

**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ & ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΗΡΡΑΓΓΩΝ :**  
**ΤΥΠΟΙ ΕΔΑΦΩΝ / ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΩΝ**

**TUNNELLING :**  
**ROCK TYPES AND DRILLING MACHINES**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : Α. ΜΥΛΩΝΑΚΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Π. ΣΟΥΠΙΟΣ**

**ΧΑΝΙΑ 2006**

## SUMMARY

Tunnelling has become a much more sophisticated discipline in the past 20 years. The introduction of the Slurry Shield Machine and the Earth Pressure Balance Machine (the former pioneered by British engineers in London in 1972) have resulted in tunnels being constructed in ground conditions which had previously been too difficult to tackle using more conventional methods. A prime example is the Jubilee Line Extension in London, which, from the civil engineering/tunnelling standpoint, is a very successful project. It has brought London Underground mass transit services to areas of south and east London which had previously been denied them due to the difficult tunnelling conditions presented by the water-bearing sands and gravels in the underlying strata. Sprayed concrete tunnel linings have also become more widely used in the UK following their successful use in Europe and on a variety of projects in the UK, including the Channel Tunnel Crossover, the Round Hill Tunnel and the Heathrow Terminal 5 project. Other techniques which are now available to the modern tunneller include compaction and compensation grouting, ground reinforcement, ground freezing, and the modern usage of compressed air. Microtunnelling and directional drilling are also increasingly popular as these techniques continue to improve. These methods are often preferred for the installation of new services as disruption to the ground surface is minimised. As cities and towns become more and more developed, the opportunities to expand infrastructure at ground level become more limited and the alternative of creating underground space becomes more attractive.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |    |
|--|----|
| 1. Η ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....   | 3  |
| 1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....   | 3  |
| 1.2 Η ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΣΚΟΠΙΑ .....      | 3  |
| 1.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....                  | 5  |
| 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ .....        | 7  |
| 3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....                                   | 13 |
| 3.1 ΓΕΝΙΚΑ .....   | 13 |
| 3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....                                      | 13 |
| 4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ..... | 23 |
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ .....   | 23 |
| 4.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ .....  | 24 |
| 4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ/ΑΚΡΩΝ .....                         | 25 |
| 4.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ .....                                 | 32 |
| 4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΤΗ ΦΘΟΡΑ .....                           | 33 |
| 5. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....  | 35 |
| 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 35 |
| 5.2 ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΕΩΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .....  | 36 |
| 6. ΜΗΧΑΝΕΣ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ .....  | 43 |
| 6.1 ΜΗΧΑΝΗ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΣΚΛΗΡΟ ΠΕΤΡΩΜΑ .....                  | 43 |
| 6.1.1 ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ ΥΠΟΚΟΠΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ .....                                       | 43 |
| 6.1.2 ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥΣ ΔΙΣΚΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΠΗΤΗΡΕΣ .....                           | 46 |
| 6.1.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΡΗΣΕΩΣ ΜΕ ΔΙΣΚΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΠΗΤΗΡΕΣ .....                   | 48 |
| 6.1.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....                   | 52 |
| 6.1.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....                       | 53 |
| 6.1.6 ΜΗΧΑΝΗ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ WIRTH .....                             | 55 |
| 6.1.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ .....  | 57 |
| 6.2 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ .....                                      | 58 |
| 6.2.1 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ .....                                | 59 |
| 6.2.2 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ .....                               | 62 |
| 6.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΣΕΩΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΚΕΦΑΛΩΝ .....                                      | 66 |
| 6.2.4 ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΘΗΝΑΪΚΟΥ ΜΕΤΡΟ .....                                | 68 |
| 6.2.5 ΜΗΧΑΝΗ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ROBBINS .....  | 74 |
| 6.3 ΒΑΘΜΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ .....                         | 74 |
| 7. ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΚΟΠΗΣ .....   | 77 |
| 7.1 ΠΡΟΣΘΕΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΚΟΠΗΣ .....                           | 81 |
| 7.2 ΩΡΙΑΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΚΟΠΗΣ .....                                 | 83 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....  | 87 |
| ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....   | 87 |
| 1. ΓΕΝΙΚΑ .....  | 87 |
| 2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ MERCHANT .....   | 91 |
| 3. ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ EVANS .....  | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....   | 99  |
| ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ .....                 | 99  |
| 1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....           | 99  |
| ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ .....                            | 99  |
| ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ .....                      | 99  |
| ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ.....             | 100 |
| ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ ..... | 100 |
| ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (RQD).....             | 101 |
| ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ .....               | 102 |
| ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ .....                          | 103 |
| 1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ.....             | 103 |
| 1.2.1 Σύστημα RMR Bieniawski.....                         | 104 |
| 1.2.2 Σύστημα GSI .....                                   | 107 |
| 1.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ Q (NGI).....                                | 110 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....  | 117 |
| ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ.....                           | 117 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 117 |
| 2. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΟHR – COULOMB.....                  | 118 |
| 2.1.1 ΑΝΤΟΧΗ ΙΣΟΤΡΟΠΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....                   | 119 |
| 2.1.2 Γραμμικό κριτήριο .....                             | 119 |
| 3. ΚΡΙΤΗΡΙΟ GRIFFITH.....                                 | 122 |
| 4. ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK – BROWN.....                             | 124 |
| 5. ΚΡΙΤΗΡΙΟ JOHNSTON .....                                | 134 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....   | 137 |

# **1. Η ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

## **1.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Τα πετρώματα, λόγω των διαφορετικών τρόπων που σχηματίστηκαν, της διαφορετικής ορυκτολογικής του σύστασης και των διαφορετικών μεταγενετικών επιδράσεων που έχουν υποστεί, παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους σε ότι αφορά τις μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες.

Η διαφοροποίηση αυτή είναι τόσο μεγάλη, ώστε η συμπεριφορά που παρουσιάζουν κατά την εξόρυξή τους ποικίλει και οποιαδήποτε σύγκρισή τους είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Μια παράμετρος που εξετάζεται κατά τη φάση σχεδιασμού μιας επιφανειακής εκμετάλλευσης είναι η εξορυξιμότητα του πετρώματος. Δηλαδή η δυσκολία που παρουσιάζει το πέτρωμα στην εξόρυξή του.

Είναι, εξάλλου, σαφές ότι η εξορυξιμότητα του πετρώματος θα επηρεάζεται από τον εξοπλισμό ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξόρυξη του, διότι ένα πέτρωμα που χαρακτηρίζεται ως <<δύσκολο>> και δύσκολα εξορύσσεται π.χ. με χειρωνακτικό τρόπο, μπορεί να είναι <<μαλακό>> και να εξορύσσεται εύκολα με ένα μηχανικό μέσο εξόρυξης. Συνεπώς η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων θα πρέπει να αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο μηχανικό μέσο εξόρυξης αλλά και μέθοδο εκσκαφής.

## **1.2 Η ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΣΚΟΠΙΑ**

Η εξόρυξη των πετρωμάτων, η τμηματική δηλαδή απόσπαση του πετρώματος από την φυσική του θέση, πραγματοποιείται μεταξύ των άλλων τρόπων (π.χ. ανατίναξη με χρήση εκρηκτικών υλών) και με την βοήθεια διαφόρων μηχανικών μέσων εξόρυξης, τα οποία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από τα πλέον απλά, π.χ. την εκσκαπτική αερόσφυρα, μέχρι τα πλέον ισχυρά και ογκώδη όπως είναι ο υδραυλικός μετωπικός εκσκαφέας (shovel) ή ο καδοφόρος εκσκαφέας.

σχήματα

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

- α) το κόστος εξόρυξης ανά μονάδα όγκου πετρώματος θα είναι πολύ μεγαλύτερο στην περίπτωση της εκσκαπτικής αερόσφουρας και
- β) η παραγωγική ικανότητα του υδραυλικού εκσκαφέα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη της εκσκαπτικής αερόσφουρας.

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

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

Το δεύτερο μέγεθος που συσχετίζεται με την εξόρυξη των πετρωμάτων είναι η απαιτούμενη απόδοση του μηχανήματος εξόρυξης, η οποία προσδιορίζεται από την ζητούμενη παραγωγή της εκμετάλλευσης. Μια μικρής έκτασης εξόρυξη- εκσκαφή (π.χ. θεμέλια τεχνικού έργου) δικαιολογεί την χρησιμοποίηση εξοπλισμού μικρής απόδοσης, ενώ μεγάλης κλίμακας εξόρυξη (π.χ. υπαίθριο ορυχείο) επιβάλλει την χρησιμοποίηση εξοπλισμού υψηλής απόδοσης, του οποίου η χρήση στην πρώτη περίπτωση δεν θα ήταν συμφέρουσα.

