επαφής των κώνων από την κάθε βάση του κυλίνδρου πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μισή απόσταση μεταξύ των δύο κώνων, δηλαδή $0.5D$.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

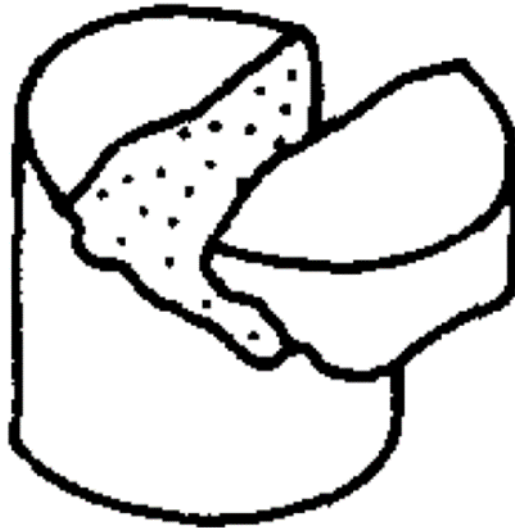
- c) Η απόσταση D υπολογίζεται με περιθώριο σφάλματος 2%.
- d) Το φορτίο ξεκινάει και αυξάνεται σταθερά με ρυθμό τέτοιο ώστε το δείγμα να αστοχήσει σε 10 έως 60 s. Στη συνέχεια μετريέται το μέγιστο φορτίο. Το δείγμα πρέπει να αστοχήσει και από τους δύο κώνους, ειδάλλως η μέτρηση θεωρείται άκυρη. Ένα παράδειγμα άκυρης μέτρησης φαίνεται στην Εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11 - Άκυρη δοκιμή για τη μέτρηση του PLI σε κυλινδρικό δοκίμιο κάθετα στη διεύθυνση του άξονα της βάσης. Πηγή: ISRM (2007).

Όταν το σχήμα του δοκιμίου είναι κύλινδρος, όμως με μήκος μικρότερο της διαμέτρου του, και τουλάχιστον όσο το 30% αυτής, τότε εφαρμόζεται η μέτρηση σε δίσκο με αξονική αστοχία, όπως φαίνεται στο σχήμα (b) της Εικόνας 3.10. Σημειώνεται ότι με αυτόν τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δοκίμια όσα έμειναν από τη μέτρηση με αστοχία κάθετα στη διεύθυνση του άξονα της βάσης και πληρούν τις προϋποθέσεις.

- a) Τα δείγματα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα, ή περισσότερα σε περιπτώσεις που το πέτρωμα είναι ετερογενές ή ανισότροπο.
- b) Το φορτίο εφαρμόζεται κάθετα στα επίπεδα των βάσεων, περνώντας από τον κεντρικό άξονα του κυλίνδρου.
- c) Η απόσταση D μεταξύ των άκρων υπολογίζεται με περιθώριο σφάλματος 2% και το πλάτος W , κάθετο στον άξονα του φορτίου, με περιθώριο σφάλματος 5%.
- d) Το φορτίο ξεκινάει και αυξάνεται σταθερά με ρυθμό τέτοιο ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε 10 έως 60 s. Στη συνέχεια μετριέται το μέγιστο φορτίο. Το δείγμα πρέπει να αστοχήσει και από τις δύο κωνικές άκρες, ειδάλλως η μέτρηση θεωρείται άκυρη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.12 - Άκυρη δοκιμή για τη μέτρηση του PLI σε κυλινδρικό δοκίμιο (δίσκο) παράλληλα στον άξονα του κέντρου των βάσεων. Πηγή: ISRM (2007).

Τέλος, μπορούν να μετρηθούν οι αντοχές δοκιμίων ακανόνιστου σχήματος και πρισματικών δοκιμίων, μεγέθους 50 ± 35 mm, όπως αυτά φαίνονται στα σχήματα (c) και (d) της Εικόνας 3.10, με προσεγγίσεις, λαμβάνοντας υπόψη κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχήματός τους.

- Τα δοκίμια έχουν σχέση D προς πλάτος W μεταξύ 0.3 και 1, προτιμάται να τείνει στη μονάδα. Η απόσταση L των βάσεων του δείγματος από τον άξονα επαφής με τους κώνους πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με $0.5 W$. Τα δοκίμια μπορούν είτε να επιλεγούν σε αυτές τις διαστάσεις είτε να μορφοποιηθούν ώστε να έχουν κατάλληλο σχήμα για δοκιμή.
- Τα δοκίμια πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα, ή περισσότερα σε περιπτώσεις που το πέτρωμα είναι ετερογενές ή ανισότροπο.
- Οι κώνοι εφάπτονται στα σημεία του δοκιμίου με τη μικρότερη δυνατή διάσταση στην κεντρική περιοχή του δείγματος.
- Μετριέται η απόσταση D με περιθώριο σφάλματος 2% και το πλάτος W με περιθώριο σφάλματος 5%. Όταν οι πλάγιες απέναντι πλευρές δεν είναι παράλληλες, δηλαδή η τομή του δείγματος έχει σχετικά τραπέζιο σχήμα, το πλάτος υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των πλατών της πάνω και της κάτω επιφάνειας.
- Το φορτίο ξεκινάει και αυξάνεται σταθερά με ρυθμό τέτοιο ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει σε 10 έως 60 s. Στη συνέχεια μετριέται το μέγιστο φορτίο. Το

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

δοκίμιο πρέπει να αστοχήσει και από τα δύο σημεία επαφής με τους κώνους, ειδάλλως η μέτρηση θεωρείται άκυρη.

Όπως αναφέρεται σε όλες τις περιπτώσεις, τα δείγματα ενδέχεται να είναι ανισότροπα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εκτελούνται δύο μετρήσεις, κάθετα και παράλληλα ως προς την ανισοτροπία. Ο στόχος είναι να μετρηθεί η μέγιστη και η ελάχιστη αντοχή του δείγματος, ανάλογα με την κατεύθυνση άσκησης του φορτίου.

Για τον υπολογισμό του I_s χρησιμοποιείται το φορτίο P που μετρήθηκε κατά την αστοχία και το μέγεθος D_e που ορίζεται ως η ισοδύναμη διάμετρος κυλίνδρου. Δηλαδή:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}, \text{ σε } Pa \text{ ή πολλαπλάσιά του} \quad (3.12)$$

όπου:

$$D_e^2 = D^2, \text{ όταν γίνεται μέτρηση με αστοχία στη διάμετρο} \quad (3.13)$$

και

$$D_e^2 = \frac{4}{\pi} A, \text{ στις υπόλοιπες περιπτώσεις} \quad (3.14)$$

με A τη μικρότερη επιφάνεια τομής ανάμεσα στα σημεία επαφής:

$$A = WD \quad (3.15)$$

όπου W το πλάτος όπως μετριέται σε κάθε περίπτωση.

Οι μετρήσεις γενικά γίνονται στο S.I., όμως τα μεγέθη μήκους και επιφάνειας συνήθως αναφέρονται σε κλίμακα χιλιοστών, δηλαδή mm και mm² αντίστοιχα.

Ο I_s είναι ο δείκτης αντοχής σε διάμετρο D_e μεταξύ των σημείων επαφής των κώνων με το δοκίμιο όπως υπολογίστηκε κατά τη δοκιμή. Κατά την ISRM (2007), οι συγκρίσεις των τιμών πρέπει να γίνονται σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου περίπου 50 mm (NX), όμως αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα δοκιμών σε διάφορες διαμέτρους απαιτείται διόρθωση του δείκτη I_s , ο οποίος είναι

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

συνάρτηση της ισοδύναμης διαμέτρου D_e του δοκιμίου. Έτσι, μπορεί να γίνει τροποποίηση του δείκτη I_s στο εξεταζόμενο δοκίμιο με διάμετρο D_e στον δείκτη $I_{s(50)}$ που θα είχε υπολογιστεί για διαμετρική δοκιμή σε δοκίμιο διαμέτρου 50 mm. Ο διορθωμένος δείκτης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.16).

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (3.16)$$

όπου ο δείκτης διόρθωσης F μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.17):

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (3.17)$$

Ο $I_{s(50)}$ μπορεί να υπολογιστεί απευθείας μέσω της δοκιμής σε δείγματα με απόσταση D κοντά στα 50 mm. Έτσι, σε περιπτώσεις όπως της τυπικής διαμέτρου πυρήνα NX 54 mm μπορεί να θεωρηθεί η ίδια τιμή που θα υπολογιστεί, ή να διορθωθεί με τον προαναφερθέντα τρόπο με παρατήρηση μικρής διαφοράς. Τέλος, σε περίπτωση που τα δείγματα έχουν διαφορετικές τιμές διαμέτρου D_e , έχει παρατηρηθεί πως σε διάγραμμα $\log P - \log(D_e)^2$ προκύπτει ευθεία γραφική παράσταση. Μπορεί, λοιπόν, να υπολογιστεί γραφικά η P_{50} βρίσκοντας το σημείο στην ευθεία με τετμημένη $D_e^2 = 2500$ mm και να υπολογιστεί ο $I_{s(50)}$ με τη σχέση (3.12).

Η μέση τιμή $I_{s(50)}$ όλων των δοκιμών του πετρώματος βρίσκεται εξαιρώντας τις δύο υψηλότερες και τις δύο χαμηλότερες τιμές από τις 10 ή περισσότερες μετρήσεις. Σε περίπτωση λιγότερων μετρήσεων εξαιρούνται μόνο η υψηλότερη και η χαμηλότερη τιμή.

Για την πλήρη αναφορά στη δοκιμή δειγμάτων ενός πετρώματος, θα πρέπει να αναφέρεται το είδος της μέτρησης σχετικά με την αστοχία του. Ακόμα, θα πρέπει να αναφέρονται:

- a) Το πλήθος των δειγμάτων, η περιοχή δειγματοληψίας, το είδος του πετρώματος και η κατεύθυνση ανομοιομορφιών στη μακροσκοπική κλίμακα του πετρώματος.
- b) Το ποσοστό υγρασίας κατά τη μέτρηση.
- c) Πληροφορίες αναφορικά με το ποια δοκίμια είχαν φόρτιση κάθετα, παράλληλα, τυχαία ή σε άγνωστη κατεύθυνση σχετικά με επίπεδα αδυναμίας.
- d) Ένας πίνακας με τις τιμές των P , D , I_s , W , D_e , F και $I_{s(50)}$, στις περιπτώσεις που υπάρχουν, για κάθε δείγμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Για τα ανισότροπα πετρώματα χρειάζεται ένας πίνακας με τις αναλυτικές τιμές για κάθε διεύθυνση που εξετάστηκε..

Κεφάλαιο 4: Απόξεση των υλικών

4.1. Ορισμός

Σύμφωνα με τον Zum Gahr (1987), η φθορά απόξεσης είναι η εκτόπιση υλικού που προκαλείται από την παρουσία σκληρών σωματιδίων ανάμεσα σε δύο επιφάνειες, ή ενσωματωμένων σε τουλάχιστον μία από τις δύο, οι οποίες βρίσκονται σε σχετική μεταξύ τους κίνηση, ή από την παρουσία σκληρών ανωμαλιών σε τουλάχιστον μια από τις δύο σχετικώς κινούμενες επιφάνειες.

4.1.1. Αντίσταση στην απόξεση

Οι δοκιμές απόξεσης μετρούν την αντίσταση των πετρωμάτων στη φθορά (ISRM, 2007). Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν φθορά η οποία προκαλείται στα πετρώματα από υλικά με ισχυρή ικανότητα απόξεσης, φθορά από επαφή με μέταλλα και φθορά από την επαφή ανάμεσα στα πετρώματα. Οι δοκιμές απόξεσης μπορούν, ακόμα, να μετρήσουν τη φθορά που προκαλείται στα μεταλλικά εξαρτήματα που έρχονται σε επαφή με πετρώματα, όπως στις εξορύξεις με μηχανικά μέσα. Οι δοκιμές, σύμφωνα με την ISRM (2007) χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Δοκιμές φθοράς απόξεσης με πρόσκρουση: Η φθορά προκαλείται από τη σχετική κίνηση του πετρώματος και την πρόσκρουσή του σε κάποια μεταλλική επιφάνεια. Ένα παράδειγμα είναι η δοκιμή Los Angeles, στην οποία χρησιμοποιείται ένας κύλινδρος συγκεκριμένων διαστάσεων, μέσα στον οποίο εισάγεται το πέτρωμα συγκεκριμένου μεγέθους τεμαχίων και βάρους και χαλύβδινες κρουστικές σφαίρες. Ο κύλινδρος περιστρέφεται και μετά από συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών σταματάει. Ο δείκτης της φθοράς είναι το ποσοστό του θραυσμένου υλικού μετά το πέρας των περιστροφών. Άλλες γνωστές δοκιμές είναι η δοκιμή με αμμοβολή και η δοκιμή Burbank.
2. Δοκιμές φθοράς απόξεσης με άσκηση πίεσης: Σε αυτή την κατηγορία το δείγμα εξαναγκάζεται σε φθορά με πίεση πάνω σε άλλο υλικό. Τέτοιες δοκιμές είναι πιο στοχευμένες εφόσον η αύξηση της πίεσης διογκώνει το μέγεθος της φθοράς απόξεσης. Μια τέτοια δοκιμή είναι η δοκιμή Doggy κατά την οποία ένα δείγμα πετρώματος πιέζεται πάνω σε περιστροφικό δίσκο χάλυβα που καλύπτεται με σκληρό υλικό, όπως άμμος χαλαζία. Ο χαλαζίας προσβάλλει το πέτρωμα μέσω της ισχυρής ικανότητας απόξεσής του και μετριέται η φθορά του δείγματος. Ακόμα, σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται και δοκιμές διάτρησης του πετρώματος.
3. Δοκιμές με απόξεση από υλικά παρόμοιας σκληρότητας: Γενικά η φθορά λόγω απόξεσης που προκαλείται σε ένα πέτρωμα από ένα πιο σκληρό πέτρωμα είναι πιο υψηλή από ότι η φθορά που θα προκαλούσε το πέτρωμα σε επαφή με το ίδιο, η οποία δεν είναι μηδενική. Η φθορά αυτή υπολογίζεται με δοκιμές που

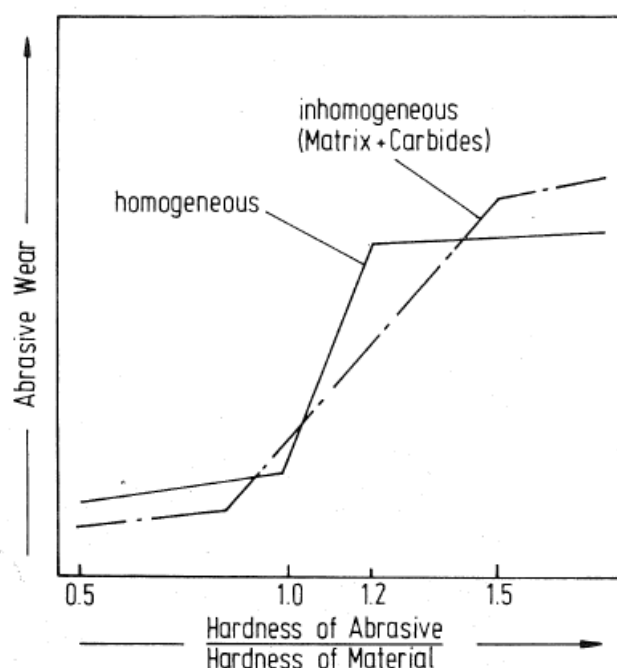
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

περιλαμβάνουν μόνο το ίδιο το πέτρωμα και δεν συνηθίζονται. Μια γνωστή δοκιμή είναι η δοκιμή Deval, η οποία έχει παρόμοια λογική με τη δοκιμή Los Angeles, με τη διαφορά ότι μέσα στον κύλινδρο εισάγεται μόνο το πέτρωμα και όχι οι χαλύβδινες κρουστικές σφαίρες. Με την περιστροφή τα τεμάχια του πετρώματος συγκρούονται μεταξύ τους και υπολογίζεται η φθορά απόξεσης αυτού του είδους.

4.1.2. Αποξεστική ικανότητα ενός πετρώματος

Οι δοκιμές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μετράνε την αντίσταση ενός υλικού στην απόξεση. Παρά τη χρησιμότητα της μέτρησης της αντίστασης σε απόξεση ενός πετρώματος, από τη σκοπιά της εξόρυξης των πετρωμάτων με μηχανικά μέσα έχει πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα η εξέταση της ικανότητας του πετρώματος να προκαλεί φθορά. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι δυνατή η επιλογή του κοπτικού, δηλαδή του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κοπτικό άκρο, σε αντίθεση με το πέτρωμα, το οποίο είναι δεδομένο.

Ένας γενικός κανόνας για την ποιοτική εκτίμηση της ικανότητας απόξεσης με βάση τη σχετική σκληρότητα δύο υλικών είναι πως η φθορά αυξάνεται απότομα όταν ο λόγος της σκληρότητας του αποξεστικού υλικού προς τη σκληρότητα του φθειρόμενου είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τη μονάδα (Zum Gahr, 1987), όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.1.



Διάγραμμα 4.1 - Σχέση του λόγου αντοχής δύο υλικών με την φθορά απόξεσης. Πηγή: Zum Gahr (1987).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.1, η φθορά φαίνεται να ισορροπεί σε ένα υψηλό επίπεδο όταν η σκληρότητα ομογενούς αποξεστικού υλικού είναι κατά 20% υψηλότερη από αυτή του φθειρόμενου υλικού, ενώ για ανομοιογενές πέτρωμα με περιεχόμενα αποξεστικά ορυκτά η φθορά σταματάει να αυξάνει απότομα όταν η σκληρότητα είναι κατά 50% υψηλότερη.

Η μελέτη αυτού του τομέα είναι μείζονος σημασίας, δεδομένου ότι ο μέσος χάλυβας έχει χαμηλότερη σκληρότητα από τον ορυκτό χαλαζία, και ο χαλαζίας υπολογίζεται να είναι σε περιεκτικότητα 12% στο φλοιό της Γης. Αυτό σημαίνει ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η φθορά στα κοπτικά εργαλεία από χάλυβα θα είναι αυξημένη λόγω της ικανότητας απόξεσης των περιεχόμενων ορυκτών του πετρώματος. Σε επόμενη παράγραφο γίνεται ανάλυση στις δοκιμές προσδιορισμού της ικανότητας απόξεσης με ποσοτικές σχέσεις και αναφορά σε διεθνείς βάσεις σύγκρισης.

4.1.3. Σκληρότητα των κοπτικών άκρων

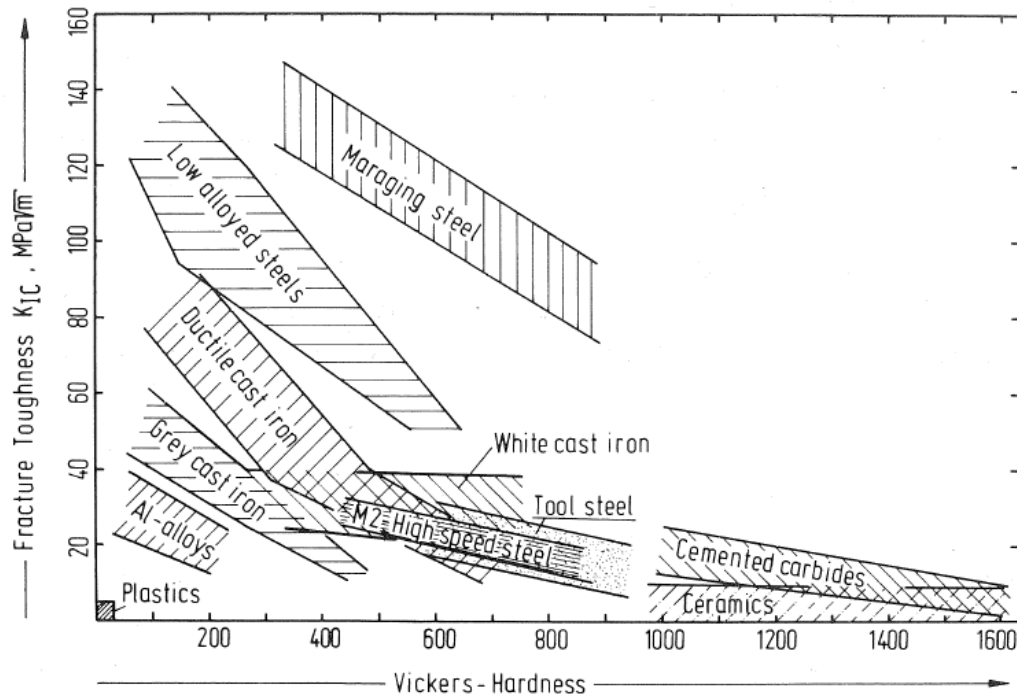
Στην εξόρυξη πετρωμάτων με μηχανικά μέσα τα υλικά που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για τα κοπτικά άκρα ήταν χάλυβες σχετικά υψηλής αντοχής και σκληρότητας. Ωστόσο, λόγω εμφάνισης σκληρών, αποξεστικών ορυκτών και πετρωμάτων κατά την εξόρυξη, η φθορά σε κοπτικά από χάλυβα πολλές φορές είναι αυξημένη. Τις τελευταίες δεκαετίες, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των κεραμικών υλικών, είναι διαδεδομένη η χρήση του καρβιδίου του βολφραμίου (WC) ως υλικό κοπτικών άκρων. Στον Πίνακα 4.1 δίνεται η σκληρότητα Vickers και Rosiwal των ορυκτών της κλίμακας Mohs (Deketh, 1995).

Mineral	Hardness			
	Vickers	Mohs	Rosiwal	
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	

Πίνακας 4.1 - Η σκληρότητα Vickers και Rosiwal των ορυκτών της κλίμακας Mohs. Πηγή: Deketh (1995).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1, ο χαλαζίας (Quartz) έχει σκληρότητα περίπου 1000 HV, ενώ οι περισσότερες κατασκευές από χάλυβα σπανίως ξεπερνούν την τιμή αυτή. Στο Διάγραμμα 4.2 δίνεται η αντοχή διαφόρων υλικών, κυρίως χαλύβων και κεραμικών, σε σχέση με τη σκληρότητα Vickers τους.



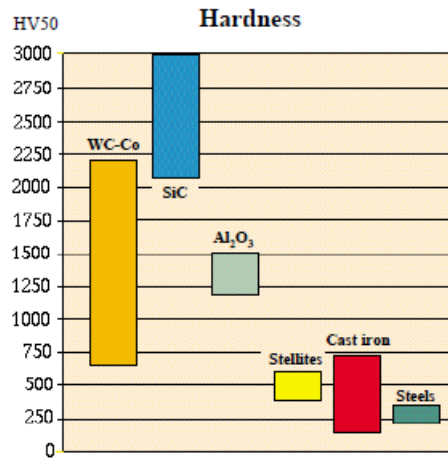
Διάγραμμα 4.2 - Η σκληρότητα Vickers για διάφορα υλικά εργαλείων εξόρυξης. Πηγή: Zum Gahr (1987).

Στο Διάγραμμα 4.2, φαίνεται η καταλληλότητα των κεραμικών υλικών για χρήση σε κοπτικά άκρα. Τα κεραμικά υλικά μπορούν να παρουσιάσουν πολύ υψηλές τιμές σκληρότητας (έως και >2000 HV), όμως η ψαθυρή τους συμπεριφορά πολλές φορές δεν επιτρέπει την ευρεία χρήση τους. Παρόλα αυτά, γίνονται συνεχώς έρευνες για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους και την ευρύτερη αξιοποίησή τους στην κατασκευή κοπτικών άκρων.

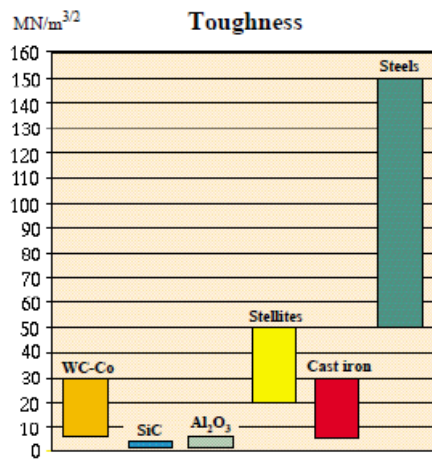
Το καρβίδιο του βολφραμίου έχει αποδειχθεί ικανό να χρησιμοποιηθεί σε εξορυκτικές εργασίες. Μια τεχνική για την αποτελεσματική χρήση του είναι με την προσθήκη κοβαλτίου στη χημική του σύσταση (Sandvik, nd). Με αυτόν τον τρόπο, το καρβίδιο διατηρεί υψηλή αντίσταση στη φθορά και πολύ υψηλές τιμές σκληρότητας, ενώ αποκτά και την απαιτούμενη δυσθραυστότητα, ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε κοβάλτιο και τη μέθοδο κρυστάλλωσης των κόκκων του. Ακόμα, διατηρεί επαρκώς τη σκληρότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

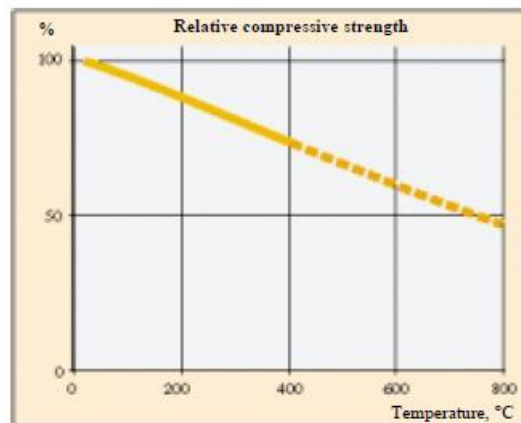
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



Εικόνα 4.1 - Σκληρότητα Vickers του WC-Co του οίκου Sandvik. Πηγή: Sandvik (nd).



Εικόνα 4.2 - Δυσθραυστότητα του WC-Co του οίκου Sandvik σε MN/m^{3/2}. Πηγή: Sandvik (nd).



Διάγραμμα 4.3 - Προσεγγιστική πτώση της θλιπτικής αντοχής του WC-Co του οίκου Sandvik με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πηγή: Sandvik (nd).

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

4.2. Δοκιμές προσδιορισμού της ικανότητας απόξεσης των υλικών

Στην εξόρυξη με μηχανικά μέσα οι μηχανισμοί φθοράς μπορεί να ποικίλουν, όμως ο μηχανισμός που ενδιαφέρει τον μηχανικό τόσο στον τεχνικό σχεδιασμό όσο και στην εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας ενός συγκεκριμένου έργου είναι η απόξεση, η οποία αναφέρεται στην προσβολή των κοπτικών από αποξεστικά ορυκτά του πετρώματος. Δεν είναι σπάνιο να παρατηρείται υψηλή φθορά των κοπτικών ακόμα και σε σχηματισμούς χαμηλής αντοχής, η οποία κατεξοχήν οφείλεται στην παρουσία ορυκτών σκληρότερων από το υλικό των κοπτικών άκρων. Προκύπτει, συνεπώς, η ανάγκη για την εκτίμηση της αναμενόμενης φθοράς προκειμένου να εξεταστεί η καταλληλότητα και η αναμενόμενη επίδοση συγκεκριμένου εξοπλισμού. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν δοκιμές για τη μέτρηση της αποξεστικής ικανότητας ενός πετρώματος, εκ των οποίων η δοκιμή CERCHAR χρησιμοποιείται ευρέως και έχει τυποποιηθεί. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τόσο η δοκιμή CERCHAR όσο και άλλες δοκιμές που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία.

4.2.1. Δοκιμή pin-on-disc και συντελεστής φθοράς F του Schimazek

Μια μέθοδος μέτρησης της αποξεστικής ικανότητας ενός πετρώματος είναι η δοκιμή pin-on-disc (στυλίσκου επί δίσκου) που ανέπτυξε ο Schimazek (Verhoef, 1997). Για τη διεξαγωγή της δοκιμής χρησιμοποιείται ένα περιστρεφόμενο τραπέζι λειάνσης, πάνω στο οποίο τοποθετείται δίσκος του εξεταζόμενου πετρώματος. Η επιφάνεια του δίσκου λειαίνεται με σκόνη 240 SiC (καρβίδιο του πυριτίου). Ο στυλίσκος τυπικά είναι από σφηνοειδή χάλυβα St 50 με αντοχή σε εφελκυσμό 700 MPa που παραμορφώνεται εύκολα, έχει 10 mm διάμετρο, έχει κολουροκωνικό άκρο γωνίας 90° πεπλατυσμένο στα 0.3 mm, στερεώνεται πάνω του στατικό φορτίο μάζας 4.5 kg και στη συνέχεια τοποθετείται στο κέντρο του δίσκου. Ο δίσκος περιστρέφεται και ο στυλίσκος απομακρύνεται από το κέντρο του διαγράφοντας πάνω του σπειροειδή τροχιά. Η ακτινική απόσταση μεταξύ διαδοχικών γραμμών της σπείρας είναι 0.5 mm και οι συνολικές περιστροφές είναι 100. Ο ρυθμός περιστροφής είναι σταθερός στις 25 rpm. Η συνολική απόσταση που χαράσσει ο στυλίσκος (το μήκος της σπείρας) είναι 16 m. Κατά τη διαγραφή της σπείρας, λαμβάνει χώρα απώλεια μάζας του στυλίσκου, η οποία καταγράφεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 10 φορές και υπολογίζεται η μέση τιμή της απώλειας μάζας. Η επιλογή μαλακού χάλυβα για τη δοκιμή γίνεται ώστε να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα της δοκιμής.

Ακόμα, ο Verhoef (1997) αναφέρει πως οι Schimazek and Knatz έκαναν τη δοκιμή σε τεχνητό πέτρωμα από σκυρόδεμα που εμπειρείχε χαλαζία σε διάφορες περιεκτικότητες και μέγεθος κόκκων. Από τις μετρήσεις τους προέκυψε μια γραμμική σχέση της φθοράς με το γινόμενο της ισοδύναμης περιεκτικότητας χαλαζία, της μέσης διαμέτρου των κόκκων και της αντοχής σε εφελκυσμό. Το γινόμενο αυτό το ονόμασαν “συντελεστή φθοράς F” και ορίζεται από τη σχέση (4.1).

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

$$F = \frac{(Qtz_{eq} * \Phi) * BTS}{100} \quad (N/mm) \quad (4.1)$$

όπου Qtz_{eq} : η ισοδύναμη περιεκτικότητα χαλαζία με χρήση της κλίμακας Rosiwal
 Φ : η μέση διάμετρος των κόκκων των ορυκτών σε mm
 BTS: Brazilian Tensile Strength σε MPa ή N/mm².

Η ισοδύναμη περιεκτικότητα χαλαζία είναι μια αναγωγή της περιεκτικότητας των σκληρών/αποξεστικών ορυκτών σε περιεκτικότητα χαλαζία, με χρήση του λόγου της σκληρότητας του εξεταζόμενου ορυκτού προς τη σκληρότητα του χαλαζία στην κλίμακα Rosiwal. Ένα παράδειγμα τιμών πετρώματος δίνεται στον Πίνακα 4.2 και με χρήση της εξίσωσης (4.1) δίνει: $F = [(20 \cdot 1 \cdot 0.5) + (30 \cdot 0.35 \cdot 0.4) + (20 \cdot 0.03 \cdot 0.1) + (25 \cdot 0.04 \cdot 0.05) + (5 \cdot 0 \cdot 0.05)] \cdot (15/100) = 2.1 \text{ N/mm}$.

<i>Mineral</i>	<i>Volume (%)</i>	<i>Grain size (mm)</i>	<i>Rosiwal Hardness (Table 10.4)</i>
<i>Quartz</i>	20	0.5	100
<i>Feldspar</i>	30	0.4	35
<i>Calcite</i>	20	0.1	3
<i>Clay minerals</i>	25	<0.05	4
<i>Porosity</i>	5	<0.05	0
	100%	<i>BTS rock (saturated) = 15 MPa</i>	

Πίνακας 4.2 - Παράδειγμα χαρακτηριστικών πετρώματος για τον υπολογισμό του συντελεστή φθοράς F του Schimazek. Πηγή: Verhoef (1997).

Η μέση διάμετρος των κόκκων ενός ορυκτού μπορεί να γίνει με χρήση πετρογραφικού μικροσκοπίου με τη μέθοδο γραμμικής τομής, όπου σε παράλληλες γραμμές στην επιφάνεια της πετρογραφικής τομής του πετρώματος μετρείται το μέσο μήκος των κόκκων του ορυκτού πάνω στις γραμμικές τομές. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα, συνήθως γύρω στο 1.4, και σημειώνεται η μέση διάμετρος των κόκκων του ορυκτού.

Κάθε επί μέρους συστατικό του πετρώματος έχει το δικό του γινόμενο ισοδύναμης περιεκτικότητας χαλαζία και μέσης διαμέτρου κόκκων. Για τον υπολογισμό του συντελεστή φθοράς υπολογίζεται το άθροισμα των γινομένων όλων των ορυκτών και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τη BTS του πετρώματος, όπως στο παράδειγμα του Πίνακα 4.2. Σημειώνεται ότι το πορώδες ενός πετρώματος δε λαμβάνεται υπόψη αφού έχει μηδενική σκληρότητα. Ακόμα, τα μη αποξεστικά ορυκτά, δηλαδή αυτά με χαμηλή τιμή σκληρότητας στην κλίμακα Rosiwal, έχουν συνήθως μικρή επιρροή στον συντελεστή φθοράς, ιδιαίτερα όταν είναι σε χαμηλά ποσοστά μέσα στο πέτρωμα. Έτσι, συχνά επαρκεί η εξέταση μόνο των αποξεστικών ορυκτών για τον υπολογισμό του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

συντελεστή φθοράς. Μια ποσοτική κατηγοριοποίηση των τιμών του συντελεστή φθοράς φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

F-value Schimazek	Abrasiveness
$F < 0.05 \text{ N/mm}$	low abrasiveness
$0.05 < F < 0.1$	abrasive
$0.1 < F < 0.5$	highly abrasive
$F > 0.5 \text{ N/mm}$	extremely abrasive

Πίνακας 4.3 - Κατηγοριοποίηση της αποξεστικής ικανότητας των πετρωμάτων με βάση τον συντελεστή φθοράς F του Schimazek. Πηγή: Verhoef (1997).

Επιπλέον, ο Schimazek παρατήρησε την αύξηση της φθοράς των κοπτικών με την αύξηση της θερμοκρασίας τους λόγω της αύξησης της ταχύτητας κοπής (Hughes, 1986). Κατέληξε σε μια σχέση που υπολογίζει την κρίσιμη ταχύτητα με χρήση του συντελεστή φθοράς. Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται η ταχύτητα κοπής πάνω από την οποία η φθορά στο κοπτικό άκρο γίνεται υπερβολική, και η εξίσωση υπολογισμού της είναι η σχέση (4.2).

$$u_{crit} = \frac{k}{e^F} \quad (4.2)$$

όπου u_{crit} : η κρίσιμη ταχύτητα κοπής σε m/s

k : σταθερά που εξαρτάται από το σχήμα του κοπτικού άκρου και από την κρίσιμη θερμοκρασία του υλικού του

e : ο αριθμός Euler (≈ 2.718)

F : ο συντελεστής φθοράς σε kp/cm ($1 \text{ kp/cm} \approx 0.981 \text{ N/mm} \leftrightarrow 1 \text{ N/mm} \approx 1.02 \text{ kp/cm}$).

4.2.2. Δείκτης αποξεστικής ικανότητας του πετρώματος (Rock Abrasivity Index - RAI)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο RAI (Plinninger et al., 2002) έχει ομοιότητες με το συντελεστή φθοράς F του Schimazek, με τη διαφορά ότι για να υπολογιστεί ο F λαμβάνεται υπόψη η αντοχή σε εφελκυσμό BTS του πετρώματος, ενώ για τον RAI χρησιμοποιείται η αντοχή σε θλίψη UCS, δηλαδή υπολογίζεται από τη σχέση (4.3).

$$RAI = \frac{(Qtz_{eq} * \Phi) * UCS}{100} \quad (N/mm) \quad (4.3)$$

όπου UCS: η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη, σε MPa ή N/mm².

Έχει παρατηρηθεί μια συσχέτιση των τιμών RAI και CERCHAR Abrasivity Index (CAI), η οποία μπορεί να παραστεί γραφικά με την εξίσωση (4.4) που κατασκεύασε ο Schumacher (Plinninger, 2010):

$$CAI = 0.9\sqrt[3]{RAI} \quad (4.4)$$

4.2.3. Νορβηγικές δοκιμές

Στο Νορβηγικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας (National Institute of Norway / Norges Tekniske Høgskole - NTH), κατά την περίοδο 1958-1961, αναπτύχθηκε μια δοκιμή για την εκτίμηση της διατρησιμότητας ενός πετρώματος με κρουστοπεριστροφικό διατρητικό (Selmer-Olsen and Lien, 1960). Με την απορρόφηση του ινστιτούτου στο Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας (Norwegian University of Science and Technology / Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet - NTNU) και, στη συνέχεια, σε συνεργασία του πανεπιστημίου με το Ίδρυμα Βιομηχανικών και Τεχνικών Ερευνών (Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning - SINTEF), η δοκιμή αναπτύχθηκε στη σύγχρονη μορφή της, η οποία είναι γνωστή ως δοκιμή διατρησιμότητας NTNU/SINTEF.

Οι Selmer-Olsen and Blindheim (1970) υπολογίζουν τον Δείκτη Ρυθμού Διάτρησης (Drilling Rate Index - DRI) με βάση δύο εργαστηριακές δοκιμές, τη δοκιμή της τιμής ψαθυρότητας (S₂₀) (Matern and Hjelm, 1943) και τη δοκιμή Sievers (SJ) σε δοκιμή διάτρηση σε μικρή κλίμακα (miniature drill test) (Sievers, 1950).

Τα μοντέλα πρόβλεψης της επίδοσης και υπολογισμού του κόστους σε εξορυκτικές εργασίες τόσο με διάτρηση και χρήση εκρηκτικών υλών, όσο και με χρήση μηχανικών μέσων αναπτύσσονται με τη συσχέτιση εργαστηριακών δοκιμών και *in-situ* χαρακτηριστικών του πετρώματος με μετρήσεις σε πραγματικά έργα. Όσο αντλούνται νέα στοιχεία από σχετικά έργα, τα μοντέλα συνεχώς ενημερώνονται και αναθεωρούνται (Dahl et al., 2010). Η χρήση των μετρήσεων της δοκιμής

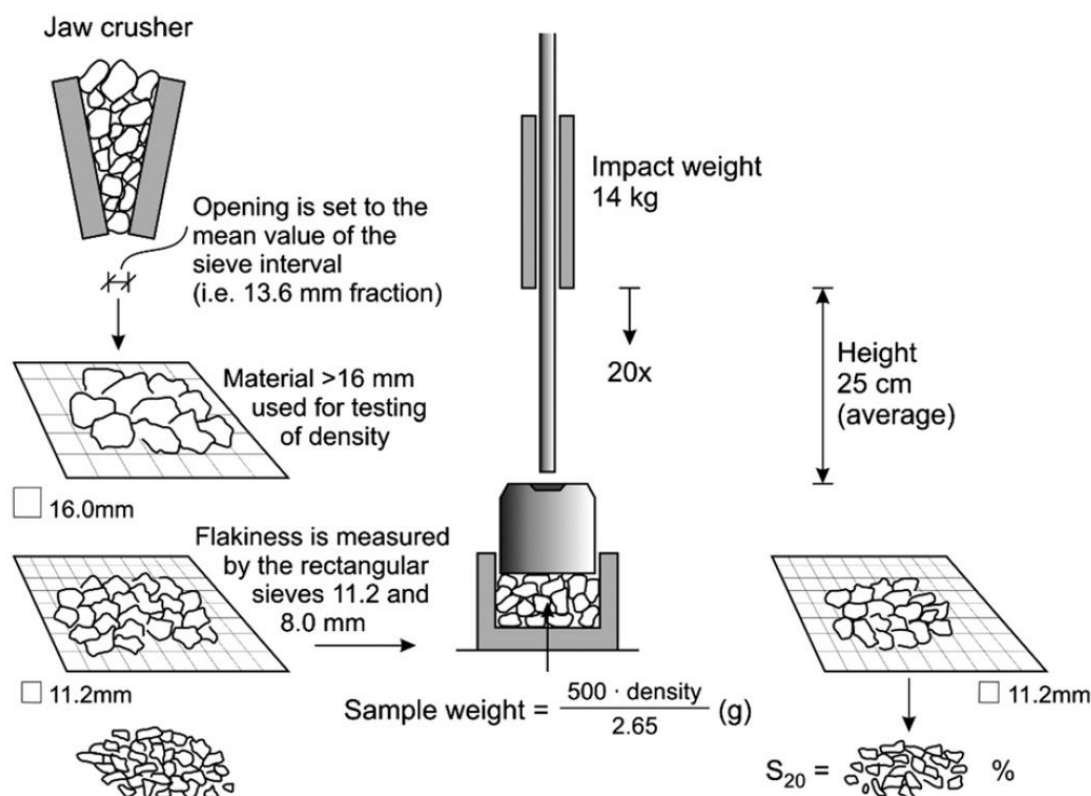
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

NTNU/SINTEF έχει διευρυνθεί τα τελευταία χρόνια. Παρότι οι δείκτες διάτρησης της μεθόδου κατοχυρώθηκαν σχετικά πρόσφατα (Dahl et al., 2010), η κατηγοριοποίηση με βάση τους δείκτες DRI, BWI (Bit Wear Index) και CLI (Cutter Life Index) είναι διαθέσιμη από το 1998 (Bruland, 1998), όμως οι πληροφορίες γύρω από τη χρήση τους ήταν περιορισμένες και δυσεύρετες.

4.2.3.1. Δείκτης ψαθυρότητας S_{20}

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό του δείκτη ψαθυρότητας S_{20} (παραλλαγή της μεθόδου των Matern and Hjelm, 1943) φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 - Διαδικασία για τον υπολογισμό της τιμής S_{20} . Πηγή: Dahl et al. (2012).

- Το πέτρωμα θραύεται σε θραυστήρα σιαγόνων με άνοιγμα εξόδου ίσο με το μέσο όρο του αρχικού και του τελικού κόσκινου. Στο τυπικό μοντέλο ισούται με 13.6 mm που αντιστοιχεί σε κόσκινα με άνοιγμα 16 mm και 11.2 mm αντίστοιχα.
- Το θραυσμένο πέτρωμα περνάει από κοσκίνιση και ταξινομείται στα κλάσματα +16 mm, -16 +11.2 mm και -11.2 mm. Τα κλάσματα -16 +11.2 mm και -11.2 +8 mm χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του δείκτη πλακοειδούς (flakiness). Το κλάσμα +16 mm χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας d του πετρώματος.

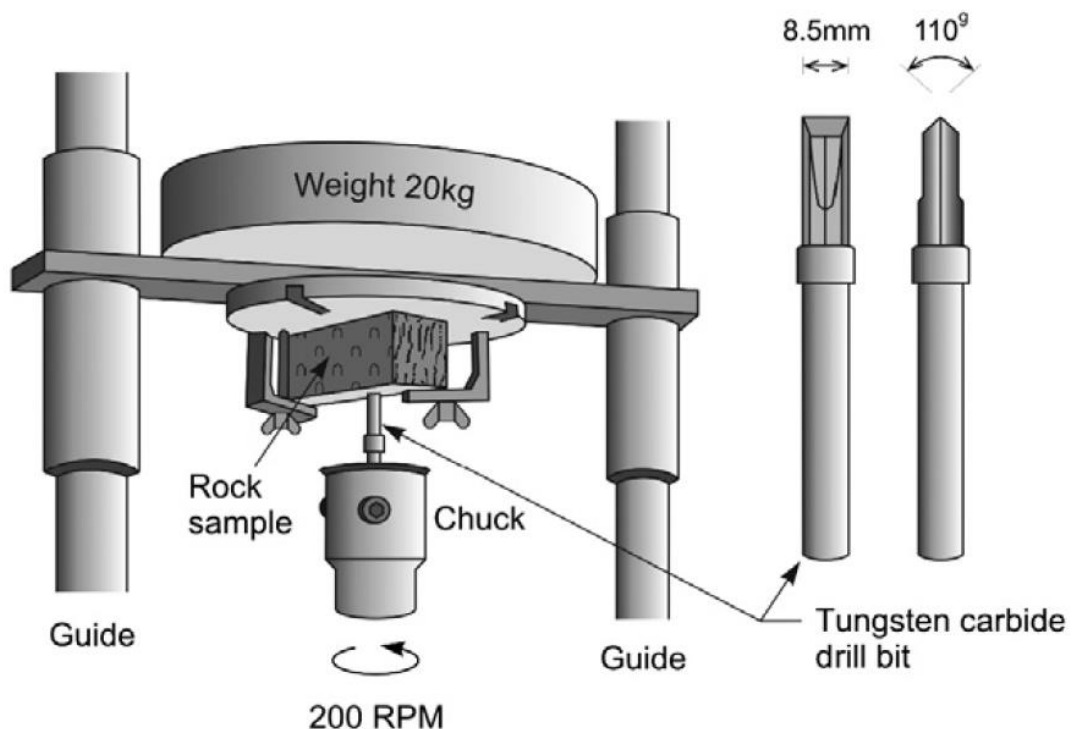
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Το ενδιάμεσο κλάσμα $-16 +11.2$ mm χρησιμοποιείται στη διάταξη κρούσης. Σε δοκιμαστικό δοχείο τοποθετείται ποσότητα ενδιάμεσου κλάσματος αρχικής μάζας ίσης με $500 \cdot d/2.65$ σε g.
- Πάνω από το δοχείο σε ύψος 25 cm αφήνεται ελεύθερο φορτίο μάζας 14 kg μέχρι να προσκρούσει στα θραύσματα εντός του δοχείου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 20 φορές.
- Μετά τις 20 επαναλήψεις, το πέτρωμα του δοχείου κοσκινίζεται σε κλάσμα -11.2 mm και στη συνέχεια μετριέται το βάρος του κλάσματος.
- Το S_{20} ισούται με τον λόγο της μάζας του κλάσματος προς την αρχική μάζα του πετρώματος μέσα στο δοχείο.

4.2.3.2. Sievers' J-Value (SJ)

Η SJ είναι ένα μέτρο για την επιφανειακή σκληρότητα ή αντίσταση του πετρώματος στη διείδυση.



Εικόνα 4.4 - Δοκιμή για τη μέτρηση της τιμής SJ. Πηγή: Dahl et al. (2012).

Η πρότυπη δοκιμή για τη μέτρησή της έχει τα ακόλουθα βήματα:
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

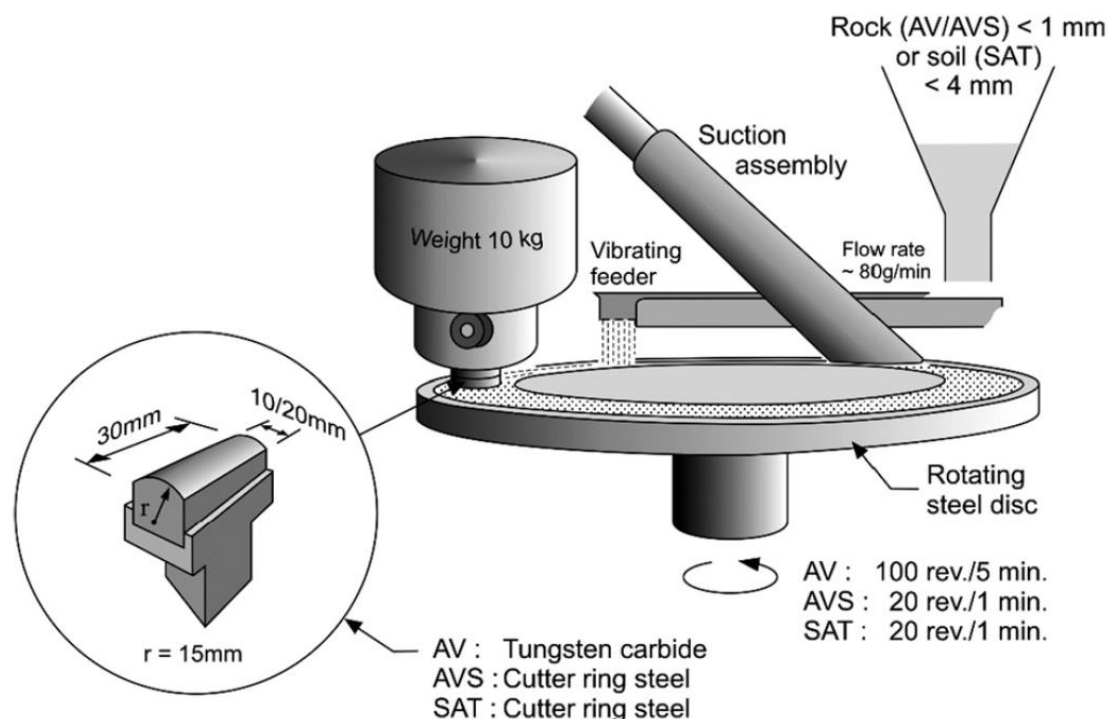
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Μορφοποιείται δείγμα πετρώματος ώστε να έχει δύο παράλληλα επίπεδα, συνήθως σχεδόν κυλινδρικού-δισκοειδούς σχήματος. Τα επίπεδα τέμνουν κάθετα τις ανομοιομορφίες που μπορεί να έχει το πέτρωμα.
- Το δείγμα συγκρατείται σε φορέα που κινείται ελεύθερα κατακόρυφα και στερεώνεται σε επαφή πάνω στην αιχμή κοπτικού άκρου από καρβίδιο του βολφραμίου με γεωμετρία που φαίνεται στην Εικόνα 4.4.
- Πάνω στο δείγμα στερεώνεται στατικό φορτίο μάζας 20 kg.
- Το κοπτικό άκρο περιστρέφεται για 200 πλήρεις περιστροφές και διεισδύει στο δείγμα.
- Η τιμή SJ είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού άκρου σε μονάδες 0.1 mm (δηλαδή 1 mm = 10 μονάδες SJ).
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνήθως από 4 έως 8 φορές, εκτός αν η μορφολογία του πετρώματος είναι τέτοια ώστε να χρειάζεται περισσότερες μετρήσεις.
- Η τελική τιμή SJ του πετρώματος βρίσκεται από τον μέσο όρο των τιμών SJ όλων των μετρήσεων.

Εδώ σημειώνεται πως σε 3036 μετρήσεις της βάσης δεδομένων της NTNU/SINTEF, η χαμηλότερη τιμή SJ που έχει καταγραφεί είναι 0.5 σε χαλαζίτη και η υψηλότερη 260 σε αργιλικό σχιστόλιθο.

4.2.3.3. Abrasion Value (AV) και Abrasion Value Cutting Steel (AVS)

Οι δοκιμές για την εύρεση των τιμών AV και AVS χρησιμοποιούν τον ίδιο εξοπλισμό. Μια ακόμα παραλλαγή είναι η SAT (Soil Abrasion Test), η οποία είναι δοκιμή προσαρμοσμένη για εδαφικούς σχηματισμούς σε πολφό ή αφρό. Η δοκιμή για την AV και την AVS, όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 4.5, είναι η εξής:



Εικόνα 4.5 - Δοκιμή υπολογισμού των AV, AVS και SAT. Πηγή: Dahl et al. (2012).

- Ένας χαλύβδινος δίσκος στερεώνεται οριζόντια με δυνατότητα περιστροφής σε 20 rpm. Ο δίσκος έχει διάμετρο 318.3 mm, δηλαδή περιφέρεια 1 m.
- Στην άκρη του δίσκου στερεώνεται πεπλατυσμένο κυλινδρικό δείγμα από καρβίδιο του βολφραμίου (AV) ή από χάλυβα δίσκου κοπής (AVS, SAT) σε γραμμική επαφή κάθετα στον χαλύβδινο δίσκο. Κατά την περιστροφή του δίσκου, το δείγμα διαγράφει δακτύλιο πάνω στον δίσκο.
- Το πεπλατυσμένο κυλινδρικό δείγμα, όπως αυτό περιγράφεται στην Εικόνα 4.5, έχει ύψος 30 mm, πάχος από 10 έως 20 mm και ακτίνα 15 mm. Πάνω στο δείγμα τοποθετείται στατικό φορτίο μάζας 10 kg.
- Μπροστά από το δείγμα τοποθετείται δονούμενη χοάνη τροφοδοσίας του πετρώματος, το οποίο συνίσταται να προέρχεται από το τελικό κλάσμα της δοκιμής ψαθυρότητας S_{20} για καλύτερη συσχέτιση των τιμών. Το πέτρωμα εισέρχεται σε κοκκομετρία < 1 mm για τις μετρήσεις των AV και AVS (< 4 mm σε SAT) με ρυθμό τροφοδοσίας περίπου 80 g/min.
- Ο δίσκος περιστρέφεται 100 πλήρεις περιστροφές σε 5 min για την AV και 20 πλήρεις περιστροφές σε 1 min για την AVS.
- Μετριέται η απώλεια μάζας του δείγματος σε g.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από 2 έως 4 φορές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- Οι AV/AVS είναι η μέση τιμή των απωλειών που μετρήθηκαν σε όλες τις επαναλήψεις.

Σημειώνεται πως αν η μέθοδος εφαρμοστεί με σωστό τρόπο, οι απώλειες μεταξύ των επαναλήψεων μιας δοκιμής έχουν συνήθως μικρή διακύμανση, έως 5 g. Στη βάση δεδομένων του NTNU/SINTEF, σε 2621 μετρήσεις, οι ελάχιστες τιμές ήταν 0.0 σε ασβεστόλιθο (AV/AVS) και οι μέγιστες τιμές ήταν 116.0 (AV) και 68.5 (AVS) σε χαλαζίτη.

Οι δοκιμές κατά NTNU/SINTEF και η εύρεση των δεικτών S_{20} , SJ, AV και AVS γίνονται με σκοπό τον χαρακτηρισμό του πετρώματος ως προς την αποξεστική του ικανότητα, την επιφανειακή σκληρότητα και την ψαθυρότητα. Η κατηγοριοποίηση σε κάθε χαρακτηριστικό έγινε από πληθώρα δοκιμών όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7, στους οποίους αναγράφεται και το αθροιστικό ποσοστό των δοκιμών της κάθε μεθόδου.

Classification of rock brittleness, or the ability to be crushed by repeated impacts.

Category - brittleness	S_{20} -value (%)	Cumulative percentage (%)
Extremely high	≥ 66.0	95-100
Very high	60.0-65.9	85-95
High	51.0-59.9	65-85
Medium	41.0-50.9	35-65
Low	35.0-40.9	15-35
Very low	29.1-34.9	5-15
Extremely low	≤ 29.0	0-5

Πίνακας 4.4 - Κατηγοριοποίηση της ψαθυρότητας με βάση τον δείκτη S_{20} . Πηγή: Dahl et al. (2012).

Classification of rock surface hardness, or resistance to indentation.

Category - surface hardness	SJ value (mm/10)	Cumulative percentage (%)
Extremely high	≤ 2.0	0-5
Very high	2.1-3.9	5-15
High	4.0-6.9	15-35
Medium	7.0-18.9	35-65
Low	19.0-55.9	65-85
Very low	56.0-85.9	85-95
Extremely low	≥ 86.0	95-100

Πίνακας 4.5 - Κατηγοριοποίηση της σκληρότητας της επιφάνειας με βάση τον δείκτη SJ. Πηγή: Dahl et al. (2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Classification of rock abrasion or the ability to induce wear on tungsten carbide.

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 4.6 - Κατηγοριοποίηση της φθοράς απόξεσης σε καρβίδιο του βολφραμίου με βάση τον δείκτη AV. Πηγή: Dahl et al. (2012).

Classification of rock abrasion or the ability to induce wear on cutter steel.

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

Πίνακας 4.7 - Κατηγοριοποίηση της φθοράς απόξεσης σε χάλυβα με βάση τον δείκτη AVS. Πηγή: Dahl et al. (2012).

4.2.4. Δοκιμή αποξεστικότητας κατά CERCHAR και Δείκτης CAI

Η δοκιμή CERCHAR για τον προσδιορισμό της αποξεστικότητας ενός πετρώματος αναπτύχθηκε αρχικά από το εργαστήριο του κέντρου μελετών και έρευνας ανθρακωρυχείων της Γαλλίας (laboratoire du Centre d'Études et Recherches des CHARbonnages de France - CERCHAR), από όπου πήρε και το όνομά της. Η δοκιμή αρχικά γινόταν με βάση το Γαλλικό πρότυπο AFNOR NF P 94-430-1 (2000), στη συνέχεια με το πρότυπο ASTM D7625-10 (2010), πλέον, όμως το πρότυπο που ακολουθείται είναι αυτό της ISRM (2015). Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιούνται δύο τύποι εξοπλισμού: ο εξοπλισμός που αρχικώς αναπτύχθηκε στο CERCHAR (Valantin, 1973) και ο τροποποιημένος κατά West (1989). Οι δύο τύποι έχουν ομοιότητες, αλλά έχουν και κάποιες σημαντικές διαφορές, όπως στον τρόπο λειτουργίας του εξοπλισμού, στα χαρακτηριστικά της χαλύβδινης ακίδας και στον

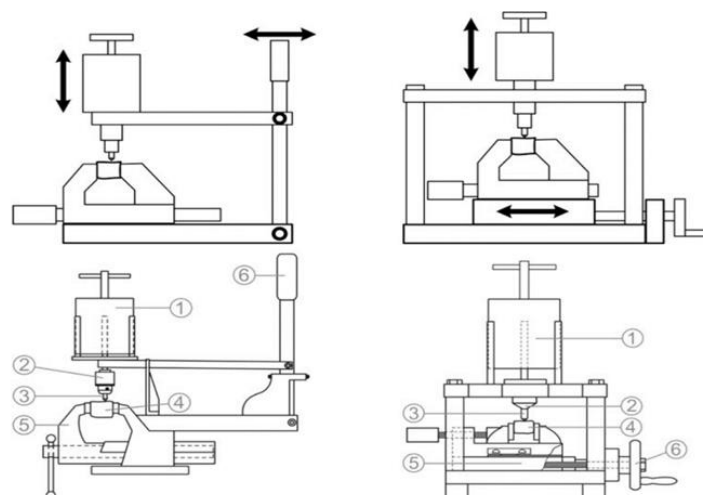
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

τρόπο προετοιμασίας του πετρώματος, όπως συνοψίζονται και από τους Plinninger et al. (2003).

Στη δοκιμή CERCHAR μετρείται η φθορά της αιχμής μιας ακίδας χάλυβα σκληρότητας HRC 55 (κλίμακα Rockwell). Το δείγμα του πετρώματος, με σύνηθες σχήμα κυκλικού δίσκου, συγκρατείται σφιχτά στον εξοπλισμό. Η ακίδα πιέζεται με προσοχή στην επιφάνεια του δείγματος, εφαρμόζεται επί αυτής στατικό κάθετο φορτίο 70 N και εκτελείται χάραξη μήκους 10 mm στην επιφάνεια του πετρώματος. Μετά τη χάραξη, υπολογίζεται η διάμετρος της πεπλατυσμένης επιφάνειας της αιχμής της ακίδας χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο με ακρίβεια τουλάχιστον 0.01 mm. Τέλος, υπολογίζεται ο αδιάστατος δείκτης αποξεστικής ικανότητας CERCHAR (CERCHAR Abrasivity Index - CAI) πολλαπλασιάζοντας τη διάμετρο σε mm με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων επί 10.

Στον τύπο του εξοπλισμού που αναπτύχθηκε στο CERCHAR γίνεται χάραξη με την ακίδα να κινείται πάνω στο δείγμα, διαγράφοντας χάραξη μήκους 10 mm σε 1 ± 0.5 s. Μια βασική διαφορά τον τύπο του εξοπλισμού κατά West είναι πως η ακίδα είναι σταθερή και το δείγμα κινείται από κάτω της, διαγράφοντας τη χάραξη μήκους 10 mm σε 10 ± 2 s. Τα σχέδια των δύο τύπων φαίνονται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6 - Οι δύο βασικοί τύποι του εξοπλισμού για τη μέτρηση του CAI. Πηγή: ISRM (2015).