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

τότε καθίσταται αδύνατη η περαιτέρω εξόρυξη και απαιτείται αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων με καινούργια.

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

$$F = (X, Y, Z) \quad (1)$$

Όπου:

X: Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εκσκαφής, που ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την εκσκαφή ενός κυβικού μέτρου εξορυγμένου πετρώματος (KWh/m<sup>3</sup>l).

Y: Η επιτεύξιμη ή η πραγματική απόδοση του μηχανήματος εξόρυξης (m<sup>3</sup>/h).

Z: Η φθορά των κοπτικών εργαλείων.

Οι ανωτέρω παράμετροι, που εξαρτώνται από την φύση του προς εξόρυξη πετρώματος, την μέθοδο εξόρυξης, την γεωμετρία του μετώπου και τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος εξόρυξης, παρέχουν την δυνατότητα στον μελετητή της εκμετάλλευσης να αναλύσει έναν αριθμό εναλλακτικών λύσεων εκμετάλλευσης, επιλέγοντας κάθε φορά διαφορετικές τιμές των παραμέτρων εξόρυξης και να συγκρίνει τις επιπτώσεις τους στα οικονομικά και επιχειρησιακά στοιχεία της εκμετάλλευσης.

### **1.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Η εξορυξιμότητα των πετρωμάτων επηρεάζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

Τα χαρακτηριστικά του προς εξόρυξη πετρώματος (άρρηκτο πέτρωμα – μάζα πετρώματος)

Τα χαρακτηριστικά του εξορυγμένου πετρώματος

Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος εξόρυξης

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος εξόρυξης  
Την μέθοδο εκσκαφής που εφαρμόζεται  
Την γεωμετρία του μετώπου εκσκαφής



## 2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΕΞΟΡΥΞΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΞΟΡΥΓΜΕΝΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Τα χαρακτηριστικά του προς εξόρυξη πετρώματος (άρρηκτο πέτρωμα – μάζα πετρώματος) επηρεάζουν καθοριστικά την εξορυξιμότητα των πετρωμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Επισημαίνεται ότι, σε ότι αφορά την εξόρυξη, οι ιδιότητες της μάζας του πετρώματος είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτίμηση της εξορυξιμότητας. Ένα πέτρωμα που παρουσιάζει υψηλές τιμές μηχανικής αντοχής (χαρακτηριστικό του άρρηκτου πετρώματος,) αλλά είναι έντονα κατακερματισμένο (χαρακτηριστικό της μάζας του πετρώματος), εξορύσσεται σχετικά εύκολα με μηχανικά μέσα. Σε αντίθεση με ένα άλλο το οποίο έχει μικρότερες τιμές αντοχής, πλην όμως είναι συμπαγές.

Σημειώνεται ότι η έννοια του πετρώματος, όπως χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή, είναι ευρεία και καλύπτει όλο το φάσμα των γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται στις εκμεταλλεύσεις και τα τεχνικά έργα, όπου πραγματοποιείται μηχανική εξόρυξη.

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

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

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

Η αντοχή σε διάτμηση. Η διατμητική αντοχή αποτέλεσε την βάση για την διατύπωση θεωριών αστοχίας των πετρωμάτων, όπως των θεωριών Coulomb και Mohr. Επιπλέον, έχει

χρησιμοποιηθεί ως η βασική παράμετρος για την διατύπωση των θεωριών κοπής των πετρωμάτων του Merchant και του Nishimatu.

Η σκληρότητα των πετρωμάτων έχει χρησιμοποιηθεί από μεγάλο αριθμό ερευνητών για την εκτίμηση της εξορυξιμότητάς των καθώς και της φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Έχει επικρατήσει στα πετρώματα να προσδιορίζεται η σκληρότητα διεϊσδυσης και η σκληρότητα ανάκρουσης κατά Shore και κατά Schmidt. Με την βοήθεια της σκληρότητας κατά Shore, που προσδιορίζεται με τη βοήθεια του ομώνυμου σκληρόμετρου (Σχήμα 1), υπολογίζεται ο ‘Συντελεστής Πλαστικότητας’ από την σχέση (Brown, 1981 – McFeat-Smith, 1977):

$$K = \frac{H_{20} - H_1}{H_{20}} \times 100 \dots \dots \dots [\%] \quad (2)$$

όπου:

K: Συντελεστής πλαστικότητας,

H<sub>20</sub>: Τελική τιμή σκληρότητας μετά από 20 ανακρούσεις στο ίδιο σημείο

H<sub>1</sub>: Τιμή σκληρότητας μετά από μια ανάκρουση

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

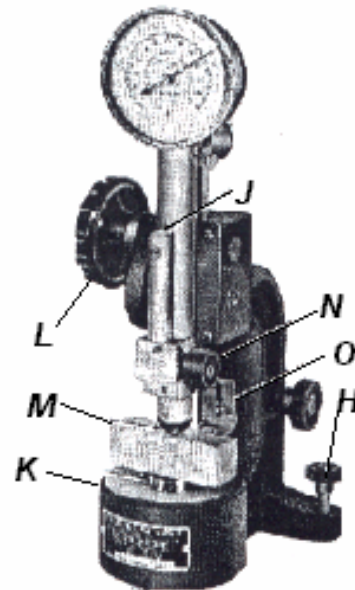
**J: ένδειξη αεροστάθμης**

**K: βάση τοποθέτησης του δοκιμίου**

**L: κοχλίας ρύθμισης θέσης του M**

**M: κωνική αιχμή επαφής με το δοκίμιο**

**N: περιστρεφόμενος κοχλίας ακινητοποίησης κωνικής αιχμής**



Σχήμα 1. Σκληρόμετρο Shore.

Η τριβή μεταξύ πετρώματος και μετάλλων. Κατά προσέγγιση ο συντελεστής τριβής πετρώματος/ χάλυβα υπολογίζεται με την βοήθεια του συντελεστή εσωτερικής τριβής του πετρώματος, που προκύπτει από την δοκιμή διάτμησης, σύμφωνα με την σχέση (Aleksseeva et al, 1986):

$$\tan \phi' = 0.75 \times \tan \phi \quad (3)$$

όπου:

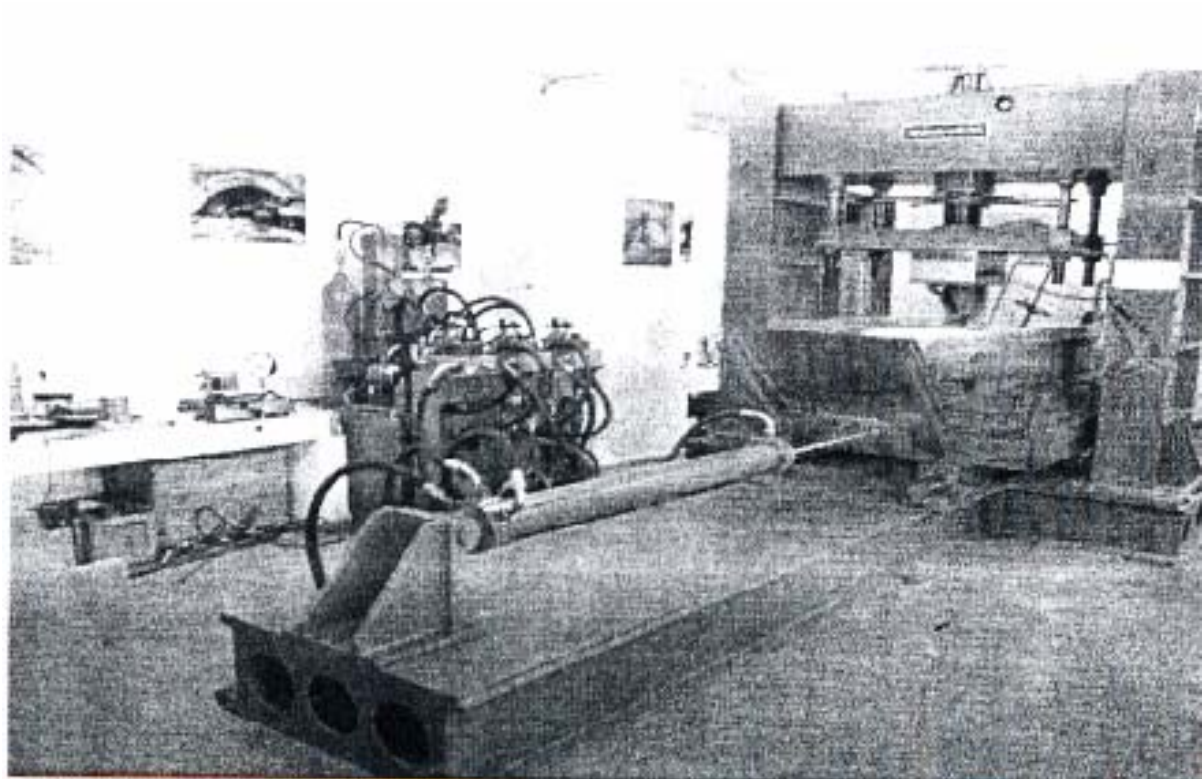
$\phi'$ : γωνία τριβής πετρώματος/ χάλυβα και

$\phi$ : γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος

6. Η αντίσταση στην κοπή. Η αντίσταση κοπής των πετρωμάτων εκφράζει την δύναμη που πρέπει να αναπτύξει η κοπτική ακμή του εργαλείου κοπής, προκειμένου να αστοχήσει το πέτρωμα κατά την εκσκαφή του.