Στα αριστερά είναι ο αρχικός τύπος από το CERCHAR και στα δεξιά είναι το διαμορφωμένο σχέδιο του West. Και στα δύο σχήματα φαίνονται:

1. Το στατικό φορτίο
2. Η συγκράτηση της ακίδας
3. Η ακίδα
4. Το δείγμα
5. Η συγκράτηση του δείγματος
6. Ο μηχανισμός χάραξης

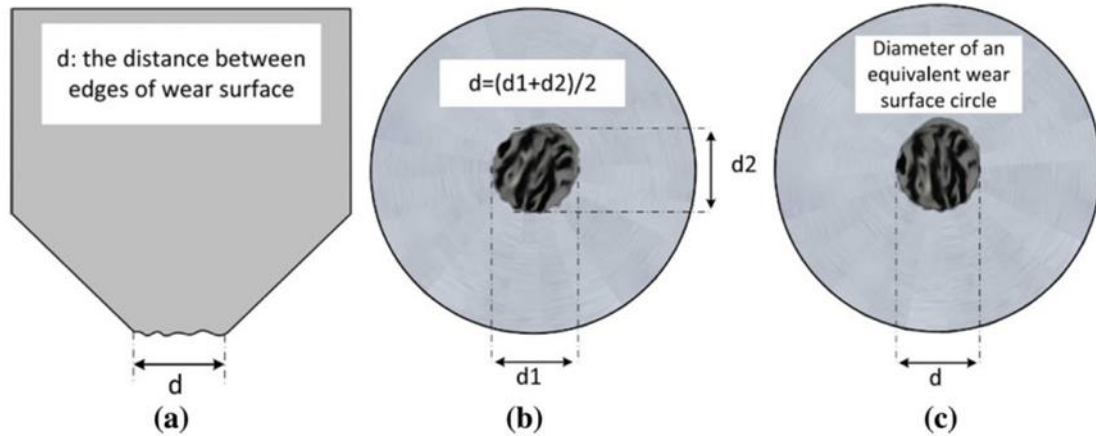
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σύμφωνα με το πρότυπο της ISRM, η ακίδα πρέπει να κατασκευάζεται από χάλυβα κατεργασμένο σε σκληρότητα HRC 55 ± 1 , όπως είναι ο χάλυβας με κράμα χρωμίου-βαναδίου. Η διάμετρος της ακίδας πρέπει να είναι τουλάχιστον 6 mm και το μήκος της τέτοιο ώστε κατά τη διάρκεια της δοκιμής το ορατό μέρος, δηλαδή το τμήμα προς το πέτρωμα, να είναι 15 mm. Η αιχμή έχει κωνικό σχήμα γωνίας 90° . Πριν την επαναχρησιμοποίησή της, η κάθε ακίδα ακονίζεται ξανά και η γεωμετρία της αιχμής της ελέγχεται σε μικροσκόπιο. Η μορφοποίηση πρέπει να γίνεται με ψιλόκοκκο λειαντικό ώστε να μη μένουν ανωμαλίες στην επιφάνεια της ακίδας. Ακόμη, κατά το τρώξιμο πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλο ψυκτικό ρευστό ώστε να μη μεταβάλλεται η σκληρότητα της ακίδας λόγω υψηλών θερμοκρασιών.

Το δείγμα του πετρώματος συνήθως είναι δισκοειδές, αλλά μπορεί να είναι και σε ακανόνιστο σχήμα. Προτιμάται η χρήση δειγμάτων από πετρώματα που έχουν θραυστεί πρόσφατα. Τα δείγματα μπορεί να προέρχονται είτε από δείγματα άλλων εργαστηριακών δοκιμών, όπως της δοκιμής Brazilian, είτε να παρασκευαστούν με χρήση δίσκων κοπής διαμαντιού με ψύξη από νερό. Το δείγμα μπορεί να έχει τη φυσική του υγρασία, να είναι αποξηραμένο ή να έχει ξηραθεί σε κλίβανο. Στη χάραξη η ακίδα δεν πρέπει να συναντάει ορατούς πόρους. Παρότι δεν υπάρχει σύσταση για το μέγεθος των κόκκων, αν υπάρχουν κόκκοι με διάμετρο μεγαλύτερη από 2 mm προτείνεται υψηλότερο πλήθος δοκιμών. Το μέγεθος της επιφάνειας του δείγματος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει πέντε χαράξεις, με την κάθε μια να απέχει από την άκρη του δείγματος και από κάθε άλλη τουλάχιστον 5 mm. Σημειώνεται πως για πετρώματα με σχιστότητα, στρωμάτωση και άλλα χαρακτηριστικά ανισοτροπίας, προτείνεται η χάραξη να γίνει σε σχέση με την κυρίαρχη μακροσκοπική εμφάνιση του πετρώματος. Σε κάθε δοκιμή εκτελούνται τουλάχιστον πέντε χαράξεις στο δείγμα, κάθε φορά με νέα ή με τροχισμένη και ελεγμένη ακίδα.

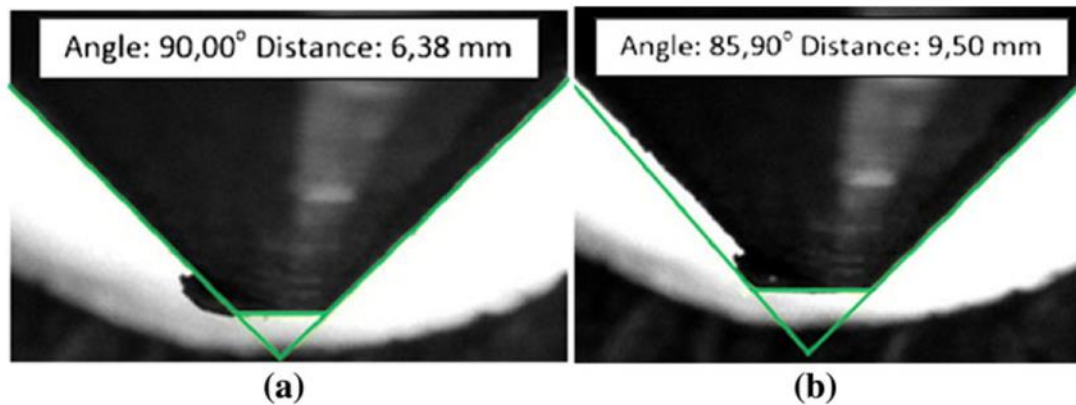
Ο υπολογισμός της φθοράς και κατ' επέκταση του CAI γίνεται με τη μέτρηση της διαμέτρου της πεπλατυσμένης επιφάνειας της ακίδας μετά τη χάραξη. Όπως είναι αντιληπτό, η πεπλατυσμένη επιφάνεια δεν είναι πάντα ένας τέλειος κυκλικός δίσκος, οπότε λαμβάνονται υπόψη κάποιες οδηγίες για τη σωστή καταγραφή της διαμέτρου. Αρχικά, το μικροσκόπιο που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις των διάφορων μηκών πρέπει να έχει ελάχιστη μεγέθυνση $25\times$, με ανάλυση μέτρησης τουλάχιστον 0.005 mm για να γίνεται καταγραφή στο πλησιέστερο σημείο σε 0.01 mm. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν είτε στην κάτοψη της επιφάνειας είτε σε πλάγια όψη, η οποία και προτιμάται. Στην πλάγια όψη προτείνεται να γίνουν τέσσερις μετρήσεις με διαφορά μεταξύ τους 90° και τις μετρήσεις να είναι κάθετες και παράλληλες στην κατεύθυνση της χάραξης. Στην κάτοψη χρειάζονται δύο μετρήσεις για τις κάθετες μεταξύ τους διαμέτρους. Σε κάθε περίπτωση ο μέσος όρος χρησιμοποιείται ως η πραγματική διάμετρος της επιφάνειας φθοράς. Με χρήση ψηφιακού εξοπλισμού σε κάτοψη μπορεί να αρκείσει μία μέτρηση, η οποία δίνει τη διάμετρο της αντίστοιχης επιφάνειας ενός κυκλικού δίσκου. Οι παραπάνω μετρήσεις φαίνονται ποιοτικά στην Εικόνα 4.7.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



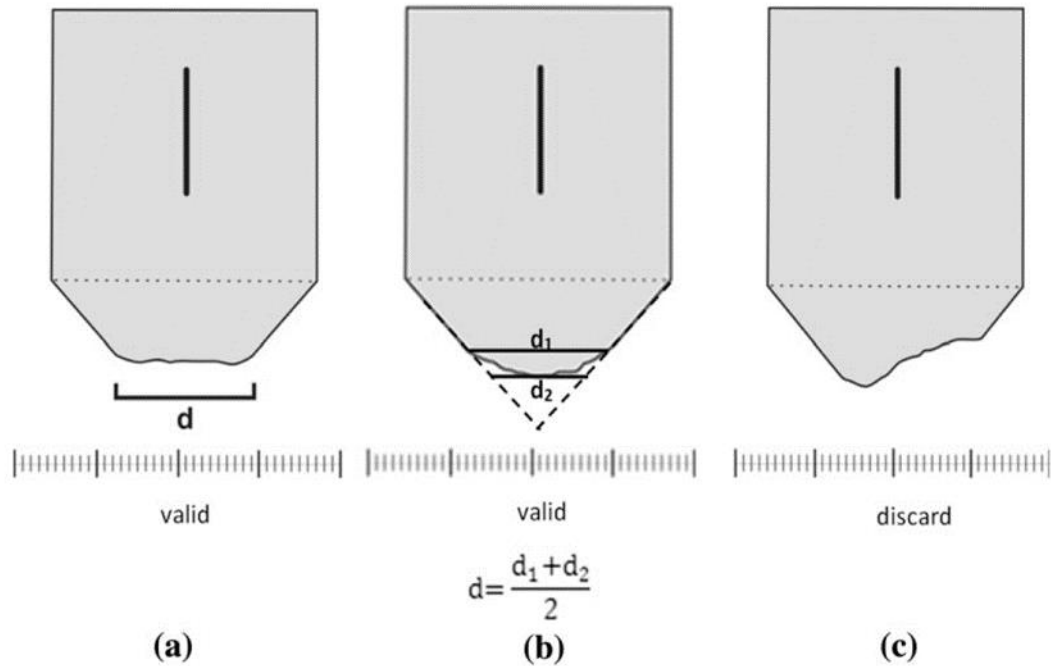
Εικόνα 4.7 - Μέτρηση της διαμέτρου d : a) κατά την πλάγια όψη, b) κατά την κάτοψη και c) κατά την κάτοψη με ψηφιακό εξοπλισμό με διάμετρο ισοδύναμης επιφάνειας κυκλικού δίσκου. Πηγή: ISRM (2015).

Κατά την πλάγια όψη, για να γίνει σωστά η μέτρηση της πεπλατυσμένης επιφάνειας θα πρέπει να υπολογίζεται η φθορά στην κωνική γωνία των 90° , ειδάλως η μέτρηση μπορεί να αποκλίνει αρκετά από την πραγματική, όπως δείχνει η μέτρηση στην Εικόνα 4.8:



Εικόνα 4.8 - Μέτρηση της διαμέτρου πεπλατυσμένης επιφάνειας σε πλάγια όψη a) σε 90° , σε συμφωνία με τη γωνία της κωνικής αιχμής της ακίδας, b) σε λανθασμένη γωνία 85.90° . Πηγή: ISRM (2015).

Ακόμη, το προφίλ της φθοράς πρέπει να είναι κανονικό ώστε να είναι αξιοποιήσιμο. Η ύπαρξη ακανόνιστου σχήματος φθοράς καθιστά τον υπολογισμό της διαμέτρου της πεπλατυσμένης επιφάνειας δύσκολο και για αυτό σε τέτοιες περιπτώσεις η δοκιμή θεωρείται άκυρη και πρέπει να επαναληφθεί. Σε περιπτώσεις ομοιόμορφα καμπυλωτής επιφάνειας, η διάμετρος υπολογίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα (b) της Εικόνας 4.9.



Εικόνα 4.9 - Σχηματική απεικόνιση μετρήσεων σε πλάγια τομή για διάφορα προφίλ φθοράς. Πηγή: ISRM (2015).

Όπως φαίνεται στην περίπτωση (b) της Εικόνας 4.9, καταγράφεται το μέγιστο μήκος φθοράς d_1 και το μήκος d_2 της θεωρητικής παράλληλης επιφάνειας που εφάπτεται στη φθαρμένη επιφάνεια μέσα στα όρια του κώνου, δηλαδή της αρχικής γωνίας 90° , και στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος τους, d . Στην περίπτωση ακανόνιστου προφίλ φθοράς (c) δεν μετρείται η διάμετρος και η χάραξη θεωρείται άκυρη.

Για τον υπολογισμό του CAI χρειάζεται μόνο η μέση διάμετρος της πεπλατυσμένης επιφάνειας φθοράς από όλες τις χαραξίες μιας δοκιμής. Ένα θεωρητικό παράδειγμα από μετρήσεις πλάγιας όψης δίνεται στον Πίνακα 4.8.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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

Πίνακας 4.8 - Παράδειγμα καταγραφής μετρήσεων και υπολογισμού CAI. Πηγή: ISRM (2015).

Στο παράδειγμα έγιναν πέντε χαράξεις που μετρήθηκαν σε πλάγια όψη, δηλαδή τέσσερις μετρήσεις d_1 έως d_4 ανά 90° για κάθε χάραξη. Από εκεί υπολογίστηκε η μέση διάμετρος d_M για κάθε χάραξη και τελικά υπολογίστηκε η ολική μέση διάμετρος d της φθοράς (mean pin wear). Με τη σχέση υπολογισμού $CAI = d \cdot 10$, το d σε mm και ο CAI αδιάστατος, βρέθηκε ο δείκτης ίσος με 4.1 με τυπική απόκλιση 0.11.

Για δοκιμές που γίνονται με ακίδα από υλικό διαφορετικής σκληρότητας από την προτεινόμενη από ISRM, δηλαδή $HRC 55 \pm 1$, η παραπάνω μέτρηση γίνεται για την εύρεση του δείκτη CAI_x , όπου x είναι η σκληρότητα του υλικού της ακίδας στην κλίμακα HRC. Για να γίνει συσχετισμός με τον δείκτη CAI και τα πρότυπα της ISRM, ο δείκτης CAI_x ανάγεται με μαθηματική διόρθωση σε CAI' . Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή είναι η μέθοδος που προτείνεται από τους Michalakopoulos et al. (2006) και από τους Jacobs and Hagan (2009). Η μετατροπή των Jacobs and Hagan δίνεται από τη σχέση (4.5):

$$CAI' = 0.415CAI_x / (1 - 0.0107x) \quad (4.5)$$

όπου x : η σκληρότητα του υλικού της ακίδας σε κλίμακα Rockwell HRC

Ακόμη, στην περίπτωση που η επιφάνεια του δείγματος έχει υποστεί κατεργασία από δίσκο κοπής, προτείνεται η διόρθωση της υπολογισμένης διαμέτρου d_s με τη σχέση (4.6) (Kasling and Thuro, 2010):

$$d = 1.14d_s \quad (4.6)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σημειώνεται πως η παραπάνω μετατροπή δε χρησιμοποιείται σε σκληρά υλικά με πολύ υψηλή αποξεστική ικανότητα.

Τέλος, τα πετρώματα ταξινομούνται ως προς την αποξεστικότητά τους με βάση τον CAI σύμφωνα με τον Πίνακα 4.9.

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

Πίνακας 4.9 - Κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων ως προς την αποξεστική τους ικανότητα κατά CAI. Πηγή: ISRM (2015).

Για την ολοκληρωμένη εικόνα της μέτρησης, η αναφορά θα πρέπει να περιέχει τις παρακάτω πληροφορίες:

- Την προέλευση, την ημερομηνία λήψης και τη μέθοδο συντήρησης κατά τη μεταφορά για το κάθε δείγμα.
- Την ημερομηνία διεξαγωγής της δοκιμής.
- Το περιβάλλον αποθήκευσης και τις συνθήκες της δοκιμής (υγρασία του δείγματος).
- Το είδος του πετρώματος (αν είναι γνωστό).
- Το μέγιστο μέγεθος των κόκκων των ορυκτών.
- Επίπεδα ανισοτροπίας (π.χ. στρωμάτωση).
- Την κατεύθυνση των χαράξεων ως προς τα επίπεδα αυτά.
- Την κατάσταση της επιφάνειας του δείγματος (τραχιά ή λεία).
- Τη σκληρότητα της ακίδας σε HRC.
- Τον τύπο εξοπλισμού (CERCHAR ή West).
- Τον τρόπο μέτρησης (κάτοψη, πλάγια όψη, οπτικό, ψηφιακό).
- Τις μετρήσεις του CAI, τη μέση και την τυπική απόκλιση και τον CAI', όπου χρειάζεται.
- Την κατηγορία του πετρώματος ως προς την αποξεστική του ικανότητα με βάση τον Πίνακα 4.9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σύμφωνα με το γαλλικό πρότυπο NF P 94-430-1, το άκρο της μεταλλικής ακίδας έχει σχήμα κώνου με γωνία $90^\circ \pm 3^\circ$ και μήκος 1 mm. Το συνολικό μήκος της ακίδας πρέπει να ξεπερνάει τα 15 mm. Ενώ, γενικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ακίδας είναι κοινά σε διάφορες δοκιμές, η σκληρότητα και το υλικό μπορεί να διαφέρουν. Στο αρχικό σχέδιο του Valantin (1973), η ακίδα που προτείνεται είναι από χάλυβα με αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 2000 MPa. Οι Suana and Peters (1982) πρότειναν ακίδα σκληρότητας Rockwell HRC 54-56 και αντοχή σε εφελκυσμό 2000 MPa. Οι Atkinson et al. (1984) πρότειναν ακίδα φτιαγμένη από χάλυβα EN24 ή EN25, θερμικά κατεργασμένο σε σκληρότητα Vickers 610 HV (HRC 55.7). Ο West (1989) πρότεινε επίσης χάλυβα EN24 με αντοχή σε εφελκυσμό 2000 MPa, αλλά θερμικά κατεργασμένο σε σκληρότητα HRC 40. Ο Atkinson (1993) δεν αναφέρεται στο είδος του χάλυβα, όμως προτείνει να έχει αντοχή σε εφελκυσμό 2000 MPa και σκληρότητα HRC 54-56. Οι Al-Ameen and Waller (1994) ακολουθούν την πρόταση των Atkinson et al. για υλικό από χάλυβα EN24 θερμικά κατεργασμένο σε 610 HV, όμως προτείνουν επιπλέον μια τροποποίηση της ακίδας από χάλυβα EN3, θερμικά κατεργασμένο σε 225 HV (περίπου HRC 19). Η AFNOR (2000) προτείνει χάλυβα θερμικά κατεργασμένο σε σκληρότητα HRC 54-56. Οι Plinninger et al. (2003) προτείνουν τη χρήση χάλυβα 115CrV4 κατεργασμένο σε HRC 55 και αντοχή σε εφελκυσμό 2000 MPa. Ενώ οι περισσότερες αναφορές γίνονται σε χάλυβα σκληρότητας HRC 54-56, αρκετοί επαγγελματίες και κατασκευαστές εργάζονται με τις τιμές CAI με βάση την ακίδα σκληρότητας HRC 40 που προτείνεται από τον West.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η σκληρότητα του υλικού της χαλύβδινης ακίδας στις τιμές του δείκτη CAI, οι Michalakopoulos et al. (2006) διεξήγαγαν μελέτη σε 73 δείγματα διαφόρων πετρωμάτων με δύο είδη χαλύβδινης ακίδας διαφορετικής σκληρότητας, το ένα είδος χάλυβα είχε σκληρότητα HRC 55 και το άλλο HRC 40. Από τα 73 δείγματα, τα 5 ήταν είτε πολύ φθαρμένα είτε πολύ σκληρά δίνοντας αναξιόπιστες μετρήσεις. Τελικά, στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 68 δείγματα από 6 διαφορετικά είδη πετρωμάτων. Το κάθε δείγμα πέρασε από δοκιμή CERCHAR πέντε επαναλήψεων για το κάθε είδος ακίδας και στη συνέχεια βρέθηκε ο μέσος CAI και η τυπική απόκλισή του.

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές CAI_{40} , για την ακίδα χάλυβα HRC 40, ήταν υψηλότερες από τις τιμές CAI_{55} , για την ακίδα χάλυβα HRC 55. Από τις μετρήσεις βγήκαν ως συμπεράσματα ότι η σκληρότητα του υλικού της ακίδας επηρεάζει σημαντικά τις τιμές του δείκτη και, ακόμη, οι τιμές του CAI_{40} έχουν μεγαλύτερη διασπορά.

Από τη μελέτη των τιμών CAI από τις δοκιμές, οι Michalakopoulos et al. σημείωσαν τη γραμμική σχέση (4.7) των δύο δεικτών:

$$CAI_{55} = 0.110914 + 0.587356CAI_{40} \quad (4.7)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η παραπάνω σχέση, σύμφωνα με τις τιμές που μετρήθηκαν, έχει συντελεστή προσδιορισμού $R^2=73.8251\%$ και συντελεστή συσχέτισης $\rho=0.859797$, υποδεικνύοντας μια καλή σύνδεση των CAI_{55} και CAI_{40} . Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις βασικές πληροφορίες που χρειάζονται από την επίσημη αναφορά της δοκιμής CERCHAR (ISRM, 2015).

Από τη σκοπιά της επιφάνειας του δείγματος, η πρότυπη δοκιμή CERCHAR πρέπει να γίνεται στη θραυσμένη επιφάνεια ενός πετρώματος. Επειδή σε πολλά πετρώματα η καθαρή θραύση, όπως με χρήση σφύρας, δε δίνει δείγματα ικανά για μελέτη, διεξήχθη έρευνα σε σχέση με τεχνητές τομές στα πετρώματα. Μελετήθηκε η διαφορά ανάμεσα σε πετρώματα με επιφάνεια θραύσης από σφύρα, που έχουν τμηθεί με δίσκους κοπής διαμαντιού και που έχουν τμηθεί και λειανθεί με σκόνη από κορούνδιο κοκκομετρίας 100 - 140 μm . Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι τιμές CAI στις θραυσμένες επιφάνειες ήταν κατά περίπου 0.5 υψηλότερες από τις τιμές CAI στις τετμημένες επιφάνειες. Έτσι, η συσχέτιση των τιμών CAI τετμημένων, ή λείων, επιφανειών με τιμές CAI θραυσμένων επιφανειών (CAI προτύπου) γίνεται με την εξίσωση της σχέσης (4.8):

$$CAI = 0.99CAI_s + 0.48 \quad (4.8)$$

όπου CAI: ο δείκτης CERCHAR σε πρότυπες συνθήκες (θραυσμένη/τραχιά επιφάνεια)
 CAI_s : ο δείκτης CERCHAR σε λεία (smooth) / τετμημένη επιφάνεια.

Σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή, το μήκος χάραξης της ακίδας στο δείγμα του πετρώματος είναι στα 10 mm. Έχει εξεταστεί η επίδραση της χάραξης σε μεγαλύτερο μήκος για να διαπιστωθεί αν η μεγαλύτερη φθορά στην αιχμή της ακίδας θα έδινε πιο αντιπροσωπευτικές τιμές για τον CAI του πετρώματος. Μέσα από τις παρατηρήσεις τους, οι Al-Ameen and Waller (1994) συμπέραναν ότι:

- Περίπου το 70% της συνολικής φθοράς στην αιχμή της ακίδας γίνεται μέσα στο πρώτο χιλιοστό της χάραξης.
- Τα πρώτα 2 mm αντιστοιχούν σε περίπου το 85% του CAI, με το υπόλοιπο 15% να αντιστοιχεί στα επόμενα 8 mm.
- Για να υπάρξει ορατή μεταβολή στη φθορά της αιχμής και στην τιμή του CAI, η γραμμή της χάραξης θα πρέπει να επιμηκυνθεί στα 5 έως 10 cm (50 έως 100 mm).

Με αυτές τις παρατηρήσεις, η αλλαγή του μήκους της γραμμής χάραξης καθίσταται περιττή και το μήκος έχει καθιερωθεί να είναι 10 ± 0.5 mm.

Η μέτρηση του μήκους της πεπλατυσμένης επιφάνειας, σύμφωνα με πρόταση του Plinninger (2003), γίνεται με στερεοσκόπιο μεγέθυνσης $\times 50$ και χρήση οπτικής κλίμακας. Το σφάλμα αυτής της μέτρησης μπορεί να έχει μέγεθος γύρω στα 0.02 mm, ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

δηλαδή απόκλιση έως 0.2 CAI. Παρότι η μεγέθυνση πάνω από $\times 50$ δεν δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα, η χρήση χαμηλότερης μεγέθυνσης δεν προτείνεται, για παράδειγμα σε μεγέθυνση $\times 10$ η απόκλιση είναι της τάξης 0.1 mm (1 CAI).

Τέλος, με βάση μια έρευνα που διεξήχθη στο Πολυτεχνείο του Μονάχου (TUM) σε 109 δείγματα διαφόρων ειδών πετρωμάτων, παρατηρήθηκε πως, σε αντίθεση με τις καταγραφές του West (1989), η περιεκτικότητα σκληρών ορυκτών, κατά κύριο λόγο χαλαζία, δεν επαρκεί για την εκτίμηση της ικανότητας απόξεσης ενός πετρώματος. Παρόλα αυτά, αν και με σχετικά χαμηλή συσχέτιση (συντελεστής προσδιορισμού $R^2=0.56$), υπήρξε η παρατήρηση πως ο δείκτης αποξεστικής ικανότητας CERCHAR έχει μια σχετικά γραμμική σχέση με το γινόμενο του ισοδύναμου περιεχόμενου χαλαζία (Qtz_{eq}) επί το μέτρο ελαστικότητας (E).

Σύμφωνα με τον West (1989), οι αρχικές προδιαγραφές για τη δοκιμή CERCHAR που διεξήγαγε έχουν ως εξής: η μεταλλική ακίδα έχει γωνία αιχμής 90° και πιέζεται στην επιφάνεια του δείγματος του πετρώματος υπό φορτίο 7 kgf, περίπου 68.65 N. Στη συνέχεια, το δείγμα μετακινείται με χαμηλό ρυθμό κατά 10 mm. Η αποξεστική ικανότητα του πετρώματος υπολογίζεται από το μήκος της πεπλατυσμένης επιφάνειας της αιχμής της ακίδας που δημιουργείται από τη φθορά της μεταξύ τους ολίσθησης. Ως μονάδα του δείκτη της αποξεστικής ικανότητας ορίζεται η φθορά πεπλατυσμένης επιφάνειας μήκους 0.1 mm, δηλαδή $0.1 \text{ mm} = 1$ μονάδα ή $1 \text{ mm} = 10$ μονάδες. Έτσι, η εξίσωση υπολογισμού της δίνεται από τη σχέση (4.9):

$$CAI = 10 * d \quad (4.9)$$

όπου CAI: ο αδιάστατος συντελεστής αποξεστικής ικανότητας CERCHAR
d: η διάμετρος (μήκος) φθοράς της πεπλατυσμένης επιφάνειας σε mm.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της ακίδας έχει αντοχή σε εφελκυσμό 200 kgf/mm^2 (περίπου 1960 MPa).

Στη χρονική περίοδο των δοκιμών του West, ήταν δύσκολη η προμήθεια τέτοιου είδους χάλυβα στην περιοχή που ήταν οπότε και έγινε χρήση άλλου είδους. Ο χάλυβας που επιλέχθηκε για τις μετρήσεις ήταν χάλυβας EN24, θερμικά κατεργασμένος σε σκληρότητα HRC 40 στην κλίμακα Rockwell. Οι ακίδες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο 10 mm και μήκος 100 mm. Για τον έλεγχο της αιχμής τους χρησιμοποιήθηκε ένας φακός χειρός μεγέθυνσης $\times 10$. Για το δείγμα επιλέγεται μέγεθος κατάλληλο να κρατηθεί σταθερά μέσα στη συσκευή δοκιμής, όπως π.χ. κύβος ακμής 30 mm. Η μορφοποίηση της επιφάνειας, σε μαλακά πετρώματα γίνεται με λίμα και σε σκληρά πετρώματα με πριόνι διαμαντιού. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δείγματα με καθαρή επιφάνεια θραύσης, επαρκώς επίπεδη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το δείγμα τοποθετείται μέσα στη συσκευή και συγκρατείται σε μέγγενη. Στη συνέχεια, τοποθετείται με αργό ρυθμό η ακίδα στο επίπεδο της επιφάνειας μέχρι να σταθεροποιηθεί το συνολικό φορτίο. Η ακίδα χαράσσει πορεία 10 mm στην επιφάνεια του δείγματος και επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία πέντε φορές, σε παράλληλες γραμμές. Η χάραξη γίνεται χειρωνακτικά με τη χρήση περιστροφικού μοχλού, με την κάθε πλήρη περιστροφή να αντιστοιχεί σε προχώρηση 1 mm. Μετά από δέκα περιστροφές ολοκληρώνεται η χάραξη. Η δοκιμή συνολικά ολοκληρώνεται σε περίπου ένα λεπτό. Αφαιρείται προσεκτικά η ακίδα με το φορτίο από την επιφάνεια του δείγματος, καθαρίζεται η αιχμή της από τυχόν κατάλοιπα του πετρώματος που έχουν επικολληθεί πάνω της και μετريέται η πεπλατυσμένη επιφάνεια σε μικροσκόπιο με μεγέθυνση $\times 24$, βαθμολογημένο σε 0.01 mm, με δυνατότητα ανάγνωσης έως και 0.001 mm. Κατά κανόνα, πέντε μετρήσεις είναι αρκετές για να περιγράψουν την ικανότητα απόξεσης ενός πετρώματος. Η πλήρης διαδικασία της δοκιμής σε ένα δοκίμιο, από την προετοιμασία μέχρι και την αριθμητική καταγραφή, μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα στη διάρκεια μίας ώρας.

Από τις δοκιμές με τις παραλλαγές του στη μέθοδο CERCHAR, ο West παρατήρησε την αδυναμία μέτρησης της αποξεστικής ικανότητας σε δύο τύπους πετρωμάτων. Συγκεκριμένα, κάποια πετρώματα ήταν πολύ μαλακά ώστε να μην αφήνουν ορατή φθορά στην άκρη της ακίδας κατατάσσοντάς τα σε $CAI=0$, ενώ κάποια πετρώματα ήταν τόσο σκληρά που δεν άφηναν γραμμή χάραξης πάνω στο δείγμα. Υπήρχε ορατή φθορά στην αιχμή της ακίδας, όμως, επειδή ο τρόπος αλληλεπίδρασης ήταν ελλειπής, η φθορά που προκλήθηκε δεν περιέγραφε ολοκληρωμένα την αποξεστική ικανότητα του πετρώματος και, συνεπώς, η τιμή του CAI θα ήταν λανθασμένη.

Στις μετρήσεις του, ο West χρησιμοποίησε πετρώματα που απαντήθηκαν στη διάνοιξη σπηραγγών στο Ηνωμένο Βασίλειο. Τα δείγματα δοκιμάστηκαν σε κατάσταση φυσικής ξήρανσης. Συνοπτικά, αναφέρονται κάποιες από τις μετρήσεις του. Τα ψαμμιτικά πετρώματα παρουσίασαν εύρος τιμών CAI από 1.3 (ψαμμίτης από το Springwell) έως 6.24 (ψαμμίτης από τις σπηραγγες Kielder Aqueduct). Σημειώνεται πως ο ψαμμίτης παρουσίασε υψηλή τιμή στα 5.38. Ο χαλαζίτης από τις νήσους Φώκλαντ ήταν πολύ σκληρός για να μετρηθεί. Τα αργιλικά πετρώματα έδωσαν χαμηλές τιμές, από 0.23 έως 2.63. Τα ασβεστιτικά πετρώματα έδειξαν χαμηλές τιμές από 0 έως 2.41, με την πλειονότητα γύρω στο 2. Τα πυριγενή πετρώματα είχαν υψηλή αποξεστική ικανότητα, με εύρος από 3.45 (ανδεσίτης από την Pangua, Παπούα Νέα Γουινέα) έως και 7.25 (γρανίτης από το Merivale). Οι δολερίτες είχαν τιμές από 3.82 έως 5.41 και οι γρανίτες από 4.52 έως 7.25. Τα μεταμορφωμένα έδωσαν τιμές από 1.68 για το μάρμαρο έως 4.98 για σχιστόλιθο, σημειώνοντας ανάμεσά τους μια περίπτωση γνεύσιου με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλαζία από την περιοχή Calvine στη Σκωτία, ο οποίος χαρακτηρίστηκε ως πολύ σκληρός για τη δοκιμή. Ακόμα, σε μια περίπτωση σχιστόλιθου που μετρήθηκε σε ζώνη χαλαζία και έδωσε τιμή 5.27, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ζώνες του που έδωσαν μέση τιμή στα 2.77, διαπιστώθηκε η σημαντική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΞΕΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

επίδραση της ύπαρξης χαλαζία ή άλλου σκληρού υλικού μέσα στο πέτρωμα. Τέλος, από τις δοκιμές σε δολερίτες που έδωσαν τιμές από 3.82 έως 5.41, ο West σημειώνει πως η αποξεστικότητα ενός πετρώματος ξεκινάει να είναι υψηλή κάπου ανάμεσα στις τιμές 4 και 5 εμφανίζοντας αυξημένα ποσοστά φθοράς στα κοπτικά.

Στην έρευνά του, ο West έλεγξε τη συσχέτιση των τιμών του δείκτη από τις δοκιμές του στα πετρώματα που αναφέρονται στην κλίμακα σκληρότητας του Mohs. Οι δοκιμές έγιναν στα ορυκτά της κλίμακας Mohs από τη γύψο έως το χαλαζία, εφόσον αναφέρθηκε πως όταν το δείγμα είναι πολύ μαλακό ή πολύ σκληρό, η μέθοδος δε βρίσκει εφαρμογή. Στην έρευνά του βρήκε πως, για τα έξι αυτά ορυκτά, οι τιμές τους στην κλίμακα Mohs έχουν σχεδόν γραμμική σχέση με τις τιμές CAI που βρήκε ο West, με συντελεστή συσχέτισης $r=0.98$.

Μερικά από τα συμπεράσματα στην έρευνα του West είναι:

1. Τα αποτελέσματα της δοκιμής CERCHAR με τις παραλλαγές που πρότεινε έχουν υψηλό βαθμό συσχέτισης με την κλίμακα σκληρότητας του Mohs.
2. Όταν ο δείκτης CAI είναι ανάμεσα στο 4 και το 5 ή ακόμα υψηλότερος, τότε μπορεί να υπάρξει αύξηση στο ρυθμό φθοράς κατά την εξόρυξη με μηχανικά μέσα.
3. Υπάρχει έντονη συσχέτιση της αποξεστικής ικανότητας ενός πετρώματος με την περιεκτικότητά του σε χαλαζία.

Κεφάλαιο 5: Μοντέλα εκτίμησης της φθοράς κοπτικών άκρων

5.1. Ποσοτικοποίηση της φθοράς σε μικροσκοπικό επίπεδο

Η μοντελοποίηση της φθοράς κοπτικών άκρων αρχικά επιχειρήθηκε με χρήση διαφορικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές δεν αποτελούν το βασικό εργαλείο του μηχανικού μεταλλείων για την εκτίμηση της φθοράς που θα παρουσιαστεί σε ένα κοπτικό άκρο κατά την εκτέλεση ενός έργου, όμως έχουν θεωρητικό ενδιαφέρον για τον στοιχειώδη τρόπο λειτουργίας της φθοράς.

5.1.1. Μοντέλο Holm (1946 από Bhushan, 2013)

$$v = \frac{kWx}{H} \quad (5.1)$$

όπου v : ο όγκος της φθοράς του κοπτικού άκρου

k : αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τα υλικά των σωμάτων σε επαφή και την τραχύτητα της μεταξύ τους επιφάνειας

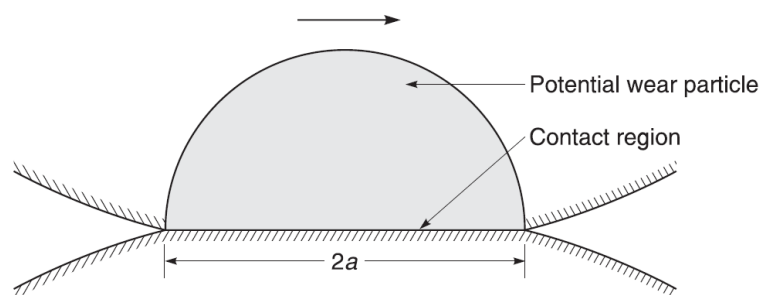
W : το επιβαλλόμενο φορτίο

x : η απόσταση ολίσθησης

H : η σκληρότητα της επιφάνειας που φθείρεται.

5.1.2. Μοντέλο Archard (1953)

Θεωρία με σωματίδια φθοράς σε ημισφαιρικό σχήμα υπό πλαστική παραμόρφωση:



Εικόνα 5.1 - Σχηματική απεικόνιση φθοράς με δημιουργία σωματιδίου ημισφαιρικού σχήματος σε ολίσθηση. Πηγή: Bhushan (2013).

$$dW = \pi a^2 H \quad (5.2)$$

όπου dW : μέγιστο κάθετο φορτίο πριν την αποκόλληση του σωματιδίου

a : ακτίνα του σωματιδίου

H : μέση επιφανειακή πίεση ή πίεση διαρροής υπό το μέγιστο φορτίο, ή σκληρότητα του μαλακότερου υλικού.

Ο όγκος του ημισφαιρικού σωματιδίου, άρα και ο όγκος της φθοράς, dv είναι:

$$dv = \frac{2}{3} \pi a^3 \quad (5.3)$$

Με απόσταση ολίσθησης ίση με τη διάμετρο του σωματιδίου:

$$dx = 2a \quad (5.4)$$

Προκύπτει:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{3} \frac{dW}{H} \quad (5.5)$$

Σύμφωνα με τον Bhushan (2013), ορίζεται ο συντελεστής k ως η πιθανότητα να μεταφερθεί κομμάτι του υλικού ή να δημιουργηθεί σωματίδιο φθοράς στην επιφάνειά του κατά την επαφή με επιφανειακή ανωμαλία. Οι τιμές του συνήθως κυμαίνονται από 10^{-8} ως 10^{-4} σε μέτρια φθορά και από 10^{-4} ως 10^{-2} για έντονη φθορά. Θεωρώντας ότι ένα κλάσμα $a=3k$ θα προκαλέσει τη δημιουργία σωματιδίου φθοράς, με ολοκλήρωση η εξίσωση (5.5) μετασχηματίζεται στην εξίσωση (5.1) που έδωσε ο Holm (1946) και ονομάζεται εξίσωση φθοράς συγκόλλησης του Archard σε πλαστική επαφή.

5.1.3. Μοντέλα Rabinowicz (1995, από Bhushan, 2013)

$$d = 60000 \frac{W_{ad}}{H} \quad (5.6)$$

όπου d : η μέση διάμετρος ενός σωματιδίου φθοράς συγκόλλησης
 W_{ad} : το έργο της συγκόλλησης.

Φθορά από ανωμαλία κωνοειδούς σχήματος (απλοϊκό μοντέλο):

$$dW = \frac{1}{2}\pi a^2 H \quad (5.7)$$

$$dv = a^2 x(\tan\theta) \quad (5.8)$$

όπου dW : το κάθετο φορτίο

a : η ακτίνα του κώνου σε βάθος διείδυσης d

H : η σκληρότητα της μαλακής επιφάνειας

θ : η γωνία προσβολής της επιφάνειας (γωνία του άξονα του κώνου σε σχέση με την επιφάνεια διείδυσης, ή αλλιώς ημιγωνία της αιχμής του κώνου)

dv : ο όγκος φθοράς σε απόσταση x

x : η απόσταση κατά την οποία υπάρχει τριβή/απόξεση.

Με συνδυασμό των παραπάνω:

$$dv = \frac{2dWx(\tan\theta)}{\pi H} \quad (5.9)$$

Για τον συνολικό όγκο φθοράς από όλες τις επιφανειακές ανωμαλίες:

$$v = \frac{2Wx\overline{\tan\theta}}{\pi H} \quad (5.10)$$

όπου $\overline{\tan\theta}$: ο σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών $\tan\theta$.

Για πιο ευρεία χρήση, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$v = \frac{k_{abr}Wx}{H} \quad (5.11)$$

όπου k_{abr} : αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία των ανωμαλιών και την πιθανότητα οι ανωμαλίες να αφαιρούν παρά να αυλακώνουν το υλικό. Συνήθεις τιμές μεταξύ 10^{-6} και 10^{-1} .

Σημειώνεται ότι σε σύγκριση με τον ρυθμό φθοράς στον μηχανισμό φθοράς με συγκόλληση/αποκόλληση, ο ρυθμός φθοράς απόξεσης είναι 2 με 3 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος. Ακόμα, η φθορά συγκόλλησης σε ελαστική επαφή μειώνεται με την αύξηση της σκληρότητας των υλικών, σε αντίθεση με τη φθορά απόξεσης. Τέλος, η εξίσωση (5.11) μπορεί να εφαρμοστεί και σε φθορά απόξεσης τριών σωμάτων, όμως το k_{abr} είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μικρότερο, επειδή τα ενδιάμεσα αποξεστικά σωματίδια έχουν την τάση περισσότερο να κυλούνε (περίπου 90%) παρά να ολισθαίνουν και να προκαλείται φθορά απόξεσης.

5.1.4. Ποσοτικές εξισώσεις φθοράς απόξεσης σε υλικά με ψαθυρή συμπεριφορά

Για την ψαθυρή θραύση, πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο φορτίο. Το ελάχιστο φορτίο είναι ανάλογο του μονώνυμου K_c (K_c / H)³ (Lawn and Marshall, 1979). Ο λόγος H / K_c ονομάζεται δείκτης ψαθυρότητας.

5.1.4.1. Μοντέλο Evans and Marshall (1981, από Bhushan, 2013)

$$c = a_1 \left[\frac{(E/H)^{3/5}}{K_c^{1/2} H^{1/8}} \right] W^{5/8} \quad (5.12)$$

$$d = a_2 \left(\frac{E}{H} \right)^{2/5} \left(\frac{W}{H} \right)^{1/2} \quad (5.13)$$

$$v = a_3 N \frac{(E/H)W^{9/8}}{K_c^{1/2} H^{5/8}} \quad (5.14)$$

όπου c : το μήκος της πλάγιας ρωγμάτωσης του φθειρόμενου ψαθυρού σώματος από ολίσθηση ανωμαλίας στην επιφάνειά του

a_1 : συντελεστής που δεν εξαρτάται από το υλικό αλλά από τη γεωμετρία της ανωμαλίας

E : το μέτρο ελαστικότητας της επιφάνειας

H : η σκληρότητα της επιφάνειας

K_c : συντελεστής δυσθραυστότητας

W : το κάθετο φορτίο

d : το βάθος εισχώρησης της ανωμαλίας στην επιφάνεια

α_2 : συντελεστής που δεν εξαρτάται από το υλικό

v : ο όγκος φθοράς από μια ανωμαλία σε επαφή

α_3 : συντελεστής που δεν εξαρτάται από το υλικό

N : το πλήθος των ανωμαλιών σε επαφή.

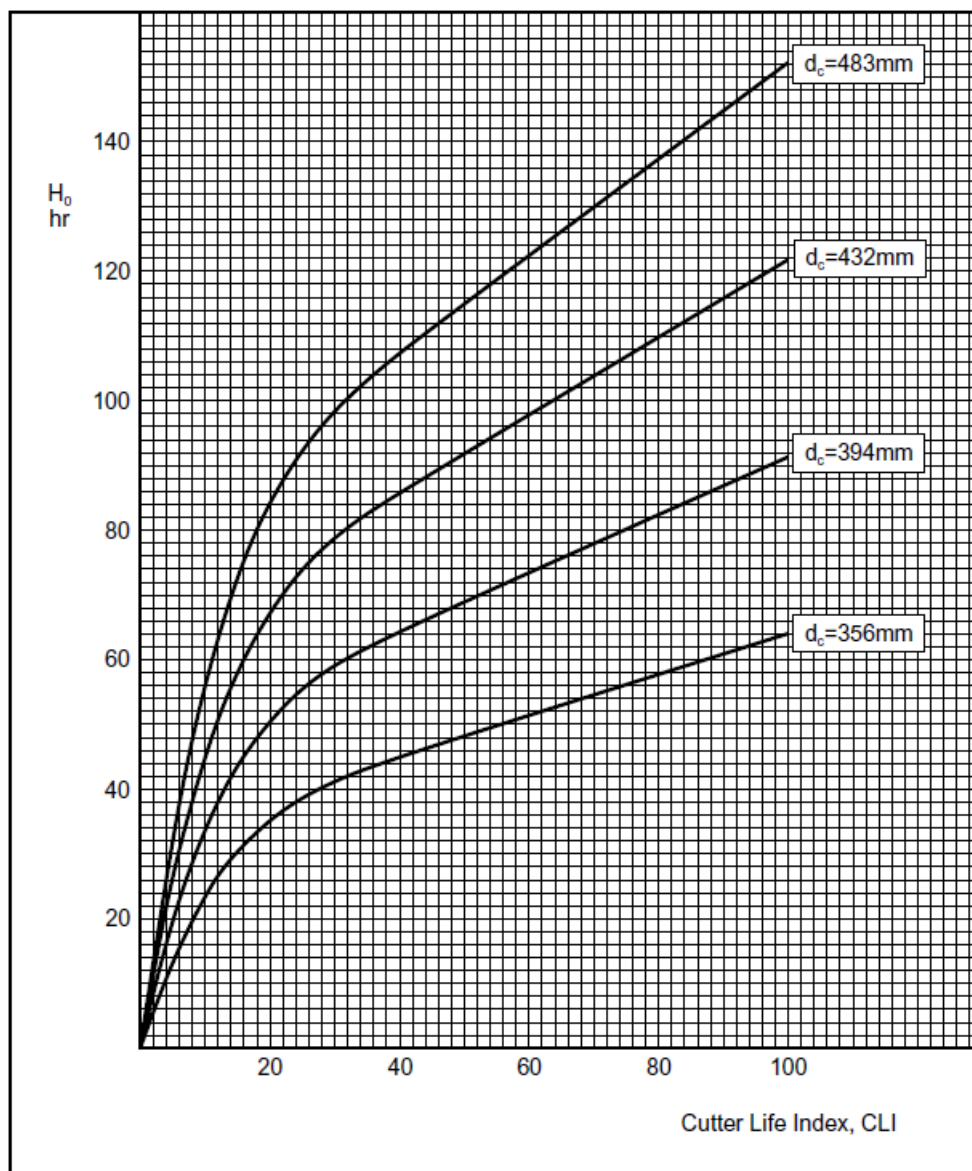
5.2. Εμπειρικά μοντέλα για κοπή πετρωμάτων

5.2.1. Μοντέλο κατά Bruland (1998)

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Bruland (1998), αφορά στη φθορά δίσκων κοπής στην κεφαλή μηχανήματος TBM (Tunnel Boring Machine).

5.2.1.1. Θεωρητική ζωή κοπτικού δίσκου σε TBM H_0

Για το κάθε κοπτικό άκρο, αντιστοιχίζεται η θεωρητική ζωή H_0 σε σχέση με τον δείκτη CLI με βάση τη διάμετρό του, d_c , σε mm. Η αντιστοίχιση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.1.

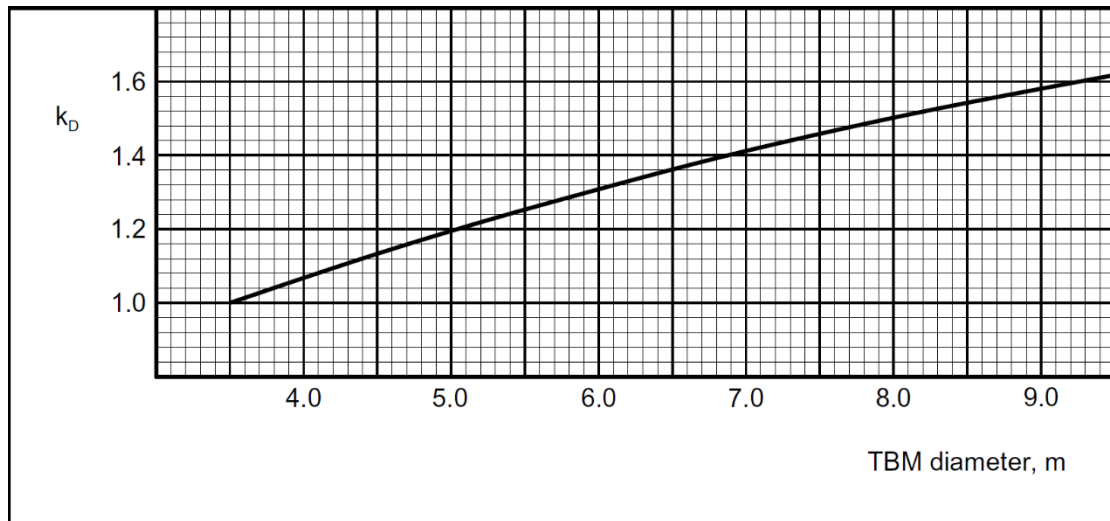


Διάγραμμα 5.1 - Γράφημα υπολογισμού της ζωής των κοπτικών άκρων με το μοντέλο Bruland (χωρίς διόρθωση συντελεστών). Πηγή: Bruland (1998).

5.2.1.2. Διορθωτικός παράγοντας k_D από τη διάμετρο της κεφαλής του TBM

Τα κοπτικά άκρα στο κέντρο και στην περιφέρεια της κεφαλής του TBM έχουν γενικά μεγαλύτερη φθορά από τα άκρα τοποθετημένα στον ενδιάμεσο κυκλικό δίσκο, συνεπώς και χαμηλότερο προσδόκιμο ζωής. Τα άκρα στο κέντρο της κεφαλής αστοχούν λόγω εδράνων και τα εξωτερικά έχουν σύνθετους μηχανισμούς φθοράς, οπότε τα άκρα στην ενδιάμεση περιοχή έχουν την κύρια φθορά απόξεσης. Έτσι, αυξάνοντας τη διάμετρο της κεφαλής αυξάνεται συνολικά ο μέσος όρος ζωής του κάθε

άκρου. Στο Διάγραμμα 5.2 δίνεται ο συντελεστής k_D για διάμετρο κεφαλής TBM έως 9.5 m.



Διάγραμμα 5.2 - Παράμετρος k_p για τη διάμετρο της κεφαλής του TBM. Πηγή: Bruland (1998).

5.2.1.3. Διορθωτικός παράγοντας k_{rpm} από τη γωνιακή ταχύτητα της κεφαλής του TBM

$$k_{rpm} = \frac{50/d_{TBM}}{RPM} \quad (5.15)$$

όπου d_{TBM} : η διάμετρος του TBM σε m

RPM: η γωνιακή ταχύτητα της κεφαλής του TBM.

5.2.1.4. Διορθωτικός παράγοντας k_N από το πλήθος των κοπτικών στην κεφαλή του TBM

Στην περίπτωση που το πλήθος των κοπτικών άκρων στην κεφαλή του TBM διαφέρει από το ονομαστικό πλήθος κοπτικών, υπολογίζεται ο διορθωτικός παράγοντας k_N :

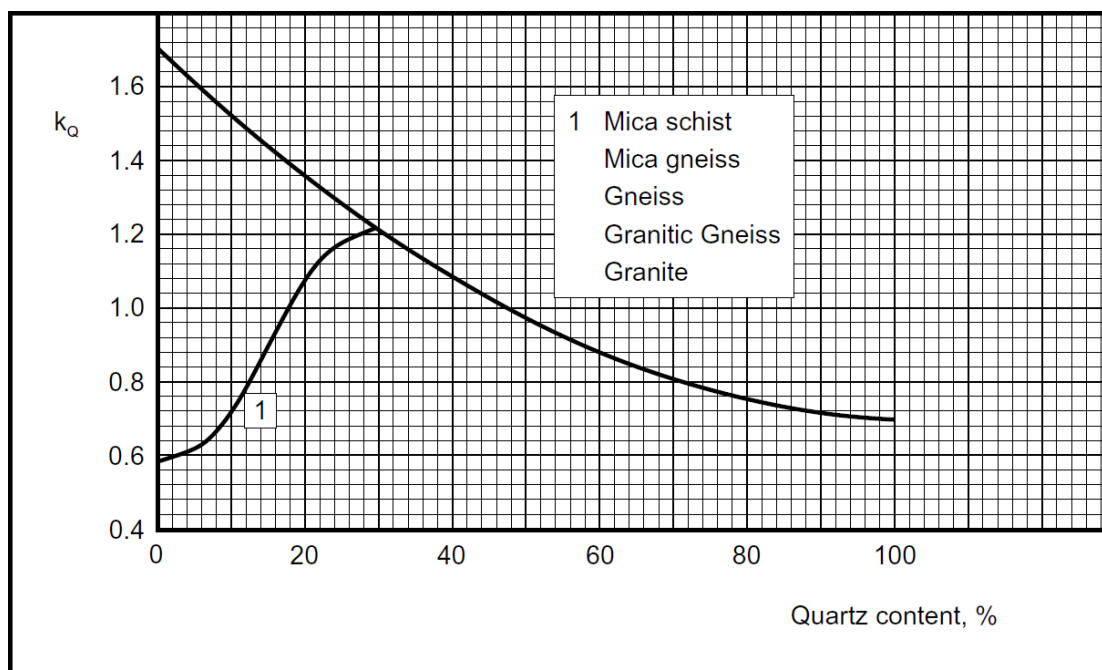
$$k_N = \frac{N_{TBM}}{N_0} \quad (5.16)$$

όπου N_{TBM} : το πραγματικό πλήθος των κοπτικών σε χρήση

N_0 : το ονομαστικό πλήθος των κοπτικών.

5.2.1.5. Διορθωτικός παράγοντας k_Q από την περιεκτικότητα σε χαλαζία του πετρώματος

Στην περίπτωση που το πέτρωμα περιέχει ορυκτά με ισχυρή ικανότητα απόξεσης, η αυξημένη φθορά απόξεσης στα κοπτικά άκρα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής τους. Το πιο συχνό ορυκτό απόξεσης είναι ο χαλαζίας, έτσι λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής k_Q σε σχέση με το ποσοστό του μέσα στο πέτρωμα, σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.3:



Διάγραμμα 5.3 - Παράμετρος k_Q για το περιεχόμενο ποσοστό χαλαζία στο πέτρωμα. Πηγή: Bruland (1998).

Στην περίπτωση άλλων περιεχόμενων φθοροποιών ορυκτών, θα πρέπει να λαμβάνονται και αυτά υπόψη στον υπολογισμό του συντελεστή. Στο διάγραμμα αναφέρονται συγκεκριμένα τα πετρώματα μαρμαρυγίες, γνεύσιοι και γρανίτες, για τα οποία ακολουθείται η επιλογή συντελεστή από την καμπύλη [1].

5.2.1.6. Αναμενόμενη κατανάλωση κοπτικών άκρων

Με βάση τους προηγούμενους συντελεστές μπορούν να υπολογιστούν η μέση προσδόκιμη ζωή του κοπτικού άκρου H_h , ο ρυθμός προχώρησης του μετώπου της σήραγγας ανά κοπτικό άκρο H_m και ο όγκος εξόρυξης ανά κοπτικό άκρο H_r :

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

$$H_h = (H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{rpm} \cdot k_N) / N_{TBM} \quad (h/c) \quad (5.17)$$

$$H_m = H_h \cdot I_n \quad (m/c) \quad (5.18)$$

$$H_f = H_h \cdot I_n \cdot \pi \cdot d_{TBM}^2 / 4 \quad (m^3/c) \quad (5.19)$$

όπου I_n : ο ρυθμός προχώρησης του μετώπου σε m/h.

Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στα κοπτικά άκρα ως σύνολο, δηλαδή $H_m = 10$ m/c σημαίνει ότι μετά από προχώρηση μήκους 10 m η συνολική φθορά σε όλα τα κοπτικά άκρα της κεφαλής αθροιστικά θα ισούται με τη φθορά και τελική αστοχία ενός μόνο κοπτικού άκρου.

5.2.2. Εμπειρικό μοντέλο κατά Hassanpour et al. (2014)

5.2.2.1. Γενικά

Οι Hassanpour et al. (2014), με βάση δεδομένα από διάνοιξη σιηράγγων στο Ιράν, μελέτησαν την επίδραση που έχουν διάφορα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας στη φθορά των κοπτικών άκρων. Τα πετρώματα που εξετάστηκαν ήταν από μετρίως κερματισμένα πυροκλαστικά έως καλοσχηματισμένα πυριγενή και συνολικό εύρος UCS από 30 MPa έως 150 MPa. Οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν ήταν για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής δίσκων κοπής σε TBM.

5.2.2.2. Μοντέλα συσχέτισης με χαρακτηριστικά του πετρώματος

Η ζωή του κοπτικού άκρου ορίζεται με διάφορους τρόπους. Στα μοντέλα που μελετήθηκαν αναφέρεται η ζωή του κοπτικού άκρου εκφρασμένη είτε σε μέτρα προχώρησης H_m , είτε σε όγκο εξορυγμένου πετρώματος H_f . Οι εξισώσεις συσχέτισης με τα διάφορα χαρακτηριστικά του πετρώματος χρησιμοποιούν ως μέτρο σύγκρισης την H_f . Ο ορισμός τους δίνεται από τις σχέσεις (5.20) και (5.21).

$$H_m = \frac{L}{N_{TBM}} \text{ σε (m/cutter)} \quad (5.20)$$

όπου L: το μήκος προχώρησης του μετώπου της σήραγγας από την κεφαλή, σε m
 N_{TBM} : το πλήθος των δίσκων που αντικαταστάθηκαν σε μήκος L.

$$H_f = H_m \cdot \pi \cdot \frac{d_{TBM}^2}{4} \text{ σε (m}^3\text{/cutter)} \quad (5.21)$$

όπου d_{TBM} : η διάμετρος της κεφαλής του TBM, σε m.

Ακόμα, σημειώνεται η φθορά W_m του κοπτικού άκρου ανά μέτρο προχώρησης, δηλαδή το αντίστροφο της H_m :

$$W_m = \frac{N_{TBM}}{L} \text{ σε (cutter/m)} \quad (5.22)$$

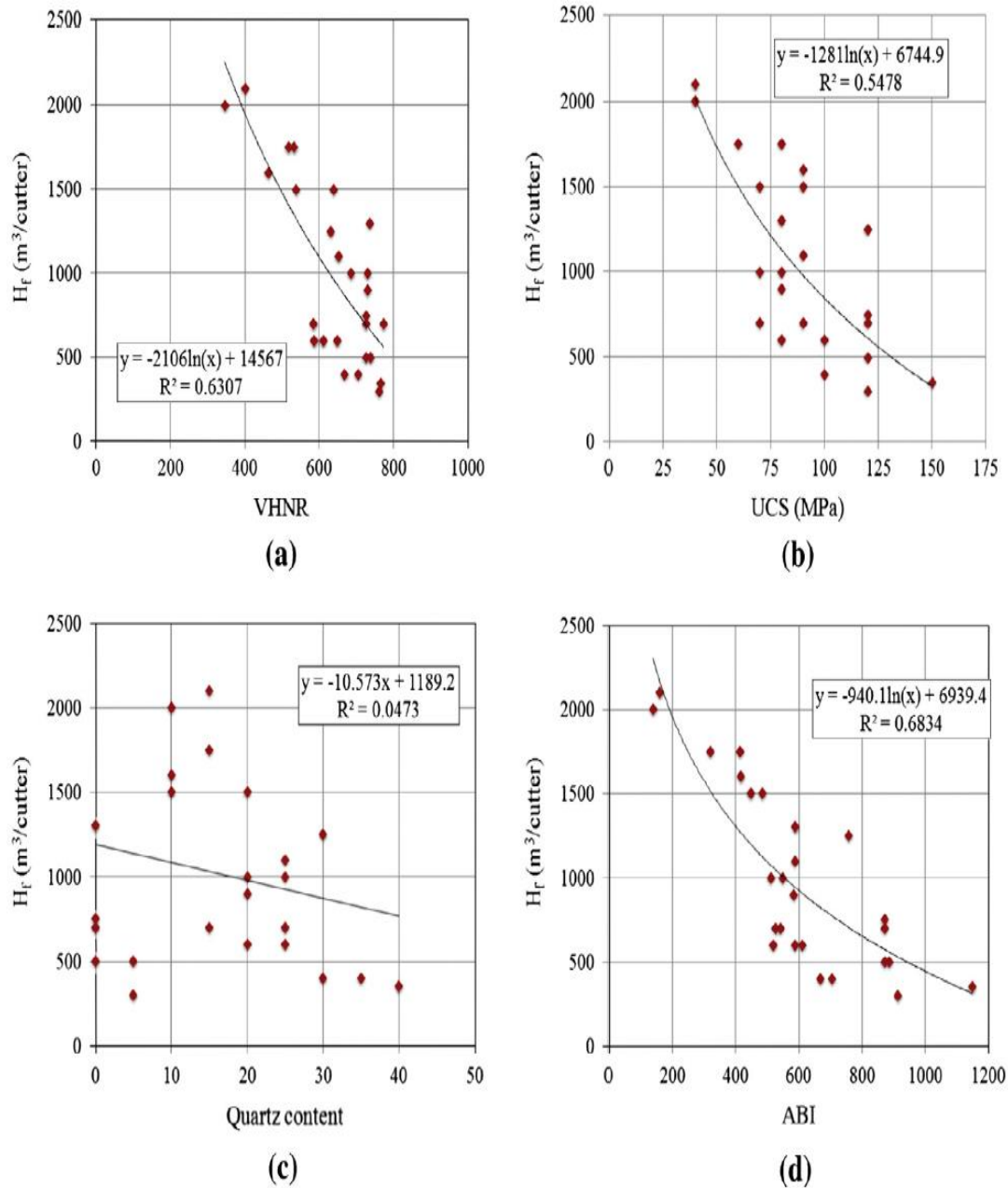
Στην έρευνα των Hassanpour et al. χρησιμοποιήθηκαν η σκληρότητα του πετρώματος VHNR (Bruland, 1998), η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS και η περιεκτικότητα σε χαλαζία, καθώς, επίσης, και οι τιμές κατηγοριοποίησης του πετρώματος J_v , RQD, GSI και RMR. Η συσχέτιση των χαρακτηριστικών αυτών με τη ζωή των κοπτικών ήταν γενικά χαμηλή, εκτός από τις περιπτώσεις της VHNR και της UCS. Έτσι, δοκιμάστηκε ο δείκτης αποξεστικότητας ABI (Abrasive Index) που συνδυάζει τα δύο χαρακτηριστικά με τη σχέση (5.23).

$$ABI = VHNR \cdot \frac{UCS}{100} \quad (5.23)$$

όπου η UCS σε MPa.