Ως ειδική αντίσταση κοπής ή εκσκαφής ορίζεται η ανοιγμένη αντίσταση κοπής στην μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής του εργαλείου ( $\text{Kg/cm}$ ) ή στην μονάδα επιφανείας του αποκοπτόμενου τμήματος πετρώματος ( $\text{Kg/cm}^2$ ).

Η τιμές της ειδικής αντίστασης εκσκαφής των πετρωμάτων είναι προφανές ότι, ανεξαρτήτως του τρόπου εκφράσεως, κυμαίνονται εντός ευρέων ορίων, καθόσον αυτή εξαρτάται από τη μορφή του κοπτικού εργαλείου, τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται η δύναμη κοπής και από της φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος. Ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης εκσκαφής επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κατάλληλων διατάξεων στο εργαστήριο ή επί τόπου.



Σχήμα 2. Εργαστηριακή διάταξη προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης κοπής πετρωμάτων

Για τον υπολογισμό της αντίστασης κοπής των πετρωμάτων επί τόπου, και κυρίως όταν εξορύσσονται με καδοφόρους εκσκαφείς, ο οίκος Orenstein & Koppel (O&K) σχεδίασε την φορητή συσκευή του Σχήματος 3, με την οποία επιτυγχάνεται η θραύση πρισματικών ή κυλινδρικών δοκιμών κατά την διείδουση μιας τυποποιημένης σφήνας, της οποίας οι διαστάσεις φαίνονται στο σχήμα. Από τις δοκιμές με την συσκευή αυτή (μέθοδος O&K)

υπολογίζεται η ειδική αντίσταση κοπής του πετρώματος σύμφωνα με τις σχέσεις (Orenstein & Koppel, -):

$$P = \frac{F}{L} = \dots\dots\dots(\text{Kg} / \text{cm}) \quad (4)$$

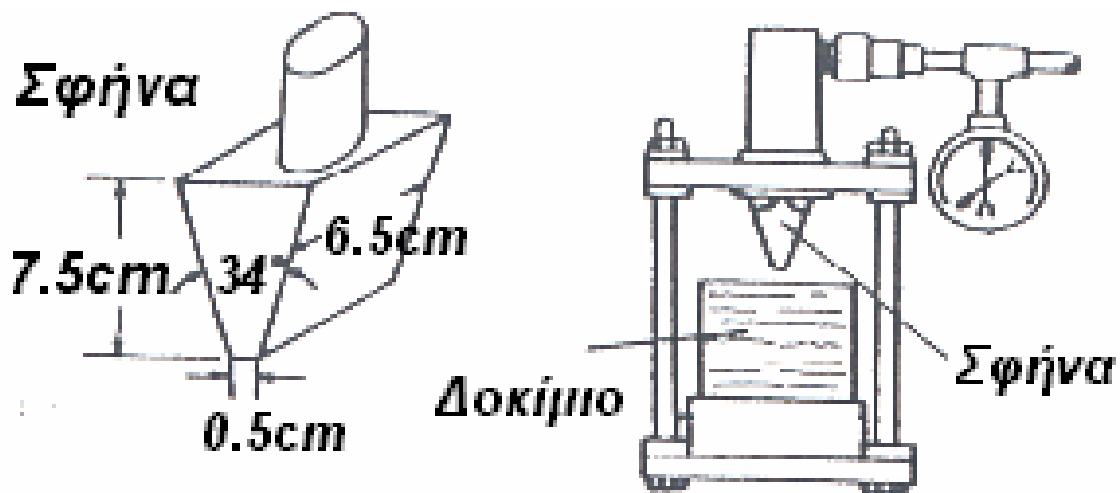
όπου:

P: ειδική αντίσταση κοπής, Kg/cm

F: φορτίο κατά την θραύση, Kg

L: μήκος ακμής σφήνας, cm

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



Σχήμα 3. Συσκευή προσδιορισμού της αντίστασης κοπής πετρωμάτων του οίκου O&K.

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

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

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

Η τάση συγκόλλησης στις μεταλλικές επιφάνειες. Πετρώματα γαιώδους μορφής, ορισμένες άργιλοι και μάργες, έχουν την τάση να προσκολλώνται στις μεταλλικές επιφάνειες των κάδων των μηχανημάτων εξόρυξης, μειώνοντας την ωφέλιμη χωρητικότητα τους, καθώς και στις επιφάνειες των μηχανημάτων και διατάξεων φόρτωσης – μεταφοράς. Η τάση συγκόλλησης εξαρτάται από την φύση του πετρώματος και το ποσοστό της υγρασίας τους.

### **3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

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

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

#### **3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Τα κριτήρια εξορυξιμότητας που αναφέρονται στην παράγραφο αυτή αφορούν γενικά την εξόρυξη των πετρωμάτων με διάφορους τύπους μηχανημάτων. Εξειδικευμένα κριτήρια που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για την εκτίμηση της εξορυξιμότητας των πετρωμάτων, όταν εξορύσσονται με συγκεκριμένους τύπους μηχανημάτων, π.χ. καδοφόρους εκσκαφείς, δεν αναφέρονται στην εργασία αυτή.

Οι Franklin et al, 1971 κάνουν χρήση δυο παραμέτρων του προς εξόρυξη πετρώματος, είτε του Δείκτη Απόστασης Ασυνεχειών ( $I_f$ ) και του Δείκτη Σημειακής Φόρτισης ( $I_s$ ), κατατάσσουν την μάζα του πετρώματος, από πλευράς εξορυξιμότητας, στις περιοχές του Σχήματος 4.

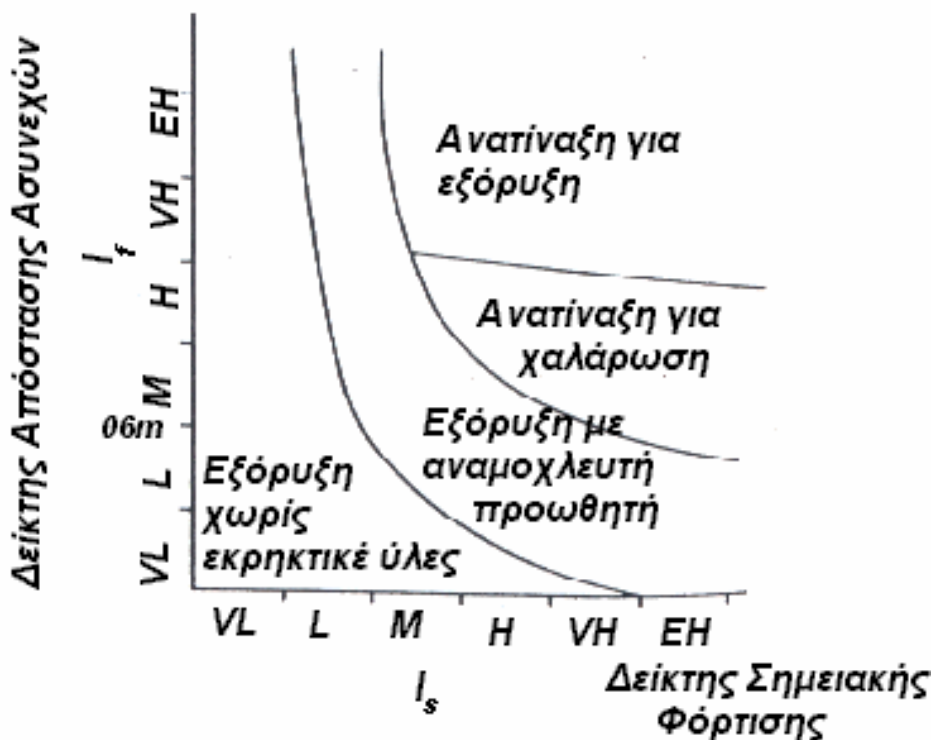
Ο Atkinson, 1971 προτείνει το διάγραμμα του Σχήματος 5, στο οποίο παρουσιάζεται η δυνατότητα εξόρυξης των πετρωμάτων, συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης του σεισμικού κύματος, από διάφορους τύπους μηχανημάτων.

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

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

Πετρώματα που εξορύσσονται με σκαπάνη π.χ. συνεκτικοί σχηματισμοί, μάργες, σκληροί άργιλοι κα.

Πετρώματα που απαιτούν χαλάρωση με εκρηκτικές ύλες πριν εξορυχτούν με μηχανικά μέσα π.χ. σκληρές μάργες, ψαμμίτες κα.



Σχήμα 4. Ταξινόμηση της μάζας πετρώματος για μηχανική εξόρυξη.



Κλίμακα αξόνων: VL= πολύ μικρός

L= μικρός

M= μέσος

H= υψηλός

VH= πολύ υψηλός

EH= εξαιρετικά υψηλός



Σχήμα 5. Δυνατότητα εξόρυξης των πετρωμάτων με διάφορους τύπους μηχανημάτων, συναρτήσει της ταχύτητας του σεισμικού κύματος.

Ο Williamson et al. 1983 μελετώντας την λειτουργία ηλεκτρικών Shorel στο ορυχείο Mt. Newman της Αυστραλίας, ορίζει ένα δείκτη εξορυξιμότητας των σωρών που προκύπτουν μετά την ανατίναξη του μετώπου, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του Shorel:

Χρόνος κύκλου εργασιών του Shorel

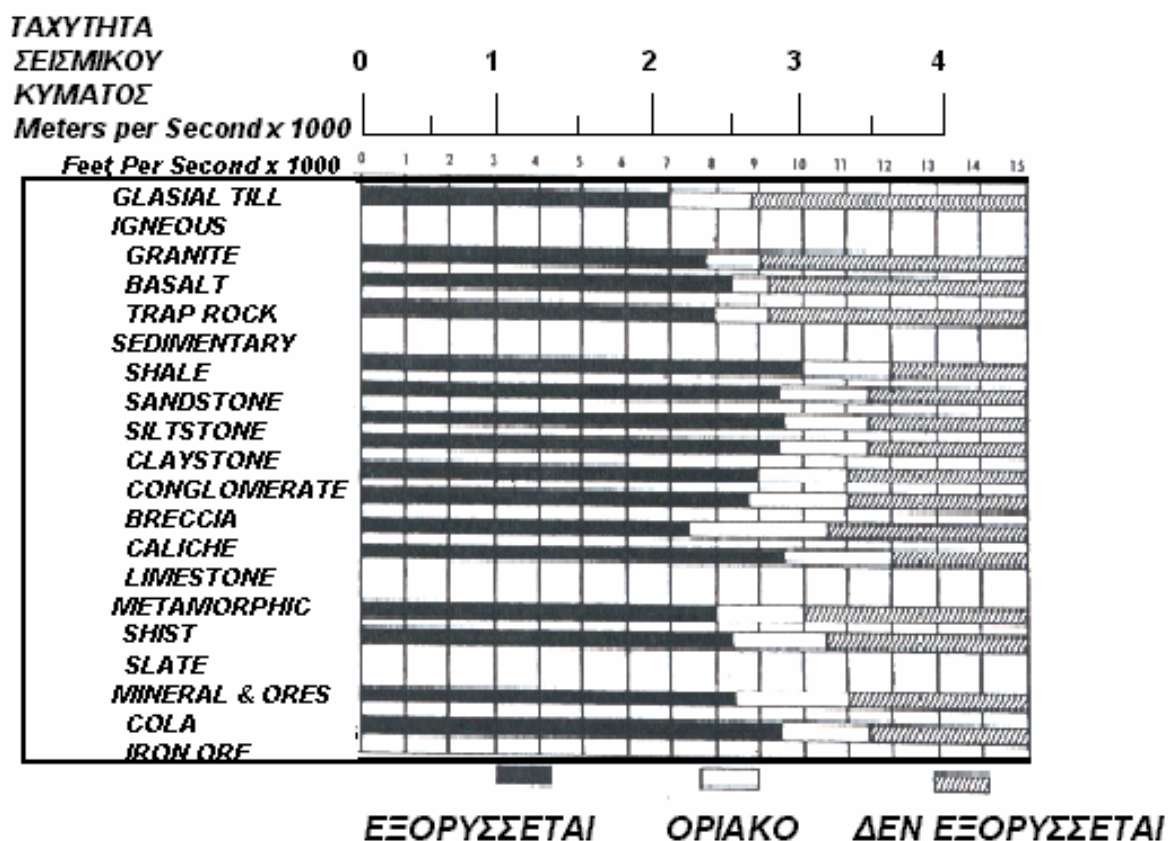
Συντελεστής επιπλήσματος

Μέγεθος των κόκκων των αγωγών

Προφίλ των αποσβέσεων

Ο Mol et al, 1986 σε παρόμοιες μελέτες, στα ορυχεία της εταιρείας Broken Hill Pty της Αυστραλίας, ορίζει ένα δείκτη εξορυξιμότητας, ο χρόνος που απαιτείται για την εκσκαφή του πετρώματος από το Shorel και η απαιτούμενη τάση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος του μηχανήματος κοπής αποτελούν τις βασικές παραμέτρους υπολογισμού του δείκτη αυτού.

Η Caterpillars Trectot Co, 1993, συσχετίζει την δυνατότητα εξόρυξης των πετρωμάτων με ripper (αναμοχλευτή) προωθητή με την ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους σεισμικού κύματος. Το σχετικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6, από το οποίο προσδιορίζεται με βάση την ταχύτητα του σεισμικού κύματος το πεδίο εφαρμογής κάθε τύπου ripper.



Σχήμα 6. Διάγραμμα για την εκτίμηση της εξορυξιμότητας των πετρωμάτων με μονό ή πολλαπλό ripper No 10 και προωθητή D10 της Caterpillar Tractor Co.

Οι Muftuoglu Scoble (Muftuoglu et al, 1983- Scoble et al, 1984) προτείνουν έναν “Δείκτη Εξορυξιμότητας”, τον οποίο διαμόρφωσαν ύστερα από εκτεταμένη εργαστηριακή και επί τόπου γεωτεχνική μελέτη πετρωμάτων που απαντώνται στα ύπαιθρα ανθρακωρυχεία της

Μεγάλης Βρετανίας. Ο Δείκτης Εξορυξιμότητας προκύπτει, κατά τους ανωτέρω, από την αξιολόγηση τεσσάρων παραμέτρων:

Του βαθμού αποσάθρωσης του πετρώματος (W)

Της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ή εναλλακτικά του δείκτη σημειακής φόρτισης του άρρηκτου πετρώματος (S)

Της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών (J)

Της απόστασης μεταξύ των στρώσεων του πετρώματος (B)

και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Δείκτης Εξορυξιμότητας} = W + S + J + B \quad (5)$$

Οι παράμετροι του Δείκτη Εξορυξιμότητας λαμβάνουν τιμές σύμφωνα με την βαθμονόμηση του Πίνακα 1. Οι ίδιοι ερευνητές, με βάση τον Δείκτη Εξορυξιμότητας που διαμόρφωσαν, κατατάσσουν τα πετρώματα σε επτά (7) κλάσεις, ανάλογα με το βαθμό ευκολίας που παρουσιάζει η εξόρυξή του με μηχανικά μέσα (Πίνακας 2).