Οι μετρήσεις που έγιναν με βάση τα χαρακτηριστικά του πετρώματος παρουσιάζονται γραφικά στα διαγράμματα της Εικόνας 5.2:

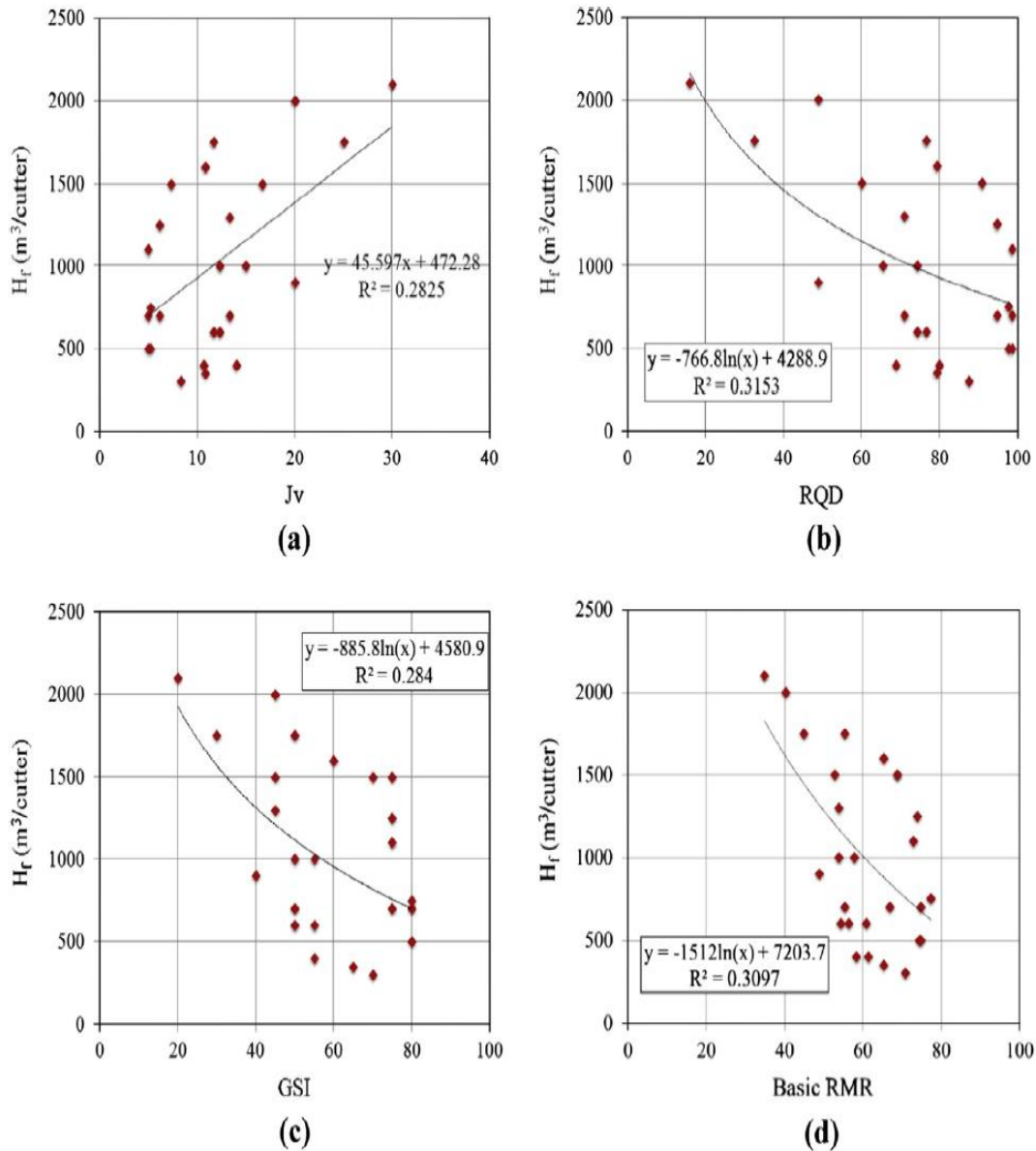
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ



Εικόνα 5.2 - Μοντέλα με βάση τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

Οι μετρήσεις που έγιναν με βάση τα χαρακτηριστικά της κατηγοριοποίησης του πετρώματος παρουσιάζονται γραφικά στα διαγράμματα της Εικόνα 5.3:



Εικόνα 5.3 - Μοντέλα με βάση τους δείκτες κατηγοριοποίησης του πετρώματος. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

Οι στατιστικές πληροφορίες της κάθε μέτρησης καθώς και η εξίσωση συσχέτισης της κάθε περίπτωσης περιγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.1:

Eng. geological parameter	Regression coef. (R^2)	Regression type	Relationship	
Intact rock	VHNR	0.631	Logarithmic	$H_f = -2106 \ln(\text{VHNR}) + 14567$
	UCS (MPa)	0.548	Logarithmic	$H_f = -1281 \ln(\text{UCS}) + 6744.9$
	Quartz content (%)	0.047	Linear	$H_f = -10.57 \ln(\text{QC}) + 1189.2$
	Abrasivity Index (ABI)	0.683	Logarithmic	$H_f = -940.1 \ln(\text{ABI}) + 6939.4$
Rock mass	Joint count number (J_v)	0.283	Linear	$H_f = 45.597J_v + 472.28$
	RQD (%)	0.315	Logarithmic	$H_f = -766.8 \ln(\text{RQD}) + 4288.9$
	Geol. Strength Ind. (GSI)	0.284	Logarithmic	$H_f = -885.8 \ln(\text{GSI}) + 4580.9$
	Basic RMR	0.310	Logarithmic	$H_f = -1512 \ln(\text{BRMR}) + 7203.7$

Πίνακας 5.1 - Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και από τους δείκτες κατηγοριοποίησης του πετρώματος. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).

5.2.2.3. Μοντέλο πρόβλεψης της ζωής των κοπτικών δίσκων με χρήση των VHNR και UCS

Πέρα από τις εξισώσεις συσχέτισης της ζωής του κοπτικού άκρου με το κάθε χαρακτηριστικό ανεξάρτητα, έγινε έρευνα στη συσχέτιση με συνδυασμό χαρακτηριστικών. Τελικά, μια σχέση παρουσίασε καλή συσχέτιση με τη ζωή των κοπτικών, χρησιμοποιώντας τις τιμές VHNR και UCS ως μεταβλητές:

$$H_f = -2.669VHNR - 7.891UCS + 3430.955 \quad (5.24)$$

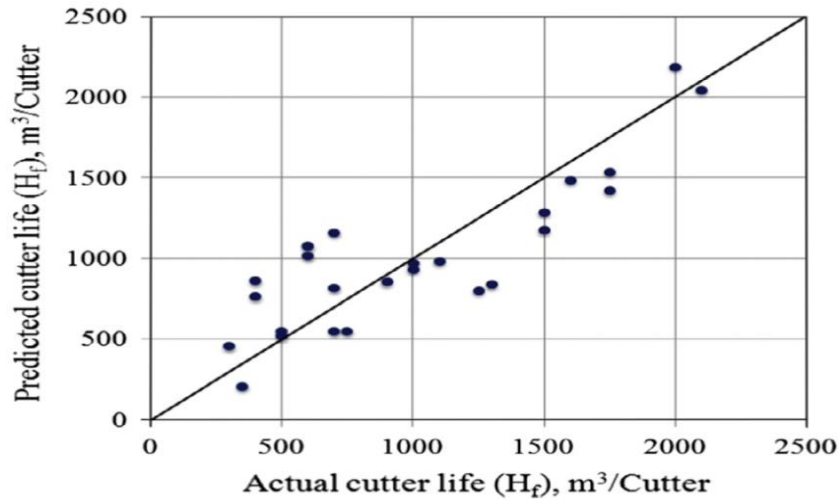
Η εξίσωση παρουσίασε συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 69.3\%$ όπως αναλύεται στον Πίνακα 5.2:

Model	R	R^2	Adjusted R^2	Std. error of the estimate		
<i>(a) Model summary</i>						
1	0.847	0.717	0.693	298.61		
Model	Unstandardized coefficients			Standardized coefficients	t	Sig.
		B	Std. error	Beta		
<i>(b) Coefficients</i>						
1	(Constant)	3430.955	330.712		10.374	0.000
	VHNR	-2.669	0.643	-0.566	-4.147	0.000
	UCS	-7.891	2.885	-0.374	-2.736	0.012
Model		Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
<i>(c) Anova</i>						
1	Regression	5417866.571	2	2708933.286	30.379	0.000
	Residual	2140096.392	24	89170.683		
	Total	7557962.963	26			

Πίνακας 5.2 - Παρουσίαση της στατιστικής ανάλυσης του μοντέλου δύο μεταβλητών του Hassanpour. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).

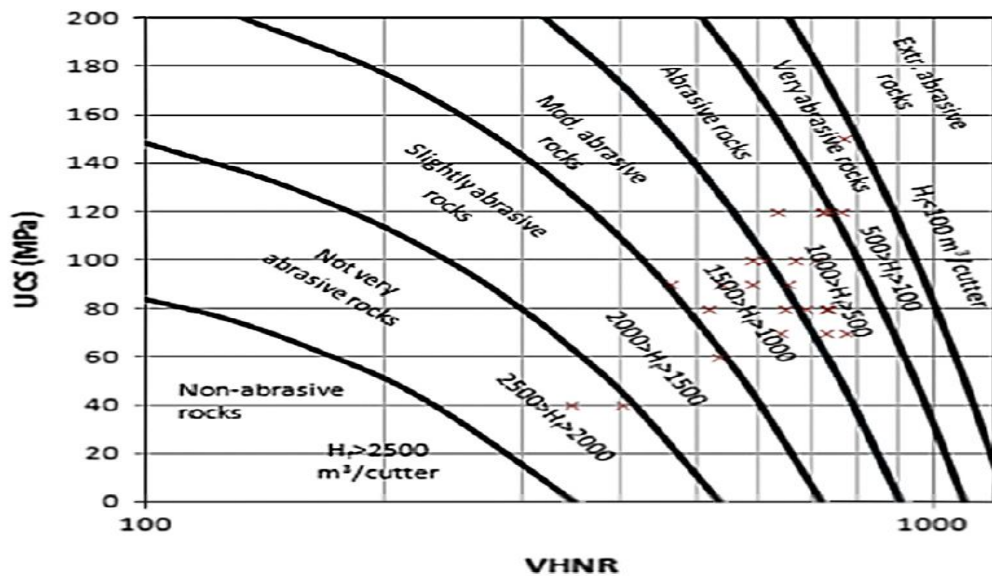
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΟΝΤΕΛΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

Οι τιμές ζωής που προβλέφθηκαν συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές που μετρήθηκαν στο Διάγραμμα 5.4:



Διάγραμμα 5.4 - Σύγκριση υπολογισμένων με πραγματικές τιμές του μοντέλου δύο μεταβλητών του Hassanpour. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).

Ακόμα, δίνεται το Διάγραμμα 5.5 UCS - VHNR με περιοχές ανάλογα με την ικανότητα απόξεσης ενός πετρώματος:



Διάγραμμα 5.5 - Βοηθητικό γράφημα για τον χαρακτηρισμό των πετρωμάτων ως προς την ικανότητα απόξεσής τους σε ζώνες συνδυασμών τιμών UCS και VHNR. Πηγή: Hassanpour et al. (2014).

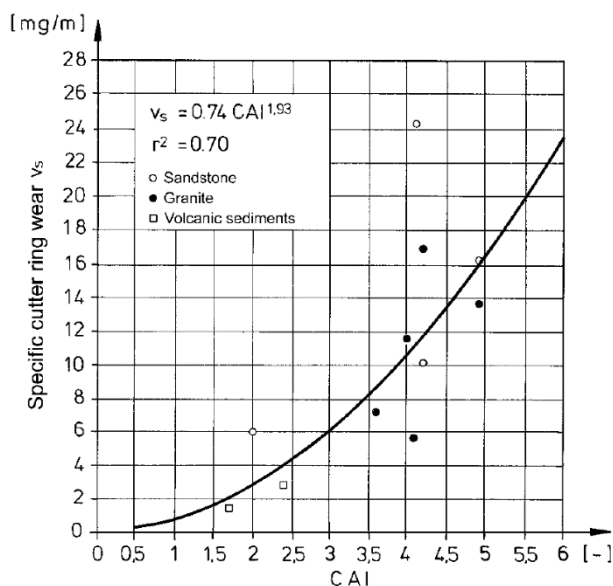
5.2.3. Μοντέλο κατά Maidl (2008)

Ο Maidl (2008) αναφέρθηκε στη συσχέτιση της ειδικής φθοράς των κοπτικών δίσκων των TBM με τον δείκτη ικανότητας απόξεσης CAI ενός πετρώματος που πρότεινε ο Gehring το 1995. Η εξίσωση που προτάθηκε από τον Gehring δίνεται στη σχέση (5.25).

$$v_s = 0.74CAI^{1.93} \quad (5.25)$$

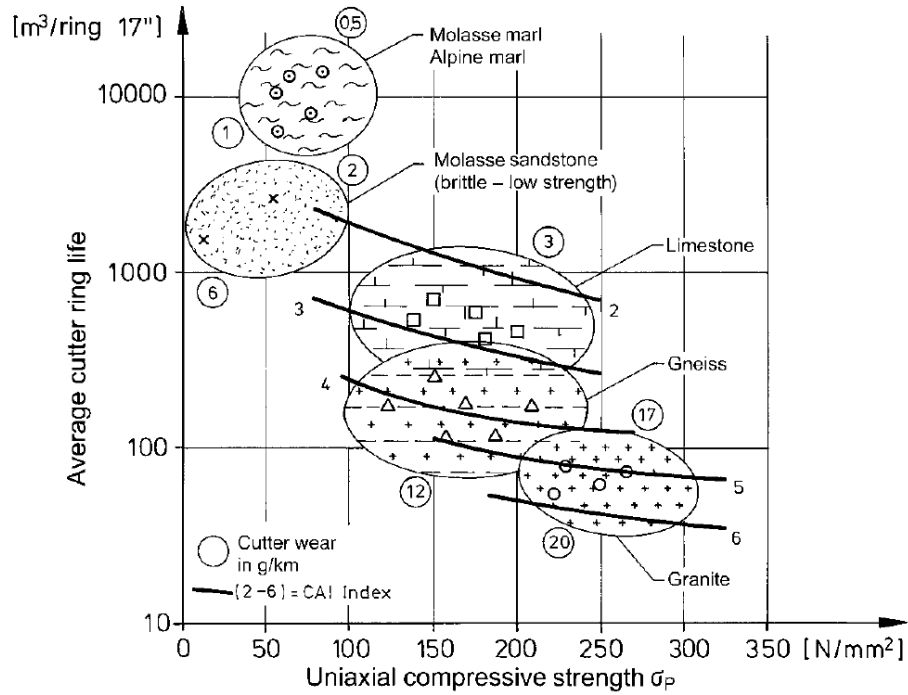
όπου v_s : η ειδική φθορά των κοπτικών άκρων, σε mg/m.

Η εξίσωση αναπαρίσταται γραφικά στο Διάγραμμα 5.6, μαζί με τις δοκιμές που διεξήγαγε ο Gehring:



Διάγραμμα 5.6 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Gehring. Πηγή: Maidl (2008).

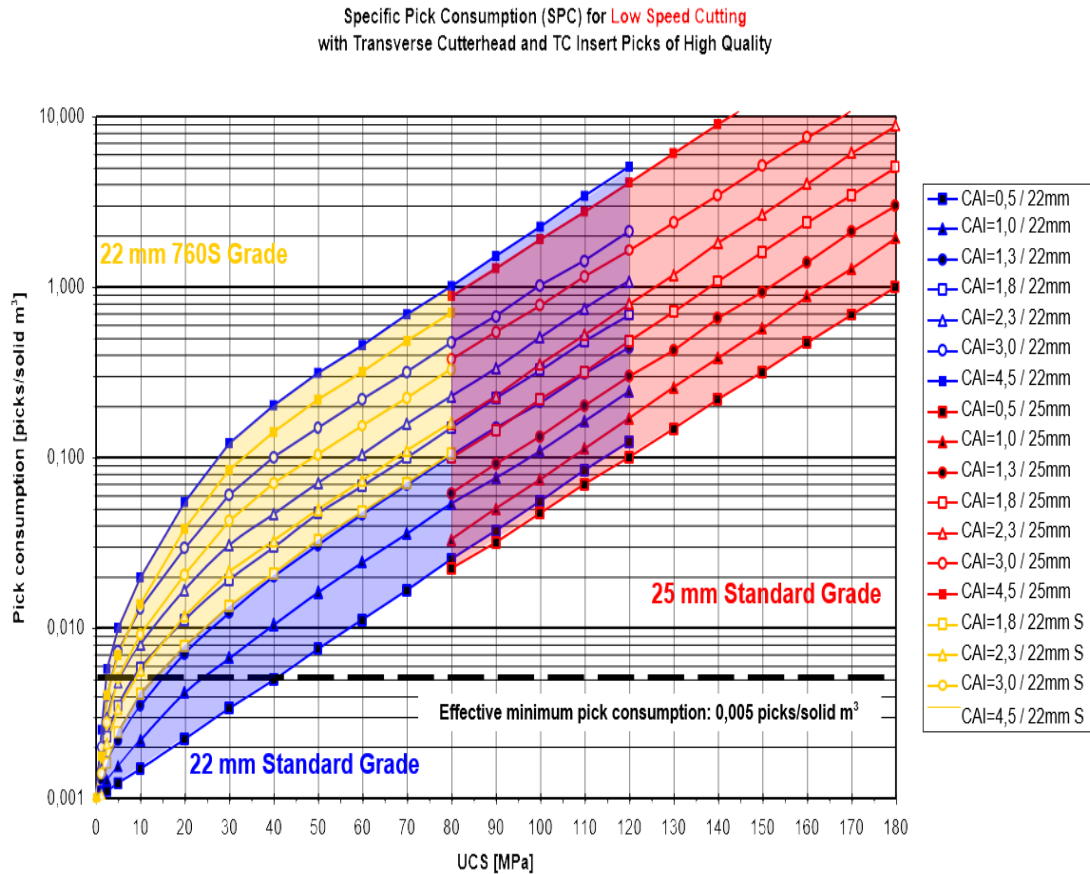
Ο Maidl αναφέρει πως ο συντελεστής στη σχέση (5.25) είναι πιο αντιπροσωπευτικός όταν παίρνει την τιμή 0.65 αντί 0.74, αιτιολογώντας το στην εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών για την κατασκευή των κοπτικών άκρων. Ακόμη, αναφέρει τη ζωή των κοπτικών δίσκων, διαμέτρου 17 ιντσών (43.18 cm), σε σχέση με την αντοχή UCS του πετρώματος, σημειώνοντας περιοχές διαφόρων ειδών πετρωμάτων και τιμών CAI στο Διάγραμμα 5.7.



Διάγραμμα 5.7 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Maidl. Πηγή: Maidl (2008).

5.2.4. Μοντέλο κατά Sandvik (2020)

Η Sandvik ως κατασκευάστρια μηχανημάτων και κοπτικών για την εξόρυξη πετρωμάτων, διαθέτει πληροφορίες για την κατανάλωση κοπτικών άκρων κατά την εξόρυξη. Ένα γράφημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της αναμενόμενης κατανάλωσης κοπτικών δίνεται στο Διάγραμμα 5.8:



Διάγραμμα 5.8 - Γράφημα εκτίμησης της φθοράς σε κοπτικά άκρα της Sandvik. Πηγή: Sandvik (2020).

Το Διάγραμμα 5.8 δείχνει την κατανάλωση των κοπτικών άκρων στην κεφαλή ενός roadheader εγκάρσιου τύπου ανά όγκο εξορυγμένου πετρώματος σε σχέση με την UCS του πετρώματος. Αναφέρονται δύο είδη υλικών για τα κοπτικά άκρα και δύο διαφορετικές διαμέτροι των άκρων, δείχνοντας μια σχετικά μικρή διακύμανση της φθοράς. Όλα τα μεγέθη συσχετίζονται με δεδομένο CAI του πετρώματος. Παρατηρείται πως για UCS > 40 MPa η φθορά αυξάνεται με οιονεί εκθετικό ρυθμό σε σχέση με τη UCS σε δεδομένη τιμή CAI. Ακόμα, σύμφωνα με τις πληροφορίες της Sandvik, η ελάχιστη κατανάλωση στην πράξη είναι τουλάχιστον 0.005 άκρα ανά m³ *in-situ* πετρώματος, ενώ η μέγιστη οικονομικά αποδεκτή τιμή είναι στα 0.3 άκρα ανά m³ *in-situ* πετρώματος και δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή 0.6.

5.2.5. Μοντέλο κατά Bieniawski (2009)

Στην ερευνά του, ο Bieniawski (2009), συσχέτισε τη φθορά των κοπτικών άκρων των TBM με το δείκτη εξορυξιμότητας της βραχώμαζας (Rock Mass Excavability index ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

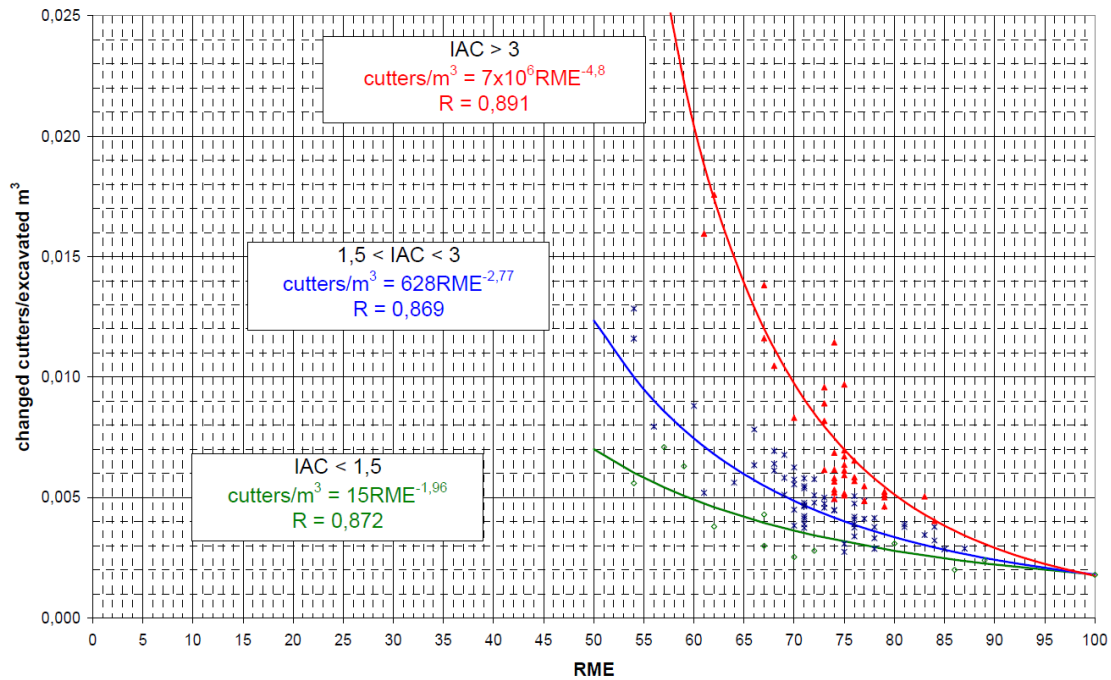
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

- RME), όπως αναφέρεται από τον ίδιο (2008), ανάλογα με την τιμή του CAI του πετρώματος (αναφέρεται και ως “IAC” στα σχήματα). Ο RME παίρνει τιμές από 0 έως 100 (αδιάστατο μέγεθος), υπολογίζεται με βάση τον Πίνακα 5.3 και η τιμή του είναι ανάλογη με την ευκολία εξόρυξης του πετρώματος. Χωρίζει τις μετρήσεις σε δύο κατηγορίες με βάση την αντοχή σε θλίψη του πετρώματος σ_{ci} .

Uniaxial compressive strength of intact rock [0 - 25 points]										
σ_c (MPa)	<5		5-30		30-90		90-180		>180	
rating	4		14		25		14		0	
Drillability [0 – 15 points]										
DRI	>80		80-65		65-50		50-40		<40	
Rating	15		10		7		3		0	
Discontinuities in front of the tunnel face [0 – 30 points]										
Homogeneity			Number of joints per meter					Orientation with respect to tunnel axis		
Homogeneous		Mixed	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblique	Parallel
Rating	10	0	2	7	15	10	0	5	3	0
Stand up time [0 – 25 points]										
Hours	<5		5-24		24-96		96-192		>192	
Rating	0		2		10		15		25	
Groundwater inflow [0 – 5 points]										
Liters/sec	>100		70-100		30-70		10-30		<10	
Rating	0		1		2		4		5	

Πίνακας 5.3 - Υπολογισμός του δείκτη RME. Πηγή: Bieniawski (2008).

5.2.5.1. Η φθορά των άκρων όταν $\sigma_{ci} > 45$ MPa



Διάγραμμα 5.9 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Bieniawski για $\sigma_{ci} > 45$ MPa. Πηγή: Bieniawski (2009).

Στην περίπτωση που το πέτρωμα έχει μέση έως υψηλή αντοχή, δηλαδή πάνω από 45 MPa, οι εξισώσεις που δίνονται αφορούν για $RME > 50$, επειδή δεν υπάρχουν δεδομένα για εξορύξεις με χαμηλότερο RME, εφόσον για $\sigma_{ci} > 45$ MPa και $RME < 50$ το πέτρωμα δεν μπορεί να εξορυχθεί με μηχανικά μέσα (Bieniawski et al., 2008). Δίνονται τρεις εξισώσεις:

Όταν $CAI > 3$:

$$\frac{\text{Κοπτικά άκρα}}{\text{m}^3 \text{εξορυγμένου πετρώματος}} = \frac{7 \cdot 10^6}{RME^{4.8}} \quad (5.26)$$

Όταν $1.5 < CAI < 3$:

$$\frac{\text{Κοπτικά άκρα}}{\text{m}^3 \text{εξορυγμένου πετρώματος}} = \frac{628}{RME^{2.77}} \quad (5.27)$$

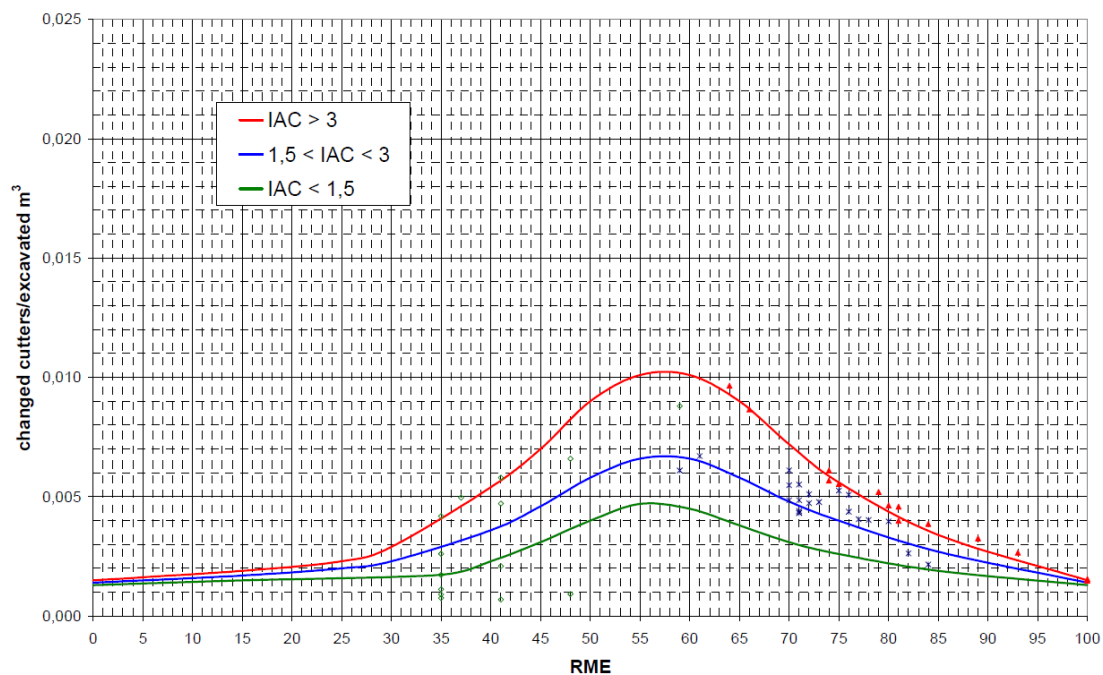
Όταν $CAI < 1.5$:

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

$$\frac{\text{Κοπτικά άκρα}}{\text{m}^3 \text{εξορυγμένου πετρώματος}} = \frac{15}{\text{RME}^{1.96}} \quad (5.28)$$

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5.9, βρέθηκε καλή συσχέτιση με τις εξισώσεις και στις τρεις περιπτώσεις, με συντελεστή συσχέτισης $R > 0.86$.