Πίνακας 1. Βαθμονόμηση των παραμέτρων του Δείκτη Εξορυξιμότητας των MUFTUOGLU & SCOBLE (Πηγή Scoble et al, 1984).

| ΚΛΑΣΗ<br>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ             | I      | II      | III     | IV     | V       |
|---------------------------------|--------|---------|---------|--------|---------|
| ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ                      | ΠΛΗΡΗΣ | ΜΕΓΑΛΗ  | ΜΕΣΗ    | ΜΙΚΡΗ  | ΚΑΘΟΛΟΥ |
| ΒΑΘΜΟΣ (W)                      | <0     | 5       | 15      | 20     | 25      |
| ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟ<br>ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ | <20    | 20-60   | 40-60   | 60-100 | >100    |
| $I_s$ (50) Mpa                  | <0.5   | 0.5-15  | 1.5-2.0 | 2-3.5  | >3.5    |
| ΒΑΘΜΟΣ (S)                      | 0      | 10      | 15      | 20     | 25      |
| ΑΠΟΣΤΑΣΗ                        | <0.3   | 0.3-0.6 | 0.6-1.5 | 1.5-2  | >2      |

|                            |      |         |         |         |      |
|----------------------------|------|---------|---------|---------|------|
| ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ, m              | 5    | 15      | 30      | 45      | 50   |
| ΒΑΘΜΟΣ (J)                 |      |         |         |         |      |
| ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>ΔΙΑΣΤΡΩΣΕΩΝ, m | <0.1 | 0.1-0.3 | 0.3-0.6 | 0.6-1.5 | >1.5 |
| ΒΑΘΜΟΣ (B)                 | 0    | 5       | 10      | 20      | 10   |

Πίνακας 2: Κατάταξη των πετρωμάτων ανάλογα με την ευκολία εξόρυξής τους με βάση τον Δείκτη Εξορυξιμότητας των MUFTUOGLU & SCOBLE (Πηγή Scoble et al, 1984).

| Κ<br>Λ<br>Α<br>Σ<br>Η | ΕΥΚΟΛΙΑ<br>ΕΞΟΡΥΞΗΣ | ΔΕΙΚΤΗΣ<br>(W-S-J-B) | ΜΕΘΟΔΟΣ   | ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ<br>(ΜΕ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ)   |
|-----------------------|---------------------|----------------------|---|---|
| I                     | ΠΟΛΥ<br>ΕΥΚΟΛΑ      | <40                  | 1. Ripping<br>2. Dragline<br>Cast<br>3. Shovel<br>Digging | A. Ripper-Scraper<br>Cat. D8<br>B. Dragline >5m <sup>3</sup><br>Lima 2400<br>C. Rope Shovel >3m <sup>3</sup><br>Ruston Bucyrus 71RB   |
| II                    | ΕΥΚΟΛΑ              | 40-50                | 1. Ripping<br>2. Dragline<br>Cast<br>3. Shovel<br>Digging | A. Ripper-Scraper<br>Cat. D9<br>B. Dragline >5m <sup>3</sup><br>Marion 195<br>C. Rope Shovel >3m <sup>3</sup><br>Ruston Bucyrus 150RB |
|                       | ΜΕΤΡΙΩΣ<br>ΔΥΣΚΟΛΑ  |                      | 1. Ripping<br>2. Shovel                                   | A. Ripper-Sbov./F.E.Ldr.<br>Cat. D9   |

|     |                              |        |                                    |   |                                 |                                  |
|-----|------------------------------|--------|------------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|
| III |                              | 50-60  | Digging                            | B.Hydraulic Shovel>3m <sup>3</sup><br>Cat. 245  |                                 |                                  |
| IV  | ΔΥΣΚΟΛΑ                      | 60-70  | 1. Ripping<br>2. Shovel<br>Digging | A. Ripper-Sbov./F.E.Ldr.<br>Cat. D10<br><br>B. Hydraulic Shovel>3m <sup>3</sup><br>Cat. 245 or O & K RH40 |                                 |                                  |
| V   | ΠΟΛΥ<br>ΔΥΣΚΟΛΑ              | 70-95  | Shovel<br>Digging                  | Hydraulic Shovel>3m <sup>3</sup><br>Cat. 245<br>O & K RH40  |                                 |                                  |
| VI  | ΕΞΑΙΡΕΤΙΚ<br>Α<br>ΔΥΣΚΟΛΑ    | 95-100 | Shovel<br>Digging                  | Demag H111<br>Poclaln<br>1000CK<br>P&H 1200 RH  | Hyd.Shovels<br>>7m <sup>3</sup> |                                  |
| VII | ΟΡΙΑΚΑ<br>ΧΩΡΙΣ<br>ΕΚΡΗΚΤΙΚΑ | >100   | Shovel<br>Digging                  | Demag<br>O&K<br>H300  | H185<br>H241                    | Hyd.Shovels<br>>10m <sup>3</sup> |

Ο Wearer, 1975 προτείνει ένα σύστημα ταξινόμησης των πετρωμάτων, σε σχέση με την δυνατότητα εξόρυξής τους με αναμοχλευτή γαιών (rippability), το οποίο στηρίζεται στο συνδυαστικό αποτέλεσμα πολλών παραμέτρων του πετρώματος, όπως τον ορισμό των οικογενειών των ασυνεχειών, την διεύθυνσή τους, την επιμονή τους κα.

Ο Μπαρούνης, 1985 λαμβάνει υπόψη τις παρακάτω παραμέτρους του πετρώματος για να εκτιμήσει την εξορυξιμότητά τους, όταν εκσκάπτονται με ripper (rippability):

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Ταχύτητα διάδοση σεισμικών κυμάτων  
 Βαθμός αποσάθρωσης του πετρώματος  
 Δείκτης αντοχής κατά Protodyakonov  
 Ύψος ανάκρουσης σφύρας Schmidf τύπου N  
 Σκληρότητα κατά Shore  
 Αντίσταση τριβής κατά Los Angeles  
 Ειδικό βάρος πετρώματος

Ο Karpuz, 1990 μελετώντας την επίδραση των ιδιοτήτων του πετρώματος στην λειτουργία του εκσκαπτικού μηχανισμού σε επτά επιφανειακά λιγνιτορυχεία της Turkish Coal Enterprises, κατέληξε στην διαμόρφωση ενός κριτηρίου εξορυξιμότητας. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην δημιουργία του δείκτη εξορυξιμότητας είναι:

Ο βαθμός αποσάθρωσης του πετρώματος.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ή εναλλακτικά ο δείκτης σημειακής φόρτισης του άρρηκτου πετρώματος.

Η ταχύτητα του σεισμικού κύματος.

Η σκληρότητα κατά Schmidt.

Οι παραπάνω παράμετροι ταξινομήθηκαν και βαθμολογήθηκαν ανάλογα με την σημασία τους όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Η Βαθμονόμηση των παραμέτρων του δείκτη εξορυξιμότητας του Karpuz.

| ΚΛΑΣΗ<br>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ                                       | 1  | 2    | 3     | 4      | 5    |
|---|----|------|-------|--------|------|
| ΑΝΤΟΧΗ<br>ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ<br>ΘΛΙΨΗΣ Η<br>ΔΕΙΚΤΗΣ $I_s$ (Μρα) | <5 | 5-20 | 20-40 | 40-110 | >110 |
| ΒΑΘΜΟΣ  | 2  | 5    | 10    | 20     | 25   |

|  |        |           |           |           |       |
|--|--------|-----------|-----------|-----------|-------|
| ΜΕΣΗ<br>ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ         | <0,3   | 0,3-0,6   | 0,6-1,2   | 1,2-2,0   | >2,0  |
| ΒΑΘΜΟΣ                                 | 5      | 10        | 15        | 20        | 25    |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ<br>ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ<br>ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s) | <1600  | 1600-2000 | 2000-2500 | 2500-3000 | >3000 |
| ΒΑΘΜΟΣ                                 | 5      | 10        | 15        | 20        | 25    |
| ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗ                             | ΠΛΗΡΗΣ | ΜΕΓΑΛΗ    | ΜΕΣΗ      | ΜΙΚΡΗ     | ΜΙΚΡΗ |
| ΒΑΘΜΟΣ                                 | 0      | 3         | 6         | 10        | 10    |
| ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ<br>ΚΑΤΑ Schmidt             | <20    | 20-30     | 20-45     | 45-55     | >55   |
| ΒΑΘΜΟΣ                                 | 3      | 5         | 8         | 12        | 15    |



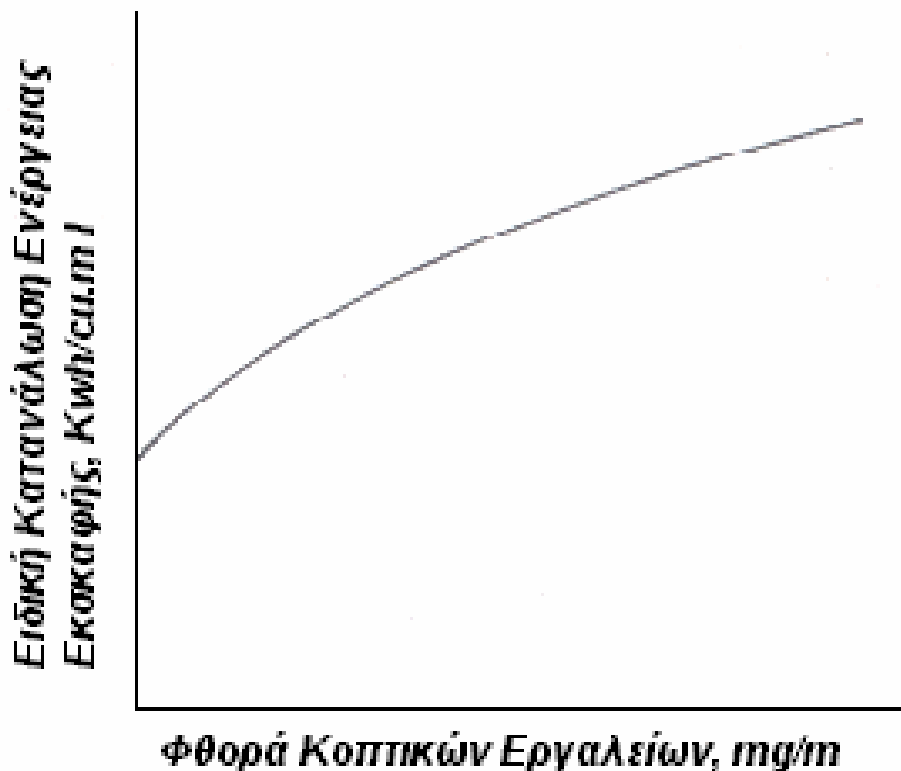


#### 4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΟΡΥΞΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

##### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα κοπτικά εργαλεία κατά την διάρκεια της εκσκαφής υφίστανται συνεχή φθορά, η οποία έχει ως αποτέλεσμα, αφ' ενός μεν την απομάκρυνση μετάλλου από το κοπτικό εργαλείο και κατά συνέπεια την μείωση των διαστάσεών του, αφ' ετέρου δε την μεταβολή των γεωμετρίας του κοπτικού εργαλείου.

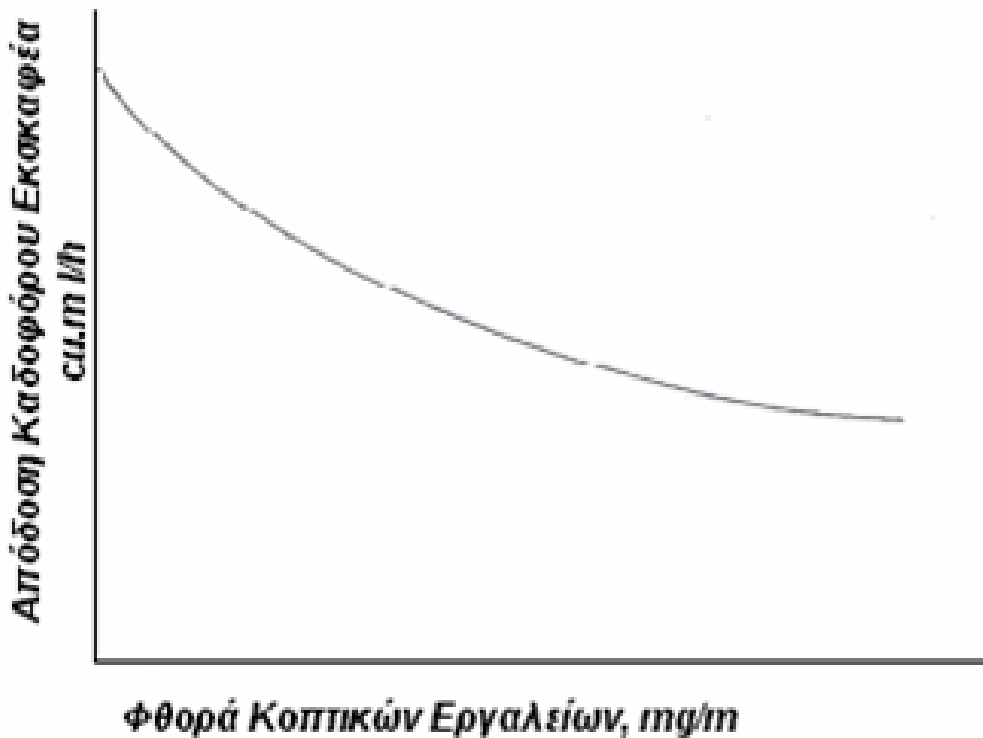
Αποτέλεσμα της φθοράς των κοπτικών εργαλείων είναι η αύξηση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας εκσκαφής, επειδή αυξάνεται η δύναμη κοπής που πρέπει να αναπτύξουν τα κοπτικά εργαλεία για την εκσκαφή του πετρώματος (Σχήμα 7), ενώ παράλληλα παρατηρείται μείωση της απόδοσης του μηχανήματος εξόρυξης, υπό την προϋπόθεση ότι διατηρείται σταθερή η ισχύς του μηχανισμού εκσκαφής του μηχανήματος (Σχήμα 8).



Σχήμα 7. Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας εκσκαφής συναρτήσει της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.

Το πρόβλημα της φθοράς των κοπτικών εργαλείων είναι κεφαλαιώδους σημασίας στην τεχνολογία των εξορύξεων και αντικείμενο μελέτης ερευνητών και κατασκευαστών εξοπλισμού εξόρυξης. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται ορισμένα βασικά στοιχεία, που αφορούν την φθορά των κοπτικών εργαλείων και την επίδρασή της στην εξορυξιμότητα των πετρωμάτων.

Το ετήσιο κόστος με το οποίο επιβαρύνεται ο βιομηχανικός τομέας που ασχολείται με εργασίες εξόρυξης, λόγω της φθοράς που προκαλούν τα πετρώματα στα μέταλλα, είναι εξαιρετικά υψηλό και αποτελεί στοιχείο του λειτουργικού κόστους του μηχανήματος, όπως π.χ. τα καύσιμα και τα λιπαντικά.

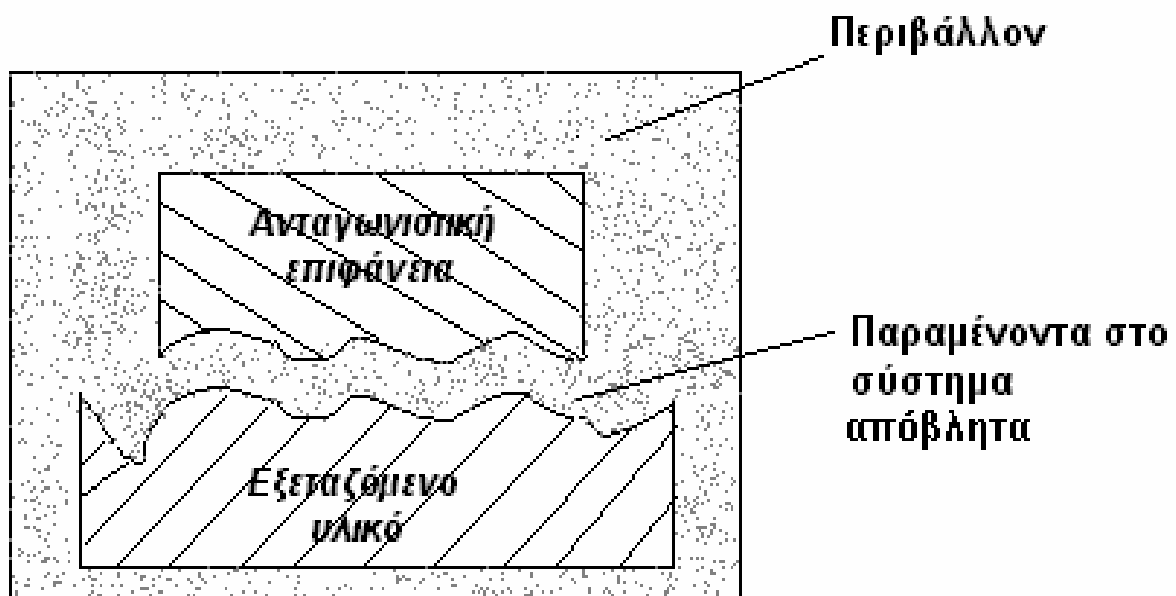


Σχήμα 8. Μεταβολή της απόδοσης μηχανήματος εξόρυξης (καδοφόρου εκσκαφέα) συναρτήσει την φθοράς των κοπτικών εργαλείων των κάδων.

#### 4.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ

Με τον όρο φθορά περιγράφεται η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού, από το ένα ή και από τα δύο σώματα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση.

Η φθορά ενός υλικού μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους και δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό ενός υλικού, αλλά εξαρτάται απ' όλα τα στοιχεία του τριβοσυστήματος, τα οποία είναι: (α) το εξεταζόμενο υλικό, (β) το υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) ως προς το οποίο μελετάται η φθορά του εξεταζόμενου, (γ) τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα της φθοράς και (δ) το περιβάλλον, υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση κλπ (Σχήμα 9).