5.2.5.2. Η φθορά των άκρων όταν $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$



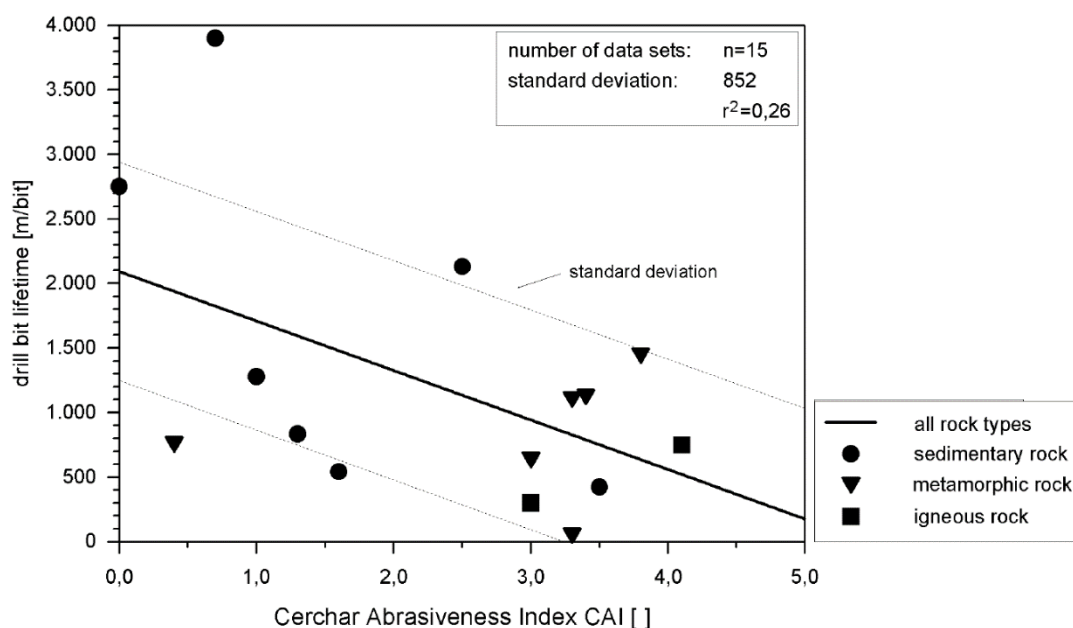
Διάγραμμα 5.10 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Bieniawski για $\sigma_{ci} < 45 \text{ MPa}$. Πηγή: Bieniawski (2009).

Στην κατηγορία των πετρωμάτων με χαμηλότερη αντοχή, οι μετρήσεις ήταν σαφώς λιγότερες από τις μετρήσεις της άλλης κατηγορίας και δε βρέθηκε κάποια σχέση μεταξύ των παραγόντων. Παρόλα αυτά, κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 5.10 της φθοράς των κοπτικών άκρων σε σχέση με τον RME για τις τρεις περιοχές CAI στο οποίο σημειώνεται γραφικά η συνάρτηση συσχέτισής τους.

5.2.6. Μοντέλα κατά Plinninger et al. (2002)

Οι Plinninger et al. κάνουν αναφορές σε διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούν ξεχωριστούς δείκτες για την εκτίμηση της φθοράς, συγκρίνοντας ταυτόχρονα την αποτελεσματικότητά τους στα πραγματικά δεδομένα. Από αυτά, αναφέρεται το μοντέλο που χρησιμοποιεί τον δείκτη CAI, τον δείκτη RAI και τη σκληρότητα Vickers του πετρώματος (VHNR).

Με βάση τις τιμές από 15 μετρήσεις σε πετρώματα διαφόρων ειδών, ο CAI δεν μπορεί να δώσει ακριβείς τιμές για την πρόβλεψη φθοράς ενός κοπτικού άκρου. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5.11, η τυπική απόκλιση σε γραμμικό μοντέλο είναι ίση με 852 m/bit και ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 είναι ίσος με 0.26, δηλαδή υπάρχει χαμηλός βαθμός συσχέτισης.



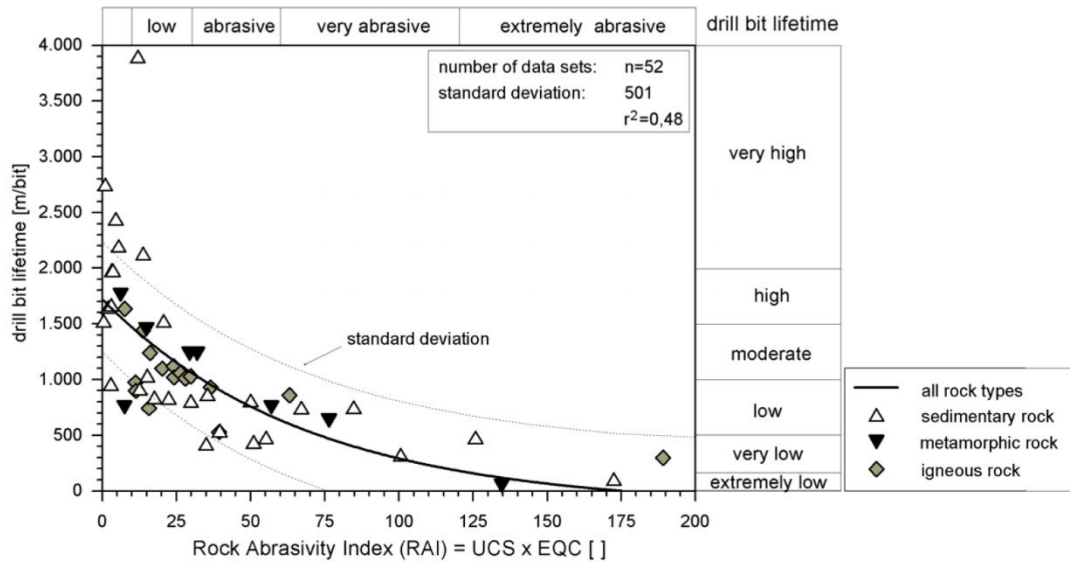
Διάγραμμα 5.11 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Plinninger με χρήση του δείκτη CAI. Πηγή: Plinninger et al. (2002).

Ο υπολογισμός της φθοράς μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας το γινόμενο της περιεκτικότητας αποξεστικών ορυκτών του πετρώματος με τη σκληρότητά τους. Η τιμή του AMC (Abrasive Mineral Content) γίνεται με τη σκληρότητα των πετρωμάτων στην κλίμακα Mohs, η τιμή VHNR (Vickers Hardness Number of the Rock) με τη σκληρότητα κατά Vickers και η τιμή Q_{eq} με τη σκληρότητα κατά Rosiwal. Ακόμα, μπορεί να γίνει υπολογισμός με μια διασκευασμένη μορφή του δείκτη φθοράς του Schimazek από τον Ewendt το 1980, με χρήση του $I_{s(50)}$ (Point Load Strength Index).

Μια μέθοδος με καλύτερη προσέγγιση από τη χρήση του $I_{s(50)}$ είναι με το δείκτη RAI (Rock Abrasivity Index) σε συνδυασμό με διάφορα στοιχεία του πετρώματος, μακροσκοπικά (έως km) και μικροσκοπικά (έως mm). Η συσχέτιση των τιμών της

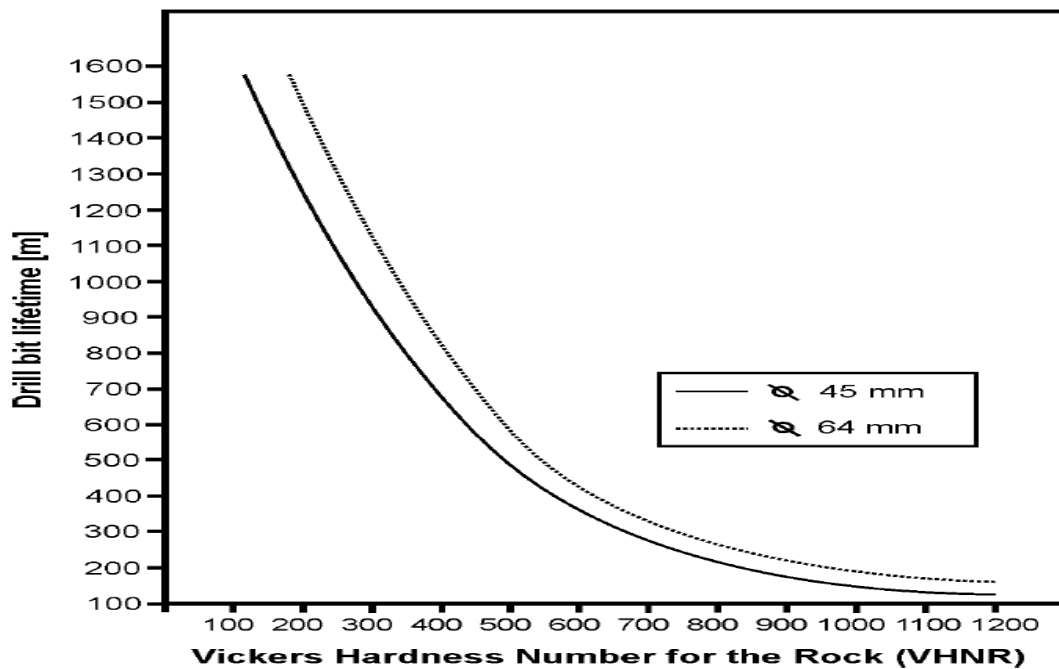
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ

μεθόδου σε διάφορες μετρήσεις, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.12, έδωσε μια προσέγγιση με τυπική απόκλιση 501 m/bit και συντελεστή προσδιορισμού r^2 ίσο με 0.48, δηλαδή μετρίως ικανοποιητική.



Διάγραμμα 5.12 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Plinninger με χρήση του δείκτη RAI. Πηγή: Plinninger et al. (2002).

Τέλος, αναφέρεται το μοντέλο που κατασκευάστηκε από τον Johannessen το 1995 που χρησιμοποιεί τη σκληρότητα VHNR του πετρώματος, για δύο μεγέθη κοπτικών ακρών, ανάλογα με τη διάμετρό τους. Το μοντέλο υπολογίζει τον χρόνο ζωής σε μέτρα εξόρυξης του πετρώματος και απεικονίζεται στο Διάγραμμα 5.13:



Διάγραμμα 5.13 - Μοντέλο εκτίμησης της φθοράς του Johannessen. Πηγή: Plinninger et al. (2002).

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

Κεφάλαιο 6: Ανάπτυξη εφαρμογής για την εκτίμηση της φθοράς των κοπτικών

6.1. Γλώσσα Προγραμματισμού Python

Η Python (www.python.org) είναι μια υψηλού επιπέδου, διερμηνευόμενη γλώσσα προγραμματισμού που κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1991 από τον Guido van Rossum. Σχεδιάστηκε για να είναι εύκολη στην εκμάθηση, ιδιαίτερα ευανάγνωστη και αρκετά ευέλικτη ώστε να μπορεί να χειριστεί ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει αποκτήσει μεγάλη δημοτικότητα και έχει γίνει μία από τις πιο διαδεδομένες γλώσσες προγραμματισμού στον κόσμο.

Πήρε το όνομά της από την κωμική ομάδα Monty Python και η σύνταξη και η φιλοσοφία σχεδιασμού της αντικατοπτρίζουν την αίσθηση του χιούμορ του δημιουργού της. Ο σχεδιαστικός στόχος της ήταν να είναι εύκολη για τους νέους προγραμματιστές, ενώ παράλληλα να προσφέρει προηγμένα χαρακτηριστικά για τους πιο έμπειρους. Είναι γνωστή για τη χρήση κενών διαστημάτων στη σύνταξη της, πράγμα που συμβάλλει στη βελτίωση της αναγνωσιμότητας του κώδικα. Επίσης, για τη χρήση λέξεων-κλειδιών που μοιάζουν με τις αντίστοιχες αγγλικές λέξεις, οι οποίες καθιστούν εύκολη την εκμάθησή της από τους αγγλόφωνους.

Στα πρώτα χρόνια της ύπαρξής της, χρησιμοποιήθηκε κυρίως για αυτοματοποίηση και σύνταξη μακροεντολών. Ωστόσο, καθώς ωριμάζε, έγινε ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση δεδομένων, τον επιστημονικό υπολογισμό και την ανάπτυξη ιστοσελίδων. Σήμερα, χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, όπως η χρηματοοικονομική, οι επιστήμες υγείας, η εκπαίδευση και η ανάπτυξη λογισμικού.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες πίσω από την επιτυχία της ήταν το ισχυρό σύστημα βιβλιοθηκών (libraries) και ενοτήτων (modules) που διαθέτει (Basileiadou, 2020). Αυτό το σύστημα διευκολύνει τους προγραμματιστές να επεκτείνουν τη λειτουργικότητα της γλώσσας και να προσθέσουν νέα χαρακτηριστικά.

Με την πάροδο των ετών, έχει υποστεί αρκετές σημαντικές αναβαθμίσεις και βελτιώσεις, καθεμία από τις οποίες έχει προσθέσει νέα χαρακτηριστικά και δυνατότητες στη γλώσσα. Η Python 2.0, η οποία κυκλοφόρησε το 2000, εισήγαγε μια σειρά από σημαντικά νέα χαρακτηριστικά, όπως η νοητή λίστα (list comprehension), η συλλογή απορριμμάτων (garbage collection) και η υποστήριξη Unicode (Panagiotakopoulos, 2022). Η Python 3.0 κυκλοφόρησε το 2008 και εισήγαγε μια σειρά από ριζικές αλλαγές προκειμένου να βελτιωθεί ο σχεδιασμός και η απόδοση της γλώσσας.

Τα τελευταία χρόνια, η Python συνέχισε να εξελίσσεται και να αυξάνει τη δημοτικότητά της. Η άνοδος της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης την

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

κατέστησαν ιδανική επιλογή για τους επιστήμονες δεδομένων και τους μηχανικούς μηχανικής μάθησης.

6.1.1. Δυνατότητες και χαρακτηριστικά της Python

α) Εφαρμογές

Η Python χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάπτυξη ιστοσελίδων και εφαρμογών τόσο front-end (δηλαδή αυτό που βλέπει ο χρήστης πελάτης ή cloud client), όσο και back-end (όπου βρίσκονται οι servers και ο αποθηκευτικός χώρος στον οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα, τα οποία είναι προσβάσιμα σε πολλούς πελάτες) (Basileiadou, 2020). Προσφέρει συνεχή υποστήριξη στην επιστημονική πληροφορική και εφαρμόζεται στην οπτικοποίηση, μοντελοποίηση και προσομοίωση, στην τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση.

β) Κοινότητα και υποστήριξη

Η Python διαθέτει μια μεγάλη και ενεργή κοινότητα προγραμματιστών. Αυτή η κοινότητα παρέχει εκτεταμένη υποστήριξη και πόρους για τους χρήστες, συμπεριλαμβανομένων διαδικτυακών φόρουμ, τεκμηρίωσης, σεμιναρίων και βιβλιοθηκών κώδικα. Επιπλέον, η Python είναι μια γλώσσα ανοικτού κώδικα, πράγμα που σημαίνει ότι ο πηγαίος κώδικάς της είναι ελεύθερα διαθέσιμος και μπορεί να τροποποιηθεί και να διανεμηθεί από οποιονδήποτε.

γ) Ευελιξία

Η διερμηνευόμενη φύση της Python καθιστά εύκολη την ανάπτυξη πρωτοτύπων και τη δοκιμή κώδικα, γεγονός που μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικό χρόνο για τους προγραμματιστές.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της είναι η ευκολία ενσωμάτωσής της σε άλλες τεχνολογίες και συστήματα, γεγονός που την καθιστά ιδανική επιλογή για τη δημιουργία σύνθετων και πολυεπίπεδων συστημάτων. Αυτό έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση της σε πολλούς τομείς. Ακόμη, η αναγνωσιμότητά της διευκολύνει τη συνεργασία με άλλα άτομα σε ένα έργο, καθώς και τη συντήρηση του κώδικα με την πάροδο του χρόνου.

Τέλος, τόσο η απλότητα της σύνταξης της Python και η υποστήριξή της για διανυσματικές πράξεις όσο και ότι πρόκειται για μια εξαιρετικά κλιμακούμενη γλώσσα, την καθιστούν καλή επιλογή για την ανάπτυξη μεγάλων και πολύπλοκων εφαρμογών. Η επεκτασιμότητά της οφείλεται εν μέρει στο σύστημα δυναμικής τυποποίησης, το οποίο επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση της μνήμης και μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων σε μεγάλες βάσεις κώδικα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

δ) Βιβλιοθήκες και ενότητες

Οι βιβλιοθήκες της παρέχουν προ-γραμμένο κώδικα που μπορεί εύκολα να εισαχθεί σε ένα έργο Python, γεγονός που μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικό χρόνο και προσπάθεια για τους προγραμματιστές.

Οι ισχυρές βιβλιοθήκες όπως οι NumPy, για αριθμητικούς υπολογισμούς μαθηματικών πράξεων σε πίνακες που είναι απαραίτητοι για πολλές εργασίες ανάλυσης δεδομένων, η Pandas, κατάλληλη για εργασίες προετοιμασίας και προεπεξεργασίας δεδομένων και η Matplotlib, για την οπτικοποίηση δεδομένων, για τη δημιουργία γραφημάτων, διαγραμμάτων και άλλων οπτικών αναπαραστάσεων καθιστούν την Python μια δημοφιλή επιλογή για την ανάλυση και την οπτικοποίηση δεδομένων. Το πλαίσιο Django παρέχει μια πλήρη πλατφόρμα για τη δημιουργία εφαρμογών ιστού. Μια από τις πιο δημοφιλείς βιβλιοθήκες είναι η TensorFlow, η οποία αναπτύχθηκε από τη Google και είναι ανοιχτού κώδικα. Χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης (Machine Learning - ML) τόσο σε ερευνητικό περιβάλλον, όσο και για την παραγωγή. Η TensorFlow έχει σχεδιαστεί για να είναι ευέλικτη, κλιμακούμενη και εύκολη στη χρήση και υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, συμπεριλαμβανομένων της βαθιάς μάθησης (Deep Learning - DL) και των νευρωνικών δικτύων (Neural Networks - NN) (Panagiotakopoulos, 2022).

Επίσης, δημοφιλής βιβλιοθήκη για τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI) και ML είναι η PyTorch, η οποία αναπτύχθηκε από το Facebook (νυν Meta), για τη δημιουργία και την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης, για εργασίες βαθιάς μάθησης και όρασης υπολογιστών για ερευνητές και επαγγελματίες σε αυτούς τους τομείς. Το Scikit-Learn παρέχει ένα απλό και αποτελεσματικό σύνολο εργαλείων για την κατασκευή και την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης. Το Seaborn εστιάζει στην οπτικοποίηση δεδομένων και παρέχει μια διεπαφή υψηλού επιπέδου για τη δημιουργία καλαίσθητων και κατατοπιστικών οπτικοποιήσεων, όπως και το Plotly που παρέχει μια διαδραστική διαδικτυακή πλατφόρμα για τη δημιουργία και την κοινή χρήση οπτικοποιήσεων.

ε) Το μέλλον της Python

Η Python συνεχίζει να αυξάνει τη δημοτικότητά της και θεωρείται ευρέως ως μία από τις σημαντικότερες γλώσσες προγραμματισμού του μέλλοντος. Μια ενδιαφέρουσα εξέλιξή της είναι τα σημειωματάρια Jupyter, τα οποία παρέχουν μια διαδικτυακή διεπαφή για την εργασία με κώδικα Python και διευκολύνουν τον πειραματισμό με νέες ιδέες και την ανταλλαγή κώδικα και αποτελεσμάτων με άλλους.

Η Python έχει γίνει μια δημοφιλής επιλογή τόσο για τους προγραμματιστές που εργάζονται στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης, όσο και για τους επιστήμονες δεδομένων και τους ερευνητές που πρέπει να δημιουργήσουν γρήγορα πρωτότυπα νέων ιδεών.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

6.2. Ανάπτυξη εφαρμογής

Με την αύξηση της χρήσης των ηλεκτρονικών μέσων, υπάρχει η γενική κατεύθυνση αυτοματοποίησης εφαρμογών σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Στο παρόν κεφάλαιο, τα μοντέλα εκτίμησης της φθοράς που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται ως βάση για την ανάπτυξη εφαρμογής εκτίμησης της αναμενόμενης φθοράς κοπτικών άκρων σε γλώσσα προγραμματισμού Python, εύκολη στη χρήση και φιλική προς τον χρήστη. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε σε κώδικα εξ αρχής και στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν και στον τρόπο κωδικοποίησης των σχετικών εξισώσεων.

Στην Εικόνα 6.1 φαίνεται ο κώδικας όπου ορίζονται οι βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιηθούν:

```
from tkinter import *
from tkinter import messagebox
from math import pi, exp
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

Εικόνα 6.1 - Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.

Συγκεκριμένα:

Αρχικά, η βιβλιοθήκη «tkinter» είναι που δημιουργεί το GUI (Graphical User Interface), δηλαδή το παράθυρο που βλέπει ο χρήστης και μέσω του οποίου αλληλεπιδρά με την εφαρμογή. Η υποκατηγορία «messagebox» είναι για να εμφανίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου μετά την εισαγωγή των δεδομένων ή να εμφανίζεται σφάλμα, στις περιπτώσεις όπου απαιτείται. Η βασική λειτουργία της βιβλιοθήκης «matplotlib.pyplot» χρησιμοποιείται για την κατασκευή των γραφημάτων των μοντέλων, όπου αυτά είναι διαθέσιμα, με ψευδώνυμο «plt» ώστε να καλείται με μεγαλύτερη ευκολία. Επειδή η καθαυτή Python έχει μόνο βασικές μαθηματικές λειτουργίες, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη «numpy», με ψευδώνυμο «np», η οποία παρέχει περισσότερες δυνατότητες και αξιοποιείται από τη matplotlib.pyplot ώστε να κατασκευαστούν τα γραφήματα. Τέλος, εισάγονται οι αριθμητικές τιμές του π ($\pi \approx 3.14$) και της εκθετικής συνάρτησης (exponential function – exp).

Παρότι κάποια από τα μοντέλα συνοδεύονται από τις μαθηματικές εξισώσεις που τα χαρακτηρίζουν, στις περισσότερες περιπτώσεις αυτές απουσιάζουν. Χρησιμοποιώντας το οπτικό υλικό των γραφημάτων, κάποια εργαλεία μοντελοποίησης γραφημάτων και την προσωπική εμπειρία του προγραμματιστή πάνω στις μαθηματικές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

εξισώσεις και τις γραφικές παραστάσεις τους, τελικά κατασκευάστηκαν εξισώσεις που είναι, όσο το δυνατόν, πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα. Για την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών τιμών, κάποιες από τις εξισώσεις προσεγγίστηκαν τμηματικά, όμως ο τρόπος γραφής του κώδικα είναι παρόμοιος για όλες τις περιπτώσεις. Ένα παράδειγμα εξίσωσης μέσα στον κώδικα είναι στην μέθοδο του Bieniawski (2009) στην περίπτωση που το πέτρωμα έχει αντοχή σε θλίψη $\sigma < 45$ MPa, με $1.5 < CAI < 3$, σε κάθε τιμή του RME από 0 έως 100, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2:

```
elif CAI == 2:
    if 0 <= i < 42:
        j = 0.000062 * i + 0.0014
    elif 42 <= i < 57.5:
        j = 0.000208 * i - 0.0047
    elif 57.5 <= i < 75:
        j = -0.00018 * i + 0.0175
    elif i >= 75:
        j = -0.000104 * i + 0.0118
```

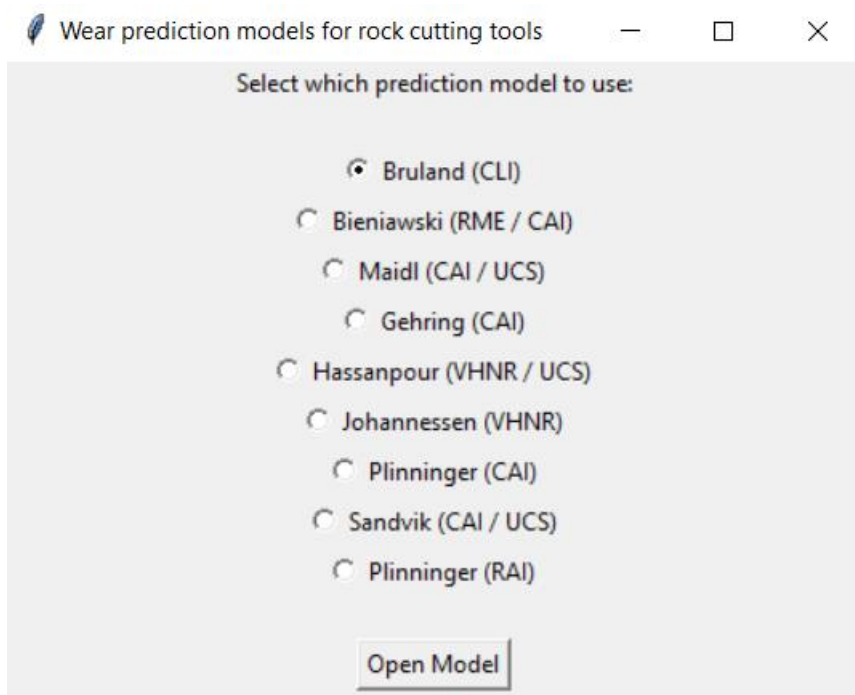
Εικόνα 6.2 - Παράδειγμα προγραμματισμού εξίσωσης μέσα στον κώδικα.

Σημειώνεται ότι CAI είναι η κατηγορία του πετρώματος με βάση τον δείκτη CAI, i είναι οι τιμές του RME και j είναι η φθορά του κοπτικού μετρημένη σε φθαρμένα κοπτικά άκρα ανά όγκο *in-situ* πετρώματος.

6.3. Η εφαρμογή

Ο κώδικας της εφαρμογής είναι σε αρχείο «.py», εφόσον αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της Python, όμως προσφέρεται και εκτελέσιμο αρχείο «.exe» ώστε η εφαρμογή να εκτελείται με ευκολία και σε υπολογιστές όπου δεν είναι εγκατεστημένη η γλώσσα Python. Ανοίγοντας το πρόγραμμα, παρουσιάζεται στον χρήστη το παράθυρο της Εικόνας 6.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ



Εικόνα 6.3 - Αρχικό menu της εφαρμογής.

Όλα τα παράθυρα επιλογών είναι τυπικής μορφής, με κουμπιά για κλείσιμο, μεγέθυνση/σμίκρυνση και ελαχιστοποίηση. Στο αρχικό παράθυρο παρουσιάζονται όλα τα μοντέλα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το κάθε μοντέλο χαρακτηρίζεται από το όνομά του και σε παρένθεση αναφέρονται οι βασικοί δείκτες του πετρώματος που χρησιμοποιούνται για την υπολογισμό της φθοράς ή της ζωής των κοπτικών άκρων. Ο χρήστης επιλέγει το μοντέλο που θέλει να χρησιμοποιήσει και στη συνέχεια πατάει πάνω στο κουμπί «Open Model», με το οποίο εμφανίζεται νέο παράθυρο που θα περιέχει τα απαιτούμενα μεγέθη για το εκάστοτε μοντέλο.

6.3.1. Μοντέλο Bruland (CLI)

Bruland's Method

Cutter diameter = 356mm
 Cutter diameter = 394mm
 Cutter diameter = 432mm
 Cutter diameter = 483mm

Insert CLI (0 - 100):
[Input Field]

Insert Number of Cutters:
[Input Field]

Insert Diameter of TBM (m):
[Input Field]

Insert Quartz Content %:
[Input Field]

Insert Penetration Rate (m/h):
[Input Field]

Insert RPM:
[Input Field]

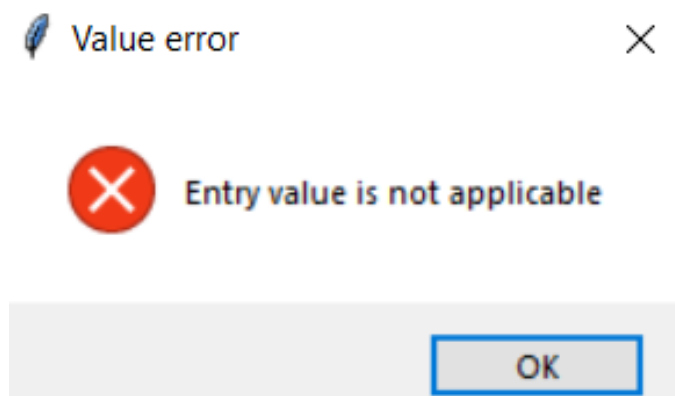
Apply if rock is mica schist, mica gneiss, gneiss, granitic gneiss or granite

Show Graph

Εικόνα 6.4 - Μοντέλο Bruland.

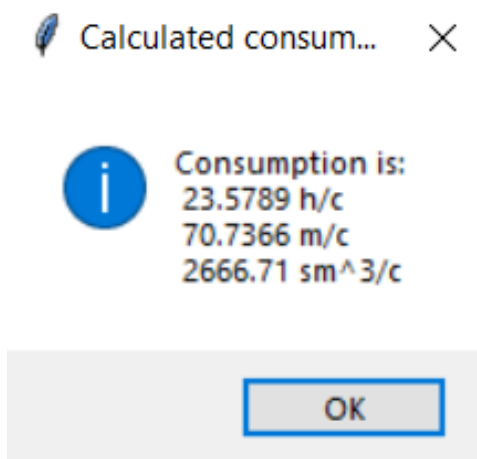
Το πρώτο μοντέλο είναι αυτό που ζητάει τα περισσότερα δεδομένα εισόδου από τον χρήστη. Η βασική του λειτουργία καθορίζεται από την επιλογή της διαμέτρου του κοπτικού δίσκου και τον δείκτη CLI του πετρώματος. Το διάγραμμα προέρχεται από αυτά τα δύο στοιχεία, εφόσον όλες οι υπόλοιπες παράμετροι είναι συντελεστές που μεταβάλλουν την τιμή της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής του κοπτικού. Ο χρήστης καλείται να ορίσει τον δείκτη CLI με τιμές από 0 έως 100, το πλήθος των κοπτικών πάνω στο TBM, τη συνολική διάμετρο της κεφαλής του TBM σε μέτρα, την περιεκτικότητα του πετρώματος σε χαλαζία, το ρυθμό διείδυσης της κεφαλής στο μέτωπο και τις στροφές της κεφαλής του TBM ανά λεπτό (γωνιακή ταχύτητα). Ακόμα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την τελευταία παράμετρο “Apply if rock is mica schist, mica gneiss, gneiss, granitic gneiss or granite” που δίνεται για τα συγκεκριμένα πετρώματα. Όταν εισαχθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, ο χρήστης πατάει πάνω στο κουμπί «Show Graph».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ



Εικόνα 6.5 - Ειδοποίηση σφάλματος.

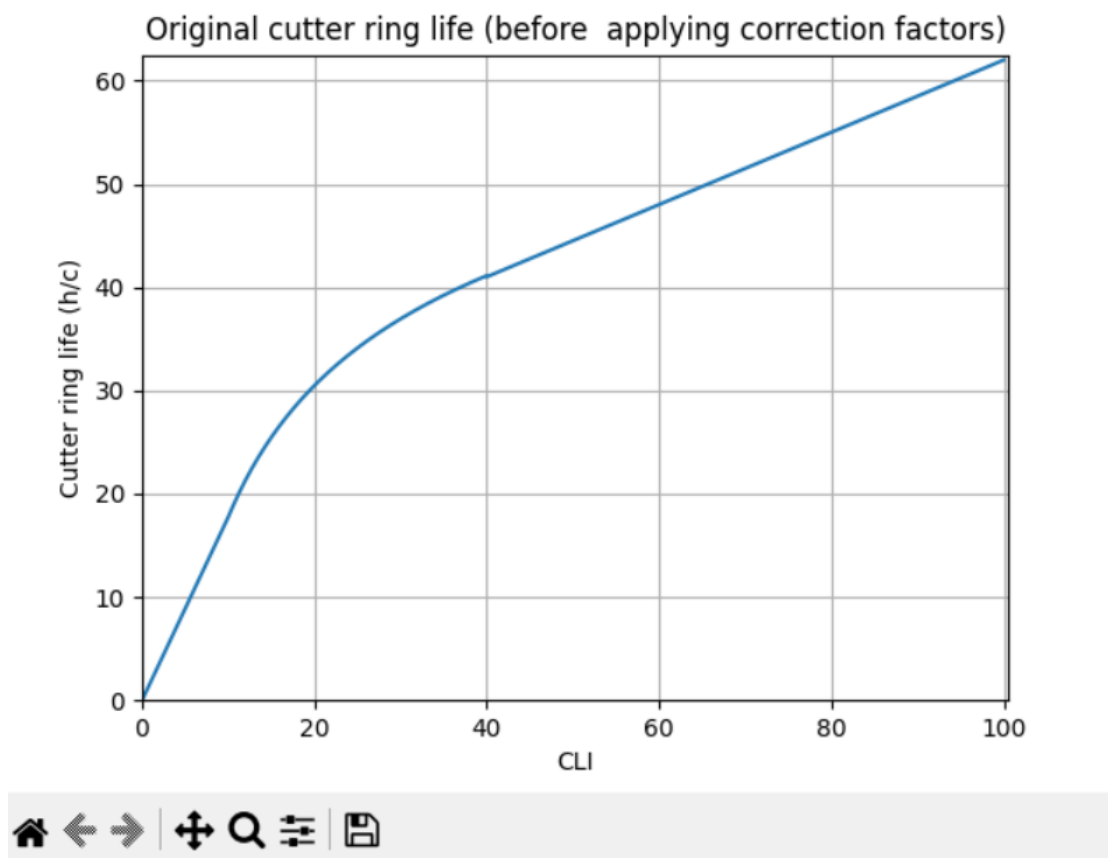
Στην περίπτωση που κάποια τιμή έχει συμπληρωθεί λάθος ή δεν προβλέπεται από το κάθε μοντέλο, εμφανίζεται ανάλογη ειδοποίηση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.5.



Εικόνα 6.6 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Bruland.

Σε αυτό το μοντέλο, με εισαγωγή προβλεπόμενων τιμών, εμφανίζεται παράθυρο με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του κοπτικού άκρου σε ώρες/κοπτικό, μέτρα διείσδυσης/κοπτικό και κυβικά μέτρα *in-situ* πετρώματος/κοπτικό.

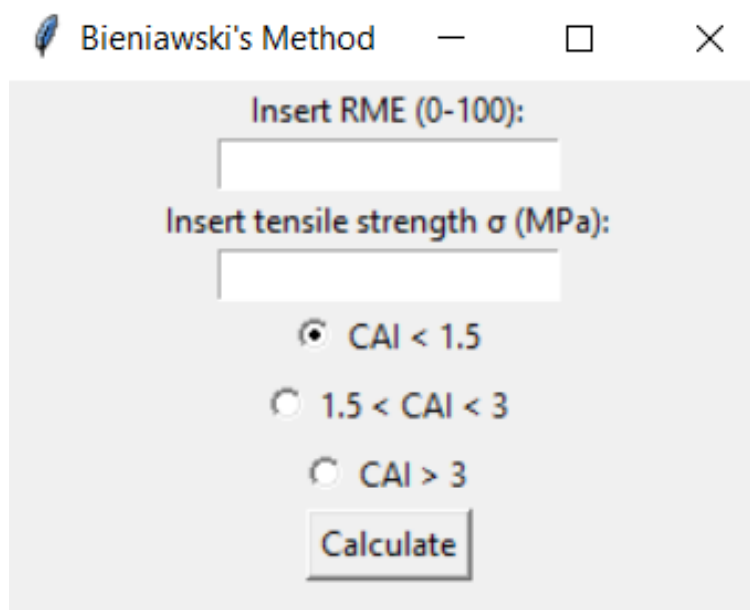
Figure 1



Εικόνα 6.7 - Γράφημα μοντέλου Bruland.

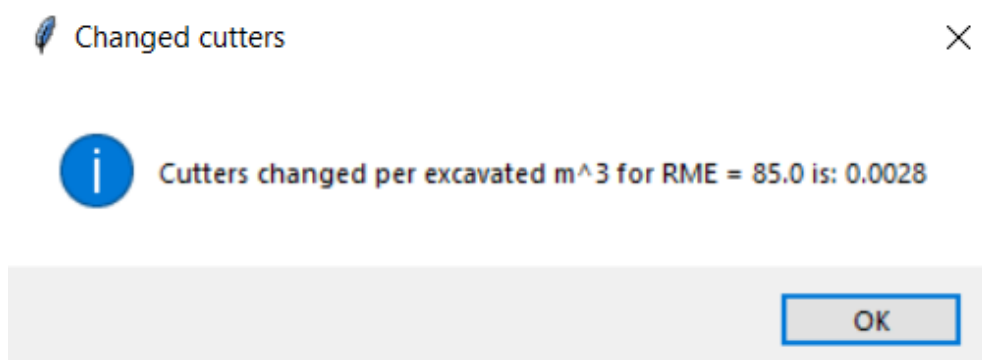
Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται ένα παράθυρο με γράφημα, όπου αυτό είναι διαθέσιμο. Στο γράφημα φαίνονται οι δείκτες που χρησιμοποιούνται και η εκτίμηση της φθοράς σε απώλεια μάζας ή σε διάρκεια ζωής του κοπτικού. Το παράθυρο του γραφήματος περιέχει μεταξύ άλλων και ένα κουμπί με το εικονίδιο μεγεθυντικού φακού, το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να κάνει μεγέθυνση σε κάποια σημεία πάνω στη γραφική παράσταση που ίσως θέλει να μελετήσει. Σε όλα τα γραφήματα -εκτός από αυτό του μοντέλου του Bruland- υποδεικνύεται το σημείο από τις τιμές που εισήγαγε ο χρήστης. Στο μοντέλο Bruland δεν μπορεί να κατασκευαστεί τελικό γράφημα τιμών αφού το αρχικό τροποποιείται ποικιλόμορφα από τις διάφορες παραμέτρους. Σέρνοντας τον δρομέα πάνω στο πλέγμα του γραφήματος, εμφανίζονται οι συντεταγμένες των αξόνων χ και ψ στο κάτω δεξιό μέρος του παραθύρου.

6.3.2. Μοντέλο Bieniawski (RME/CAI)



Εικόνα 6.8 - Μοντέλο Bieniawski.

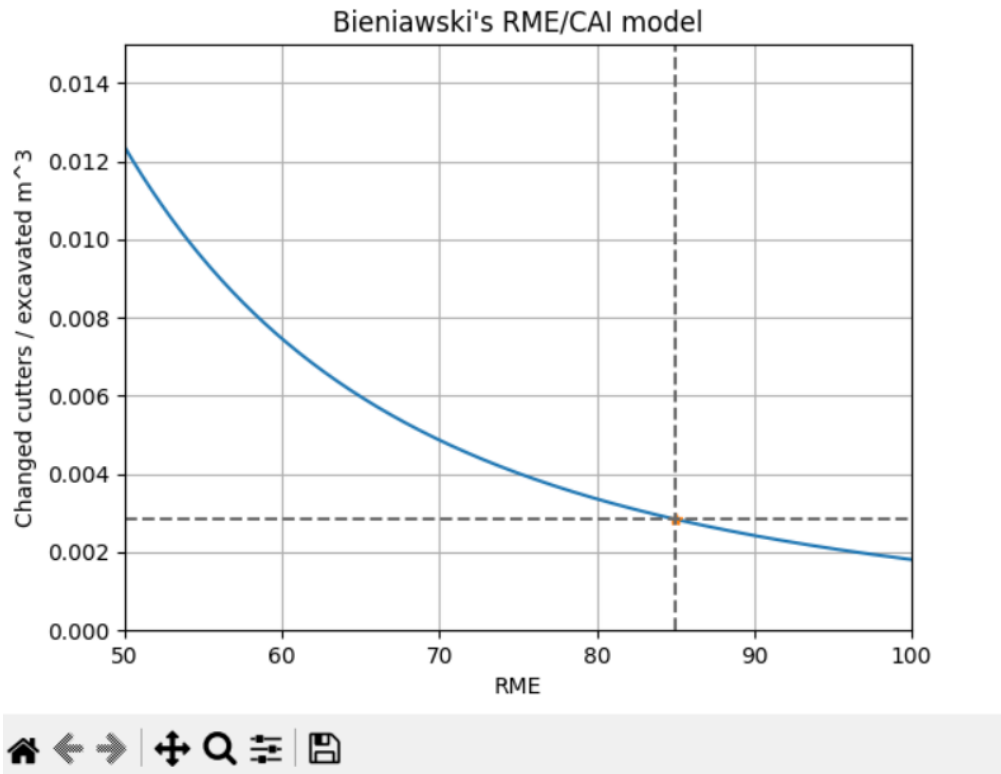
Ζητείται από τον χρήστη να ορίσει τον δείκτη RME του πετρώματος, με τιμές από 0 έως 100 και την αντοχή σε θλίψη σ σε MPa. Ακόμα, ο χρήστης ορίζει την αποξεστικότητα του πετρώματος με βάση τον δείκτη CAI.



Εικόνα 6.9 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Bieniawski.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Figure 1

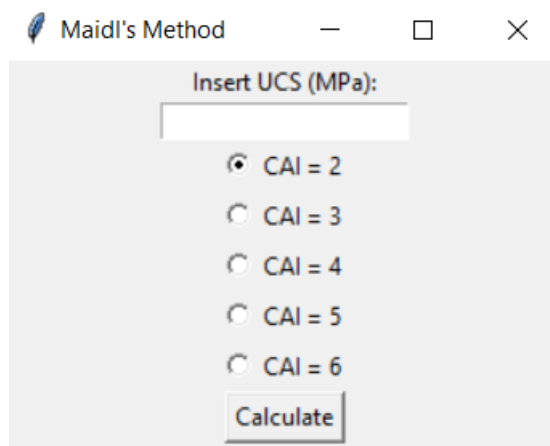


Εικόνα 6.10 - Γράφημα μοντέλου Bieniawski.

Πατώντας στο κουμπί «Calculate», εμφανίζονται οι αναμενόμενες αλλαγές κοπτικών άκρων ανά κυβικό μέτρο εξορυγμένου πετρώματος και στη συνέχεια το ανάλογο γράφημα.

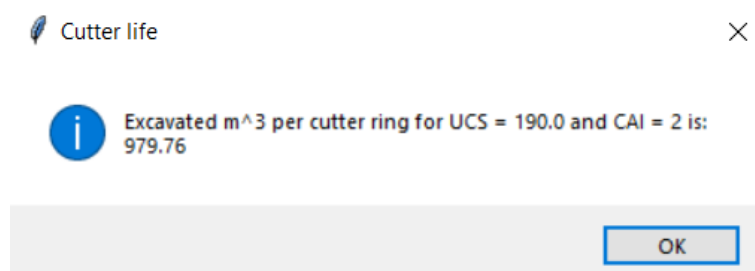
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

6.3.3. Μοντέλο Maidl (CAI/UCS)



Εικόνα 6.11 - Μοντέλο Maidl

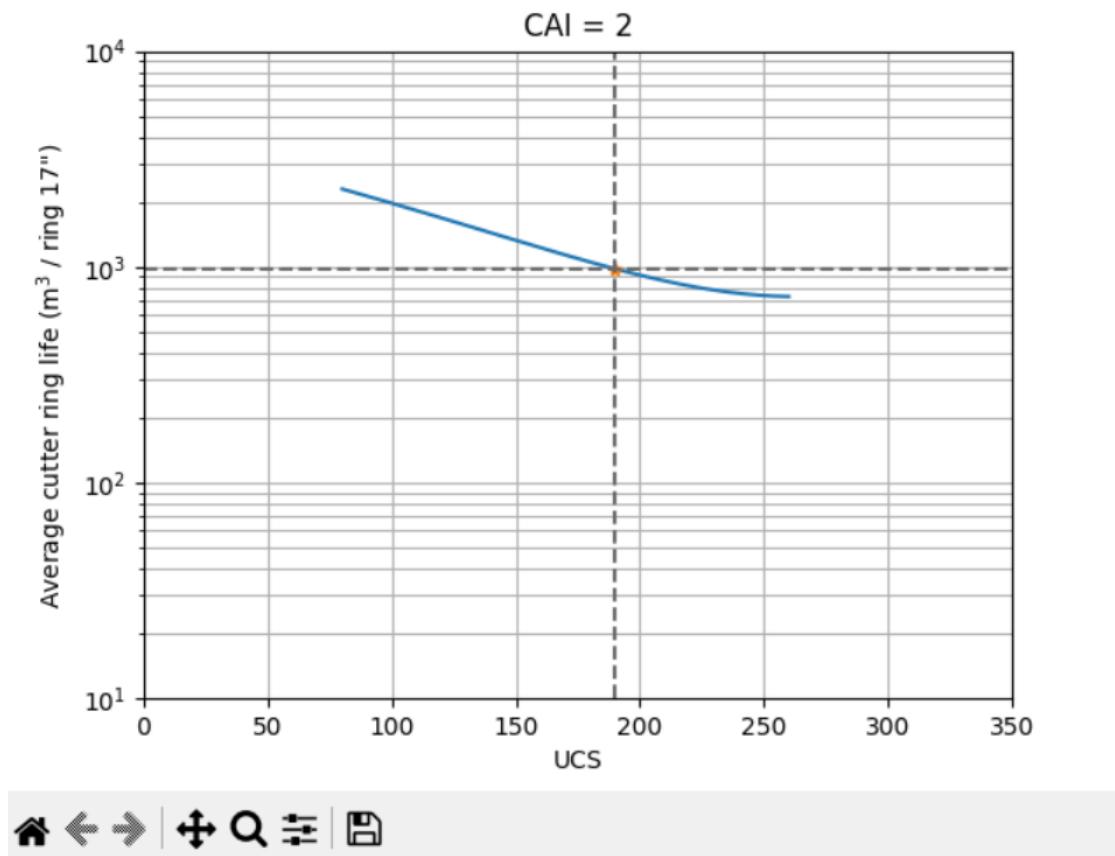
Το μοντέλο του Maidl περιλαμβάνει πέντε κατηγορίες αποξεστικότητα για συγκεκριμένο εύρος τιμών UCS. Ο χρήστης εισάγει την τιμή της UCS σε MPa και επιλέγει την πλησιέστερη κατηγορία CAI του πετρώματος.



Εικόνα 6.12 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Maidl.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Figure 1

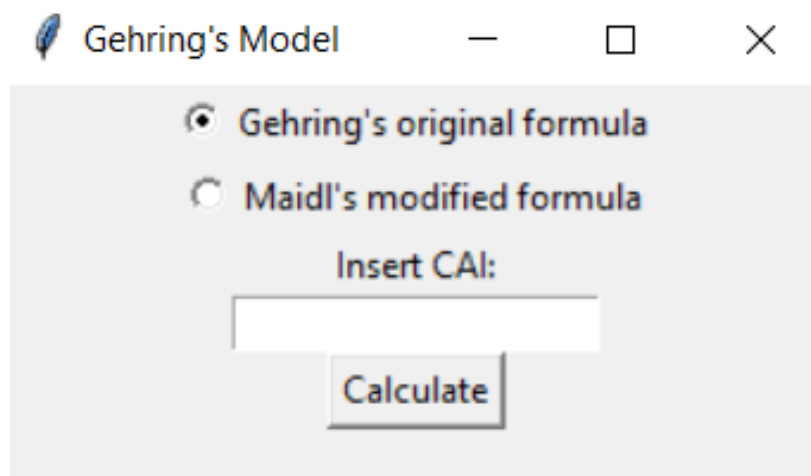


Εικόνα 6.13 - Γράφημα μοντέλου Maidl.

Αφού ο χρήστης πατήσει το κουμπί «Calculate», εμφανίζεται παράθυρο με τη διάρκεια ζωής ενός κοπτικού δίσκου σε κυβικά μέτρα πετρώματος ανά κοπτικό δίσκο και στη συνέχεια το σχετικό γράφημα.

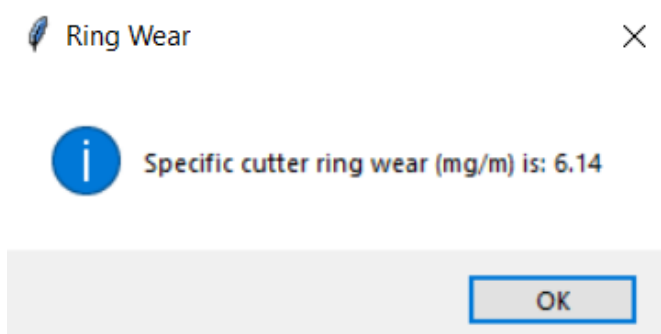
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

6.3.4. Μοντέλο Gehring (CAI)



Εικόνα 6.14 - Μοντέλο Gehring.

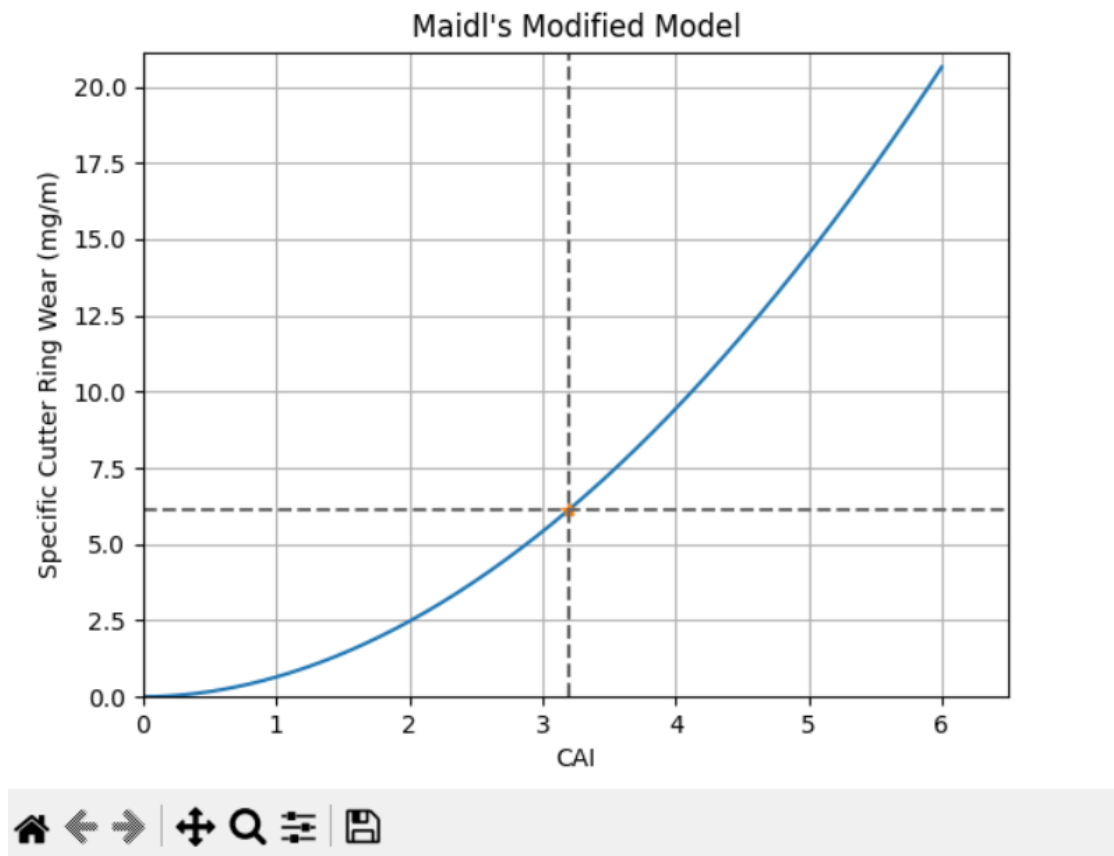
Το μοντέλο αυτό δέχεται ως μόνη μεταβλητή τον δείκτη CAI του πετρώματος, όμως επειδή ο Maidl πρότεινε μια αλλαγή της τιμής στο συντελεστή της εξίσωσης του Gehring, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει την τροποποιημένη εξίσωση για τον υπολογισμό της φθοράς.



Εικόνα 6.15 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Gehring.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

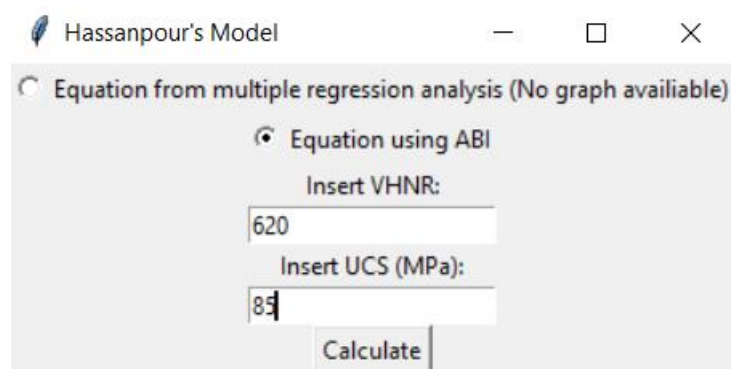
Figure 1



Εικόνα 6.16 - Γράφημα μοντέλου Gehring

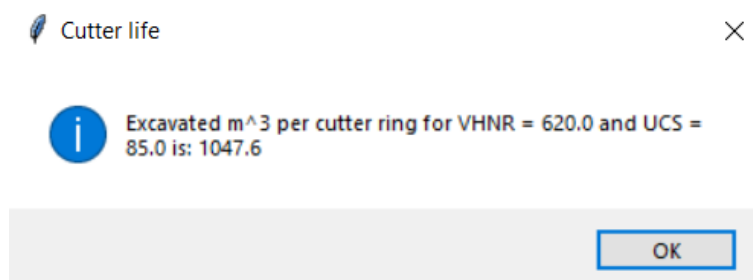
Πατώντας το «Calculate», εμφανίζεται η προβλεπόμενη φθορά του κοπτικού σε mg φθαρμένου υλικού του κοπτικού ανά μέτρο εξόρυξης και στη συνέχεια το κατάλληλο γράφημα.

6.3.5. Μοντέλο Hassanpour (VHNR/UCS)



Εικόνα 6.17 - Μοντέλο Hassanpour.

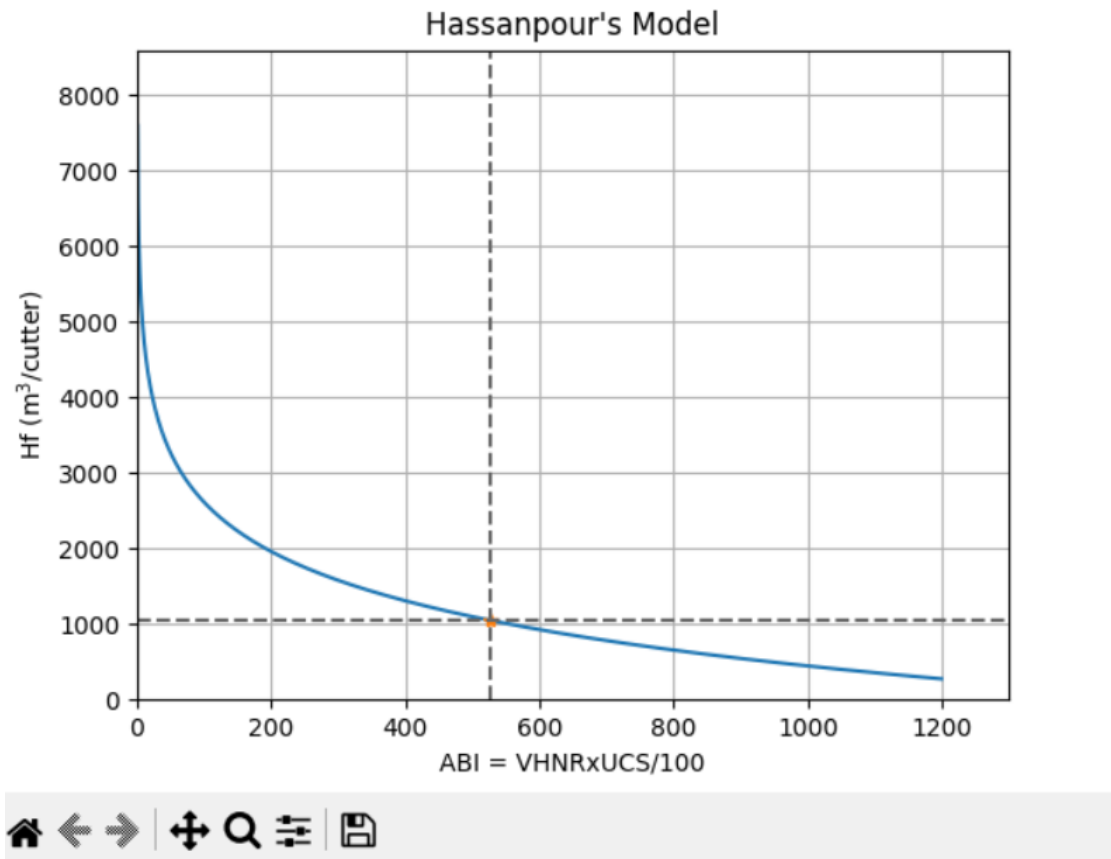
Στο μοντέλο των Hassanpour et al. χρειάζονται δύο μεταβλητές, η σκληρότητα Vickers του πετρώματος (VHNR) και η UCS του σε MPa. Είναι το μόνο μοντέλο που περιλαμβάνει επιλογή χωρίς γράφημα, εφόσον η εξίσωση υπολογισμού της εξαρτάται από δύο μεταβλητές αντί για μία. Στην επιλογή με το δείκτη ABI, δηλαδή με χρήση μόνο του γινομένου των δύο μεταβλητών, δίνεται και κατάλληλο γράφημα.



Εικόνα 6.18 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Hassanpour.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Figure 1

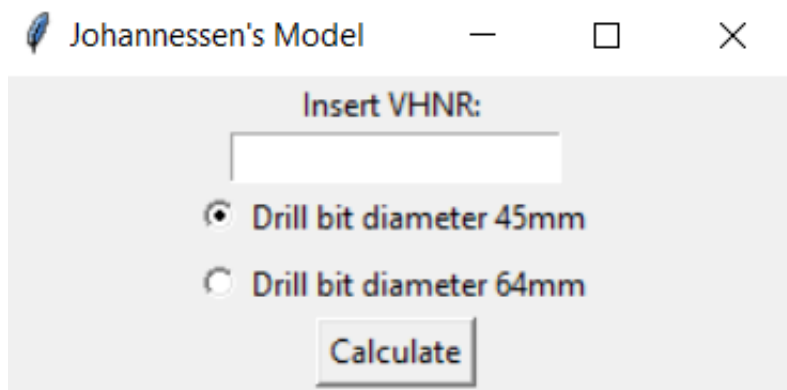


Εικόνα 6.19 - Γράφημα μοντέλου Hassanpour.

Με το πάτημα του κουμπιού «Calculate», εμφανίζεται ο υπολογισμός της ζωής του κοπτικού σε κυβικά μέτρα πετρώματος ανά κοπτικό άκρο και το ανάλογο γράφημα.

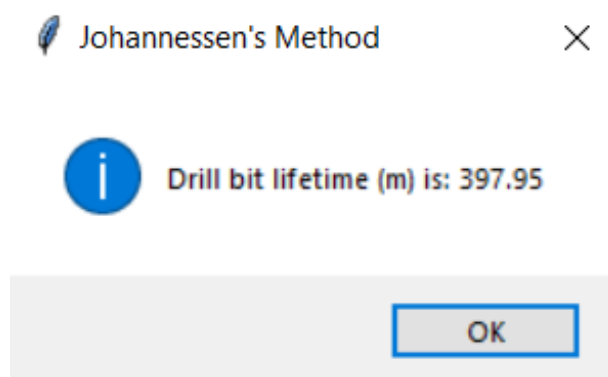
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

6.3.6. Μοντέλο Johannessen (VHNR)



Εικόνα 6.20 - Μοντέλο Johannessen

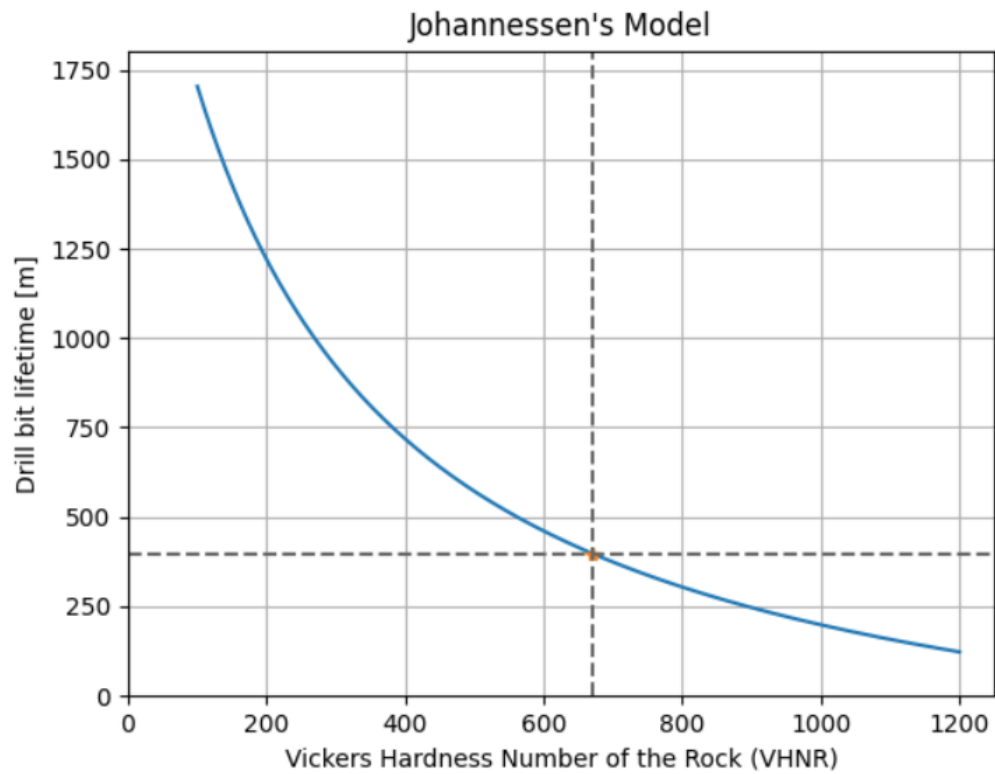
Το μοντέλο του Johannessen απαιτεί από το χρήστη την εισαγωγή μόνο του VHNR και την επιλογή της διαμέτρου του κοπτικού άκρου.



Εικόνα 6.21 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Johannessen.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Figure 1



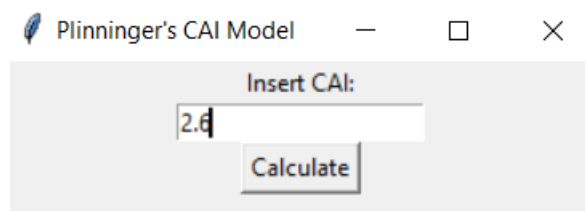
Εικόνα 6.22 - Γράφημα μοντέλου Johannessen.

Το μοντέλο υπολογίζει τη ζωή του κοπτικού άκρου σε μέτρα προχώρησης του μετώπου.

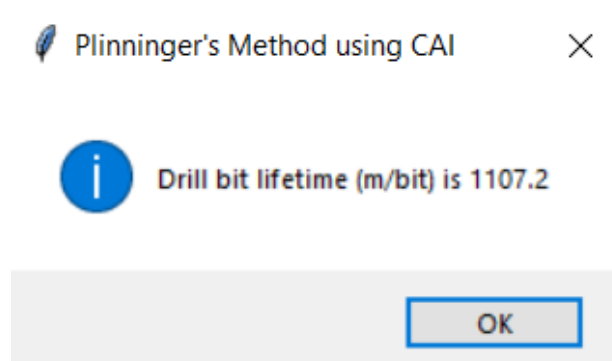
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

6.3.7. Μοντέλα Plinninger (CAI και RAI)

6.3.7.1. Μοντέλο Plinninger (CAI)



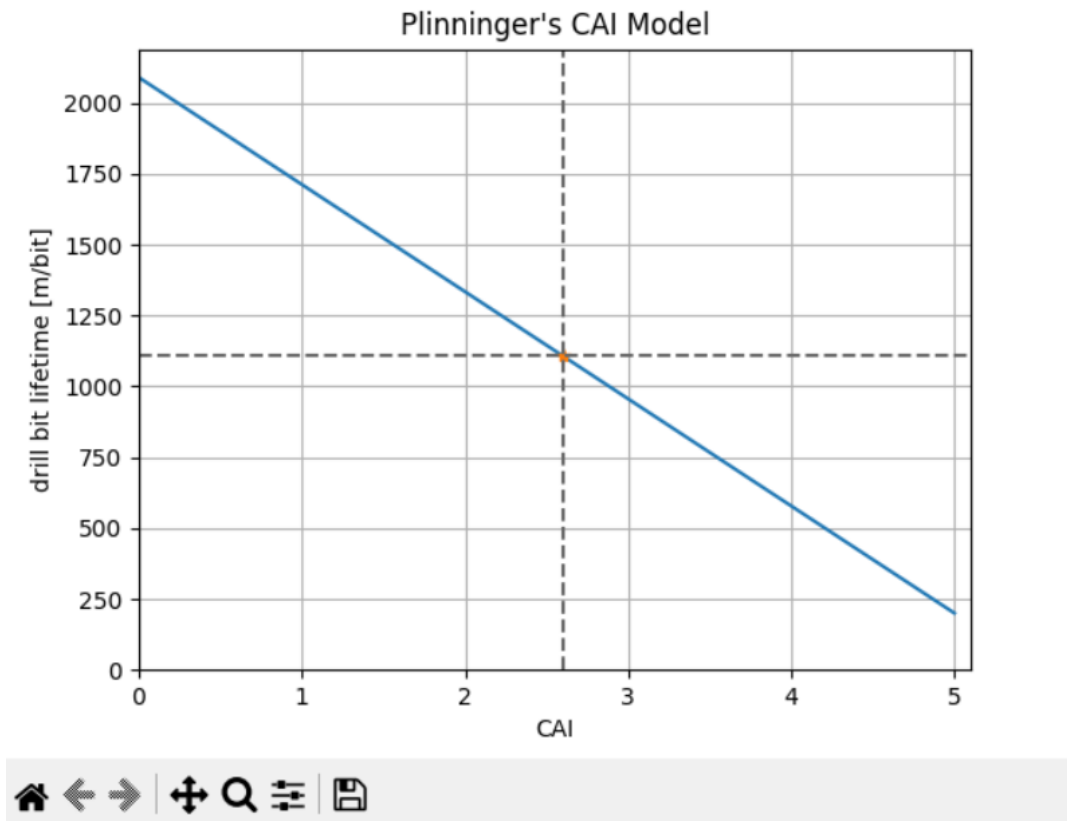
Εικόνα 6.23 - Μοντέλο Plinninger (CAI).



Εικόνα 6.24 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Plinninger (CAI).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Figure 1



Εικόνα 6.25 - Γράφημα μοντέλου Plinninger (CAI).

Το μοντέλο του Plinninger με χρήση του CAI χρειάζεται μόνο τον δείκτη CAI για να δώσει το αποτέλεσμα. Υπολογίζεται η αντοχή του κοπτικού σε μέτρα προχώρησης του μετώπου ανά κοπτικό άκρο, ακολουθούμενο από το γράφημα.

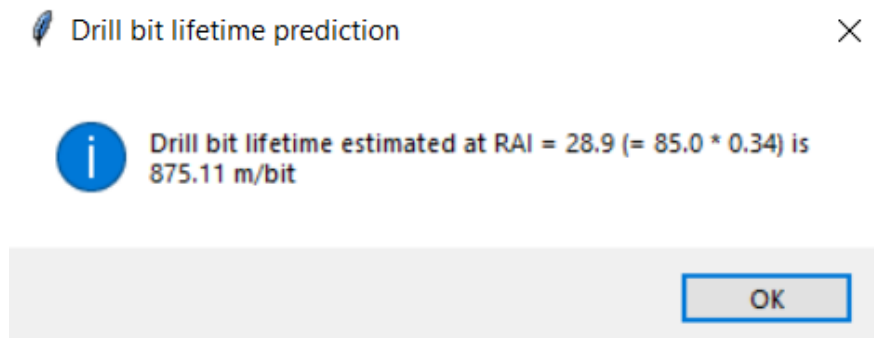
6.3.7.2 Μοντέλο Plinninger (RAI)

The figure shows a software interface window titled "Plinninger's RAI Model". It contains two input fields: "Insert UCS (MPa):" with the value "85" and "Insert Equivalent Quartz Content (EQC) %:" with the value "34". Below these fields is a "Calculate" button.

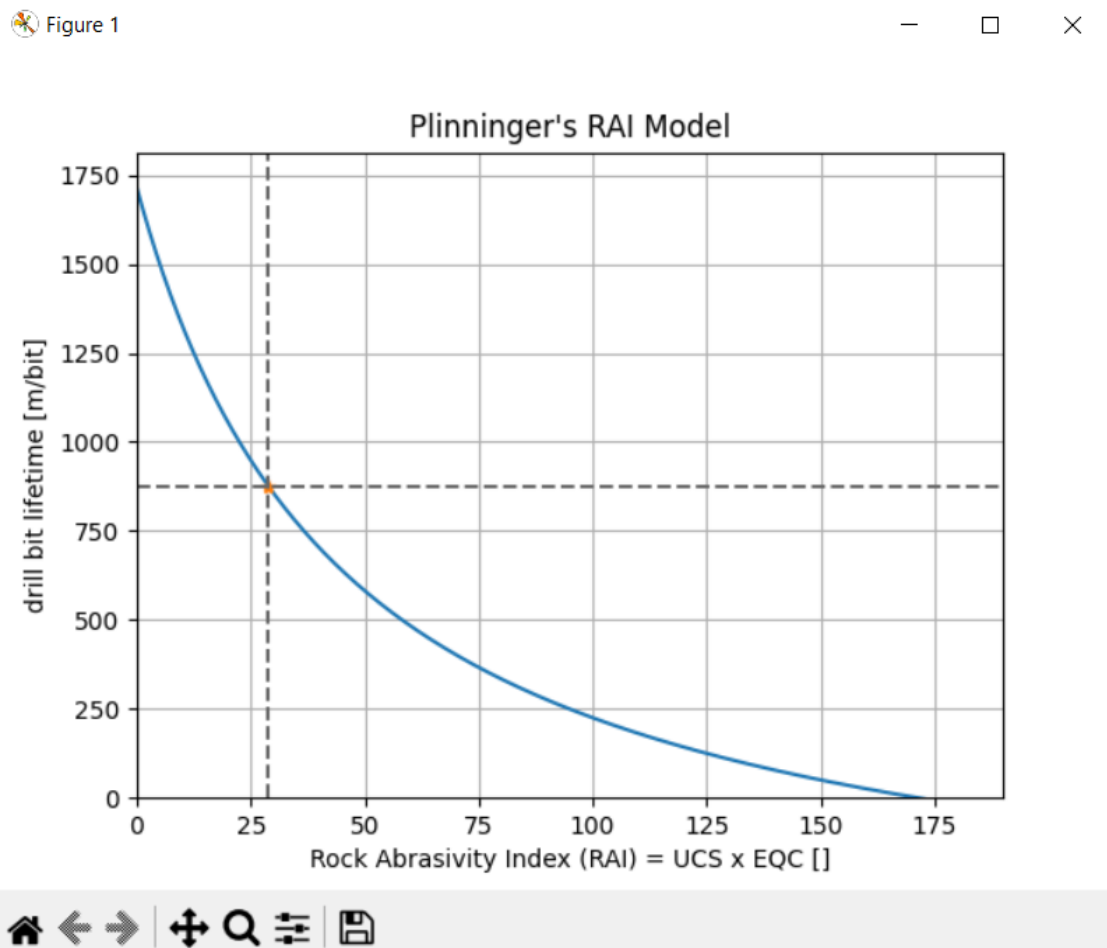
Εικόνα 6.26 - Μοντέλο Plinninger (RAI).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Το μοντέλο αυτό ζητάει την εισαγωγή της UCS σε ΜΡα και την ισοδύναμη περιεκτικότητα χαλαζία.



Εικόνα 6.27 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Plinninger (RAI).

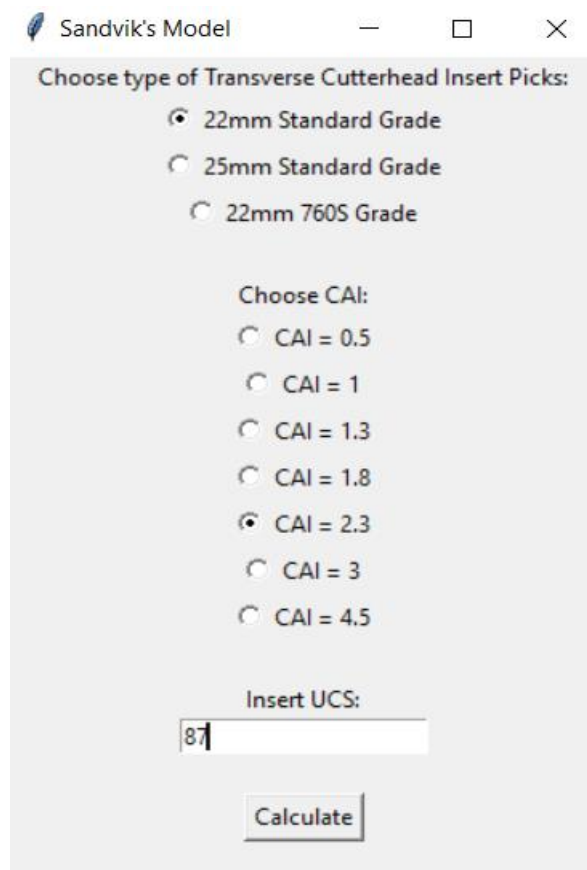


Εικόνα 6.28 - Γράφημα μοντέλου Plinninger (RAI)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ

Το αποτέλεσμα αυτό του μοντέλου δίνει τη ζωή του κοπτικού σε μέτρα προχώρησης του μετώπου ανά κοπτικό άκρο.

6.3.8 Μοντέλο Sandvik (CAI/UCS)



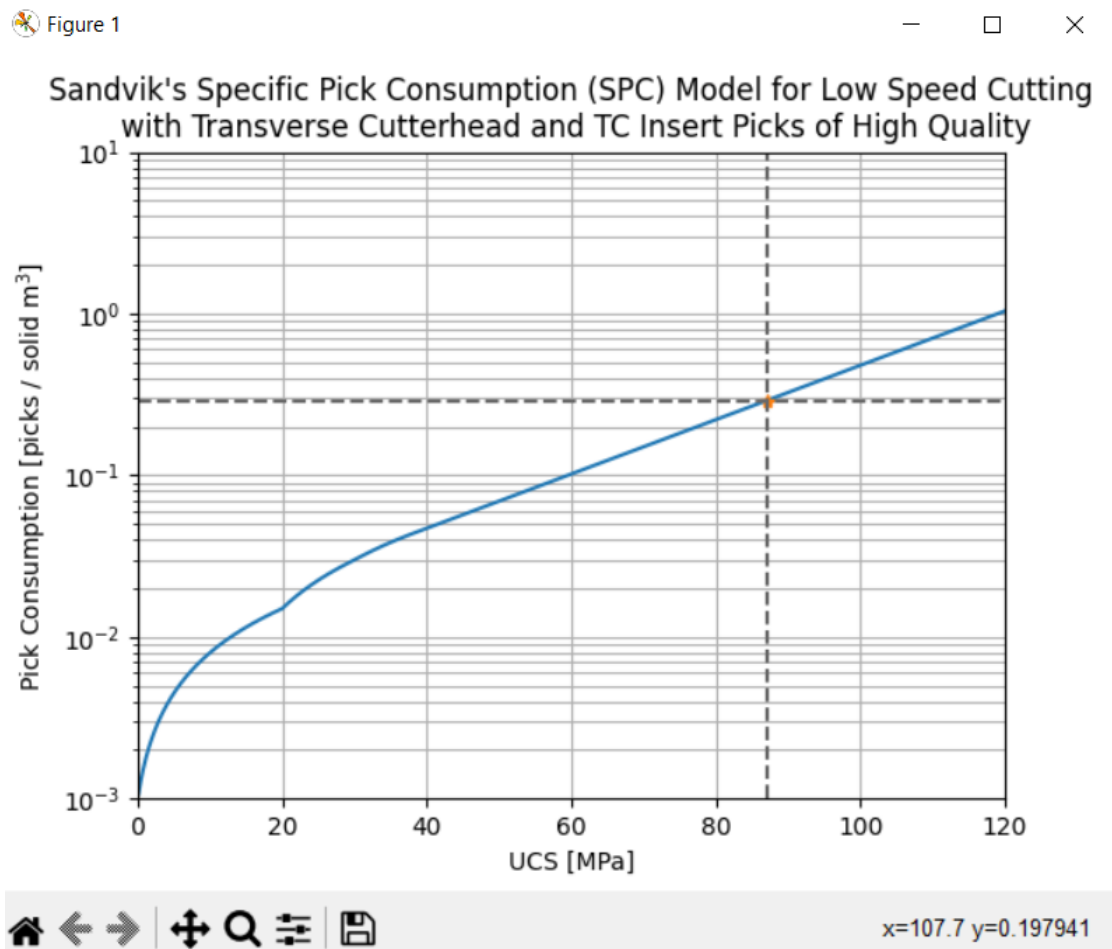
Εικόνα 6.29 - Μοντέλο Sandvik.

Η Sandvik κατασκεύασε γραφήματα για την αντοχή στη φθορά των κοπτικών της. Παρότι βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στα δικά της κοπτικά άκρα, είναι χρήσιμα για την εκτίμηση της φθοράς ενός κοπτικού από καρβίδιο του βολφραμίου. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει το μέγεθος και το υλικό του κοπτικού άκρου, τον δείκτη CAI του πετρώματος και την αντοχή UCS σε MPa.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ



Εικόνα 6.30 - Εμφάνιση αποτελεσμάτων μοντέλου Sandvik.



Εικόνα 6.31 - Γράφημα μοντέλου Sandvik.