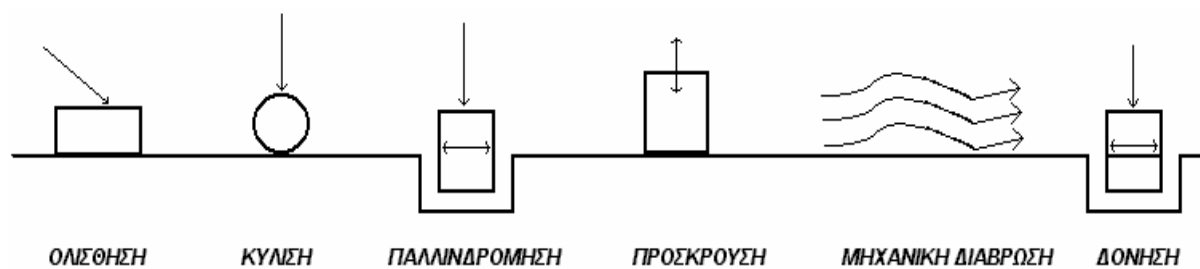


Σχήμα 9. Συστατικά μέρη ενός τριβοσυστήματος.

#### 4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΙΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ/ΑΚΡΩΝ

Δυο είναι οι κύριες ομάδες τύπων φθοράς των υλικών:

Ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών σε επαφή, διακρίνουμε (Σχήμα 10):



Σχήμα 10. Κατηγορίες φθοράς υλικών σε επαφή, ανάλογα με τον τρόπο της σχετικής κίνησής τους.

(α) Φθορά λόγω ολίσθησης παρατηρείται, όταν οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη, με ή χωρίς την παρουσία, στη διεπιφάνεια, αποξεστικών σωματιδίων ή λιπαντικού. Είναι ο τύπος φθοράς που συναντάται, συνήθως, σε μηχανές ή όργανα, των οποίων ορισμένα μέρη βρίσκονται σε σχετική κίνηση.

(β) Φθορά λόγω κύλισης συναντάται κατά την κύλιση μιας σφαίρας ή ενός κυλίνδρου σε μια στερεή επιφάνεια. Η φθορά αυτού του τύπου ευθύνεται για την καταστροφή εδράνων των οποίων η λειτουργικότητα εξαρτάται από κίνηση ρουλεμάν.

(γ) Η φθορά λόγω παλλινδρόμησης οφείλεται σε παλλινδρομικές κινήσεις υψηλής συχνότητας και μικρής έντασης. Πρόκειται για κινήσεις που συναντώνται σε οποιαδήποτε κοινή μηχανή.

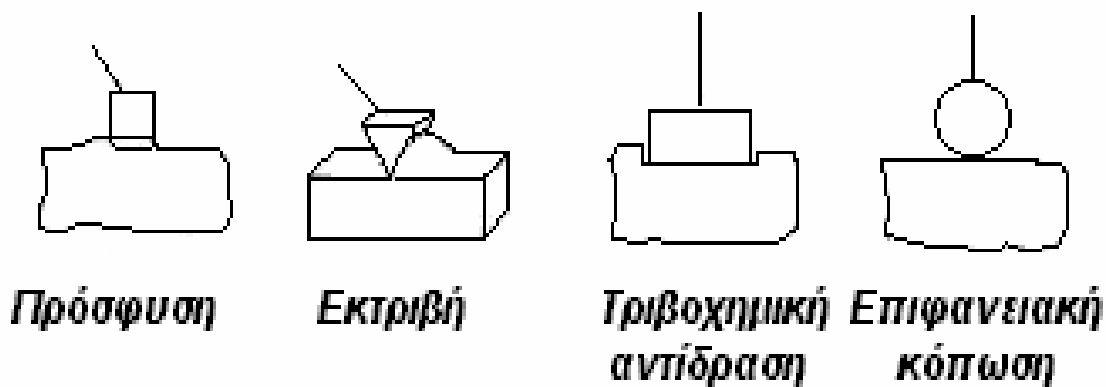
(δ) Η φθορά λόγω πρόσκρουσης προκαλεί καταστροφή της επιφάνειας, λόγω πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων, σταγόνων ή υγρών εκτοξευμάτων. Η παρουσία ηλεκτρολυτών επιταχύνει τη φθορά του μεταλλικού υλικού, λόγω της σύνδρομης δράσης φαινομένων χημικής διάβρωσης.

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

(στ) Η φθορά λόγω δόνησης προκαλείται στις διεπιφάνειες των εν επαφή υλικών όταν αυτά υποβάλλονται σε ταυτόχρονη φόρτιση παλλινδρόμησης και ολίσθησης. Στις κατ' αυτόν το μηχανισμό φθειρόμενες επιφάνειες εμφανίζονται κοιλότητες και εσοχές οι οποίες περιβάλλονται από τα προϊόντα της φθοράς. Συνήθως, η φθορά λόγω δόνησης επιτείνεται

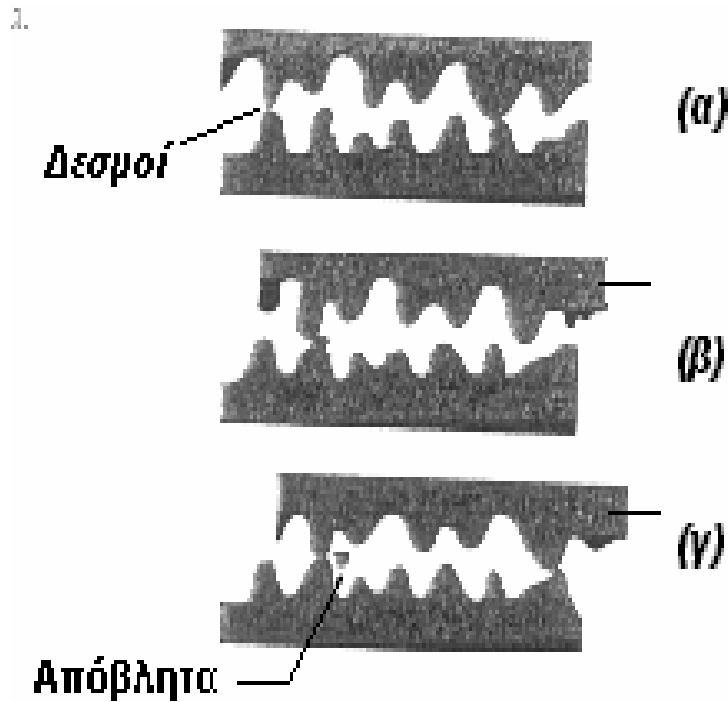
από φαινόμενα διάβρωσης. Τότε, οι μεταλλικές επιφάνειες οξειδώνονται, σχηματίζοντας ενδιάμεσο στρώμα οξειδίου το οποίο θραύεται ψαθυρά, προϊούσης της τριβής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση, μεταξύ των φθειρόμενων επιφανειών, οξειδίων τα οποία παρεμβαίνουν στο μηχανισμό φθοράς ως υλικά απόξεσης. Πρόκειται για ένα μηχανισμό φθοράς που συναντάται πολύ συχνά μεταξύ επιφανειών, οι οποίες συνδέονται εν ξηρώ, όπως είναι οι άξονες και τα έδρανα συνδετικών δακτυλίων.

Ανάλογα με το μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο της φθοράς, διακρίνουμε τέσσερις τύπους φθοράς (Σχήμα 11):



Σχήμα 11. Μηχανισμοί φθοράς.

(α) Φθορά λόγω πρόσφυσης παρατηρείται όταν δυο ομαλές επιφάνειες ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, μεταξύ των ατόμων στην διεπιφάνεια των δυο υλικών που βρίσκονται σε επαφή, εμφανίζονται δυνάμεις πρόσφυσης και αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί, οι οποίοι καταστρέφονται και επαναδημιουργούνται (Σχήμα 12). Με τον τρόπο αυτό, τμήματα του ενός υλικού μεταφέρονται στο άλλο, και, εν συνεχεία, αποβάλλονται ως παραπροϊόντα της διεργασίας επαφής. Τα τελευταία έχουν την ίδια χημική σύσταση με τα φθειρόμενα υλικά, αλλά λόγω φαινομένων ενδοτράχυνσης, πολλές φορές, εμφανίζουν υψηλότερη σκληρότητα απ' αυτά.



Σχήμα 12. (α) Στις προεξοχές των επαπτόμενων επιφανειών δημιουργούνται, αρχικά, χημικοί δεσμοί. (β) Με την εφαρμογή ικανής δύναμης, οι δεσμοί σπάνε και οι επιφάνειες ολισθαίνουν. (γ) Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, οι προεξοχές θραύονται και οι επιφάνειες φθείρονται.