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τη φθορά που έχουν τα κοπτικά άκρα ανά κυβικό μέτρο *in-situ* πετρώματος.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Η φθορά στα κοπτικά άκρα είναι αναπόφευκτη κατά τη διάρκεια των εξορύξεων με μηχανικά μέσα. Το μέγεθος της φθοράς είναι τέτοιο ώστε να επηρεάζεται σημαντικά η κατανάλωση αναλώσιμων σε μια εξόρυξη. Οι συνεχείς μελέτες που γίνονται πάνω στο αντικείμενο, αφενός συντελούν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών και των μηχανημάτων, προσφέροντας υψηλότερη αποδοτικότητα και μείωση της κατανάλωσης των αναλώσιμων για μια εξορυκτική διεργασία, αφετέρου βοηθούν στην ανάπτυξη ολοένα και πιο αξιόπιστων μοντέλων εκτίμησης της φθοράς, κάτι που είναι πολύ ουσιώδες για τον οικονομικό σχεδιασμό ενός έργου.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κατασκευάστηκε μια εφαρμογή με διάφορα μοντέλα εκτίμησης της αναμενόμενης φθοράς για τη διευκόλυνση του χρήστη-μηχανικού. Στα μοντέλα χρησιμοποιούνται μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, όπως είναι η σκληρότητα, η αντοχή, δείκτες αποξεστικότητα και η συνοχή του, καθώς και τα χαρακτηριστικά του κοπτικού. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των πετρωμάτων και της πληθώρας παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για τη μελέτη αυτή, υπάρχει διαρκής ανάπτυξη των μοντέλων. Αυτό συμβαίνει επειδή, παρά την ύπαρξη υψηλού βαθμού συσχέτισης της εκτίμησης της φθοράς με πραγματικές τιμές σε κάποια μοντέλα, όπως ο συντελεστής συσχέτισης $R = 0.891$ στο μοντέλο του Bieniawski (2009) και ο συντελεστής προσδιορισμού $r^2 = 69.3\%$ στο μοντέλο του Hassanpour (2014), υπάρχει ακόμα πολύς χώρος για βελτίωση, ακόμα και σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα, όπως στο μοντέλο του Plinninger (2002) με τη χρήση του δείκτη CAI με συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.26$.

Η εφαρμογή έχει ως σκοπό τη διευκόλυνση του μηχανικού και όπως κάθε εργαλείο, έτσι και μια ηλεκτρονική εφαρμογή πρέπει να είναι ευκολονόητη και εύχρηστη, ώστε όταν χρησιμοποιείται από άτομο με τις κατάλληλες γνώσεις να εξοικονομείται πολύτιμος χρόνος. Έτσι, η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία προσπαθεί να αναδείξει τη χρήση των μοντέλων με απλότητα για τη διευκόλυνση του χρήστη. Με τη βοήθεια των μοντέλων εκτίμησης της φθοράς που έχουν δοκιμαστεί στην πράξη και που συνεχώς αναπτύσσονται, ο τομέας της μεταλλευτικής σημειώνει σημαντική πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες. Η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνει την ευκαιρία στον κλάδο των εξορύξεων να εξελιχθεί και στον ψηφιακό κόσμο. Είναι λογικό και αναγκαίο για τον μεταλλειολόγο μηχανικό να προσθέσει στα εργαλεία του τις ηλεκτρονικές εφαρμογές, οι οποίες είναι εύκολες στη χρήση, προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και εξοικονομούν χρόνο.

Βιβλιογραφία

AFNOR, 2000. Détermination du pouvoir abrasif d'une roche - Partie 1: Essai de rayure avec une pointe (NF P 94-430-1).

Al-Ameen, S.I. and Waller, M.D., 1994. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. *Engineering Geology*. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90010-8)

Archard, J.F., 1953. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, pp. 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>

ASTM, 2010. Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. <https://dx.doi.org/10.1520/D7625-22>

Atkinson, R.H., 1993. Hardness tests for rock characterization. In: Hudson, J. A., 1995. *Comprehensive rock engineering: Vol 3: Principles, practice & projects*. Pergamon.

Atkinson, T. and Cassapi, V.B., 1984. The prediction and reduction of abrasive wear in mining excavation machinery. *International Conference on Tribology in Mineral Extraction, War on Wear, Institute of Mechanical Engineering, Nottingham University*, pp. 165–174.

Barnatt, J., Rieuwerts, J., and Haddon, T.G., 1997. Early use of gunpowder in the Peak District: Stone Quarry Mine and Dutchman Level, Ecton, Derbyshire. *Mining History Bulletin of the Peak District Mines Historical Society*, vol. 13. pp. 24–43.

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

Basileiadou, M. G., Yakinthou, X. G., Mparmpounakis, S., 2020. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ.

Bhushan, B., 2013. *Principles and Applications to Tribology*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118403020>

Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering rock mass classification*. John Wiley & Sons, New York, 251 pp.

Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J.M. & Tardaguila, I., 2009. Prediction of cutter wear using RME.

Bieniawski, Z.T., Celada, B., Galera, J.M. and Tardáguila, I., 2008. New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance. Agra, India.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΣΑ

Bruland, A., 1998. Project Report 13A-98 Drillability Test Methods, p. 18 from Bruland, A., 2000. Hard Rock Tunnel Boring Vol. 8 - Drillability - Test Methods. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3363.4729>

Dahl, F., Bruland, A., Grov, E., Nilsen, B., 2010. Trademarking the NTNU/SINTEF drillability test indices. *Tunnels & Tunnelling International* (June), 44–46.

Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grørv, E., 2012. Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.10.006>

Deere, D. U. and Deere, D. W., 1988. “The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice,” *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM STP 984, Louis Kirkaldie, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. pp. 91-101.

Deketh, H. J. R., 1995. *Wear of Rock Cutting Tools: Laboratory Experiments on the Abrasivity of Rock*. <https://doi.org/10.1201/9781003077886>

DIN 50 320, 1979.

Drinker, H.S., 1882. *Tunneling, Explosive Compounds, and Rock Drills*. Wiley, New York.

Fowell, R.J. and Johnson, S.T., 1991. *Cuttability assessment applied to drag tool tunnelling machines*. *Proc. ISMR International Congress on Rock Mechanics*, Aachen, Germany, vol. 2: 985-990. Balkema, Rotterdam

Hamzaban, M.-T., Rostami, J., Dahl, F., Macias, F.J., Jakobsen, P.D., 2022. *Wear of Cutting Tools in Hard Rock Excavation Process: A Critical Review of Rock Abrasiveness Testing Methods*. *Rock Mech Rock Eng*. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03187-x>

Hassanpour, J., Rostami, J., Tarigh Azali, S., Zhao, J., 2014. Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.007>

Hoover, H.C. and Hoover, L.H., 1912. *Georgius Agricola - De Re Metallica*. Translated from the first Latin Edition of 1556.

Hughes, H.M., 1986. The relative cuttability of coal-measures stone. *Mining Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/s0167-9031\(86\)90250-1](https://doi.org/10.1016/s0167-9031(86)90250-1)

International Organization for Standardization, 2014. Metallic materials - Brinell hardness test (ISO Standard No. 6506-1:2014)

International Organization for Standardization, 2016. Metallic materials - Rockwell hardness test (ISO Standard No. 6508-1:2016)

International Organization for Standardization, 2017. Metallic materials - Knoop hardness test (ISO Standard No. 4545-1:2017)

International Organization for Standardization, 2018. Metallic materials - Vickers hardness test (ISO Standard No. 6507-1:2018)

International Society for Rock Mechanics, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006.

Jacobs, N., Hagan P., 2009. The effect of stylus hardness and some test parameters on the Cerchar Abrasivity Index. 43rd U.S. Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, June 28–July 1, Asheville, NC, USA

Lawn, B.R., Marshall, D.B., 1979. Hardness, Toughness, and Brittleness: An Indentation Analysis. J American Ceramic Society. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1979.tb19075.x>

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M., 2008. Hardrock Tunnel Boring Machines. Wiley Vch. DOI: 10.1002/9783433600122

Matern, N. von and Hjelmer, A., 1943. Försök med pågrus (Tests with Chippings), Medelände nr. 65, Statens väginstitut, Stockholm, 65 pp. (English summary, pp. 56–60)

Michalakopoulos, T.N., Anagnostou, V.G., Bassanou, M.E., Panagiotou, G.N., 2006. The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.009>

Nobel, A., 1868. Improved explosive compound. Patent US78317A.

Nomikos, P., 2016. Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων.

Panagiotakopoulos, C., Kokkinos, T., Tsalidis, C., Gakis, P., 2022. Υπολογιστική γλωσσολογία.

Plinninger, R. J., Spaun, G. & Thuro, K., 2002. Prediction and classification of tool wear in drill and blast tunneling.

Plinninger, R., 2010. Hardrock Abrasivity Investigation using the Rock Abrasiveness Index (RAI). Geol. Act.

Plinninger, R., Kaesling, H., Thuro, K., Spaun, G., 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00140-5](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00140-5)

Rosiwal, A. 1916. Neuere Ergebnisse der Hartebestimmung von Mineralien und Gesteinen - Ein Absolutes Maß für die Harte spröder Körper. (New findings on the hardness determination of minerals and rocks - an absolute measure for the hardness of brittle materials). *Verhandlungen der königl. geol. Reichsanstalt*, vol. 5 & 6, pp. 117-147.

Roxborough, F.F., King, P., and Pedroncelli, E.J., 1981. Tests on the cutting performance of a continuous miner. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 81. pp. 9–25.

Sandvik, 2020. Small mining sites - Innovation in exploitation and processing.

Sandvik, nd. Understanding Cemented Carbide. H-9100a-ENG.

Selmer-Olsen, R., Blindheim, O.T., 1970. On the drillability of rock by percussive drilling. *Proc. 2nd Congress of ISRM, Belgrade*.

Selmer-Olsen, R., Lien, R., 1960. Bergartens borbarehet og sprengbarhet. *Teknisk Ukeblad nr. 34, Oslo*, pp. 3–11

Sievers, H., 1950. Die Bestimmung des Bohrwiderstandes von Gesteinen, *Glóckauf* 86: 37/38, pp. 776–784. Glóckauf G.M.B.H., Essen.

Suana, M. and Peters, T.J., 1982. The Cerchar Abrasivity Index and its relation to rock mineralogy and petrography. <https://doi.org/10.1007/bf01239473>

Trist, E.L., D., M.-T., Higgin, G.W., Murray, H., Pollock, A.B., 1964. *Organizational Choice: Capabilities of Groups at the Coal Face under Changing Technologies. The Loss, Re-Discovery and Transformation of a Work Tradition*. *Revue Française de Sociologie*. Tavistock Publications, London.

Ulusay, R. (Ed.), 2015. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>

Valantin, A., 1973. Test Cerchar pour la mesure de la dureté et de l'abrasivité des roches. Annexe de l'exposée présentée aux Journées de Information "Techniques de creusement", Luxembourg.

Vergani, R., 2009. The civil uses of gunpowder: demolishing, quarrying, and mining (15th-18th centuries).

Verhoef, Peter N. W., 1997. Wear of Rock Cutting Tools: Implications for the site investigation of rock dredging projects

West, G., 1989. Rock abrasiveness testing for tunnelling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90003-x](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90003-x)

Zum Gahr, K. H., 1987. Microstructure and wear of materials. North-Holland.

Ιστότοποι

International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. ISRM (n.d.). Available at: <https://isrm.net/> (Accessed: November 19, 2022)

Welcome to Python.org (n. d.). Available at: <http://www.python.org> (Accessed: February 14, 2023).