Ο συντελεστής φθοράς ( $k$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{3HV}{Fx} \quad (6)$$

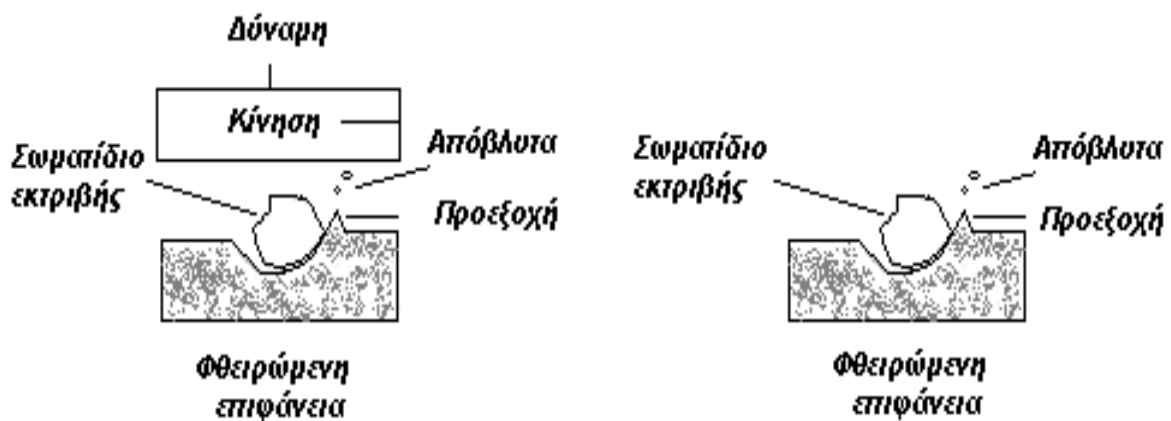
όπου  $V$  : ο όγκος του υλικού που έχει φθαρεί με την εφαρμογή φορτίου  $F$  κατά την ολίσθηση σε απόσταση  $x$  και

$H$  : η σκληρότητα της φθειρόμενης επιφάνειας.

Η αύξηση της αντοχής μιας επιφάνειας σε φθορά λόγω πρόσφυσης, μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού, όσο και σε επίπεδο λειτουργίας: σχεδιασμός εξαρτημάτων ώστε τα αναλαμβανόμενα απ' αυτά φορτία να είναι μικρά, λείες επιφάνειες και συνεχής λίπανση βοηθούν την πρόληψη των φαινομένων πρόσφυσης που οδηγούν σε φθορά. Επίσης, οι μηχανικές ιδιότητες και η μικροδομή των υλικών των δυο επιφανειών αποτελούν σημαντικές παραμέτρους του φαινομένου της φθοράς τους: γενικά, αν

και οι δυο επιφάνειες έχουν υψηλή σκληρότητα, παρουσιάζουν καλή αντοχή σε φθορά. Η αντοχή σε φθορά των πολυμερών μπορεί να βελτιωθεί, είτε με τη προσθήκη πολυτετραφθοροαιθυλενίου (Teflon), που οδηγεί σε άμεση μείωση του συντελεστή τριβής, είτε με τη χρήση ενισχυτικών ινών, όπως υαλονήματα, ανθρακονήματα ή πολυμερικές ίνες, που οδηγεί σε ενίσχυση της μηχανικής αντοχής του πολυμερούς.

(β) Φθορά λόγω εκτριβής προκαλείται, όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια, τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό υλικό, είτε τα προϊόντα φθοράς των δυο επιφανειών (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. Φθορά λόγω εκτριβής της επιφάνειας από σκληρά σωματίδια.

Ο τύπος αυτός φθοράς συναντάται, συχνά σε εξαρτήματα μηχανών κατεργασίας υλικών, - όπως είναι τα πτερύγια, τα λειαντικά άκρα, οι αποξεστήρες κλπ, - και σε περιπτώσεις ακούσιας εισαγωγής αποξεστικών σωματιδίων, μεταξύ κινούμενων επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Πολλές φορές, η φθορά λόγω εκτριβής επιδιώκεται προκειμένου να επιτευχθεί απομάκρυνση υλικού, όπως συμβαίνει σε κατεργασίες λείανσης επιφανειών (αμμοβολή).

Ο ρυθμός φθοράς λόγω εκτριβής μειώνεται με τη μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου και την αύξηση της σκληρότητας του φθειρόμενου υλικού, διότι μειώνεται το βάθος προσβολής του υλικού από τα σκληρά σωματίδια. Γενικά, υλικά με υψηλή σκληρότητα, καλή δυσθραυστότητα και υψηλή μηχανική αντοχή εν θερμό, έχουν και καλή αντοχή σε φθορά λόγω εκτριβής. Τέτοια υλικά είναι:

- οι χάλυβες μετά από βαφή και επαναφορά,
- οι επιφανειακά σκληρυμένοι χάλυβες, π.χ. ενανθρακωμένοι κτλ
- τα κράματα κοβαλτίου, π.χ. στελλίτης,
- τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας με διασπορά σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου (cermets),
- οι λευκοί χυτοσίδηροι και
- οι σκληρές επιφάνειες από συγκόλληση

Τα περισσότερα κεραμικά υλικά εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε φθορά λόγω εκτριβής, χάριν της υψηλής τους σκληρότητας, αλλά η ευθραυστότητά τους περιορίζει την περιοχή χρησιμοποίησής τους.

(γ) Λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων, είναι δυνατόν να παραχθούν στη διεπιφάνεια επαφής προϊόντα διαφορετικής χημικής σύστασης από τα υλικά που βρίσκονται σε επαφή. Πρόκειται για μηχανισμό που διέπει τη φθορά τριβοσυστημάτων υλικών, τα οποία υπόκεινται εύκολα σε οξείδωση, π.χ. κοινοί χάλυβες.

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

Οι μηχανισμοί φθοράς, που μόλις αναφέρθηκαν, παρατηρούνται εύκολα εξετάζοντας ένα χρησιμοποιημένο κοπτικό εργαλείο, αν και πολλές φορές ένας μηχανισμός φθοράς είναι δυνατόν να καλύπτει άλλους. Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι, προσπάθειες για μείωση μιας μορφής φθοράς έχει συνήθως ως αποτέλεσμα την εμφάνιση στο κοπτικό εργαλείο μιας άλλης μορφής φθοράς. Επομένως, τα κοπτικά εργαλεία θα πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, κατά περίπτωση, να επιτυγχάνονται τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η εξόρυξη, παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην διαμόρφωση του μηχανισμού όσο και του βαθμού φθοράς των κοπτικών εργαλείων. Σημαντική είναι επίσης η επίδραση του τρόπου εξόρυξης στην φθορά των κοπτικών εργαλείων, η οποία είναι δυνατόν να είναι μεγάλης έκτασης, όταν η εκσκαφή πραγματοποιείται με μηχανήματα συνεχούς εκσκαφής.



Η φθορά λόγω τριβής εξαρτάται άμεσα από (Larson et al, 1987):

Τις δυνάμεις που ασκούνται επί του κοπτικού εργαλείου

Την ταχύτητα κοπής

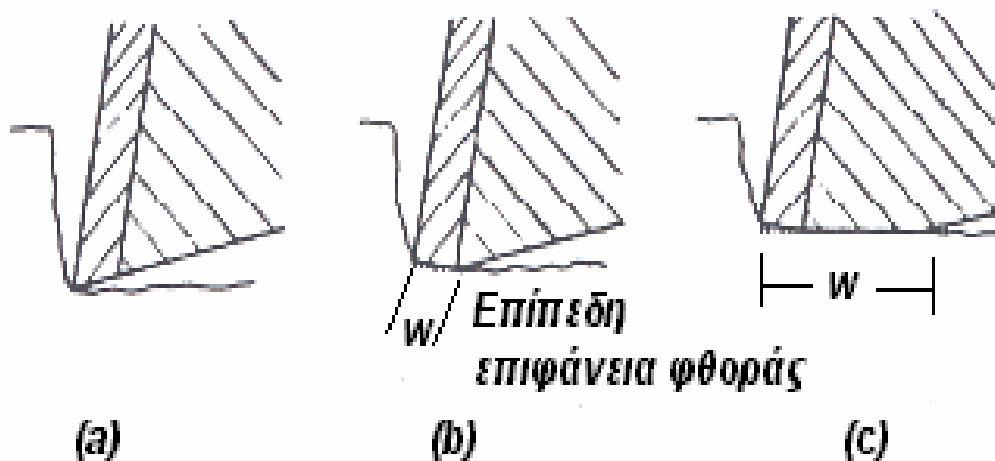
Την σύσταση και μεταλλουργία του κοπτικού εργαλείου

Την σκληρότητα του εξορυσσομένου πετρώματος και

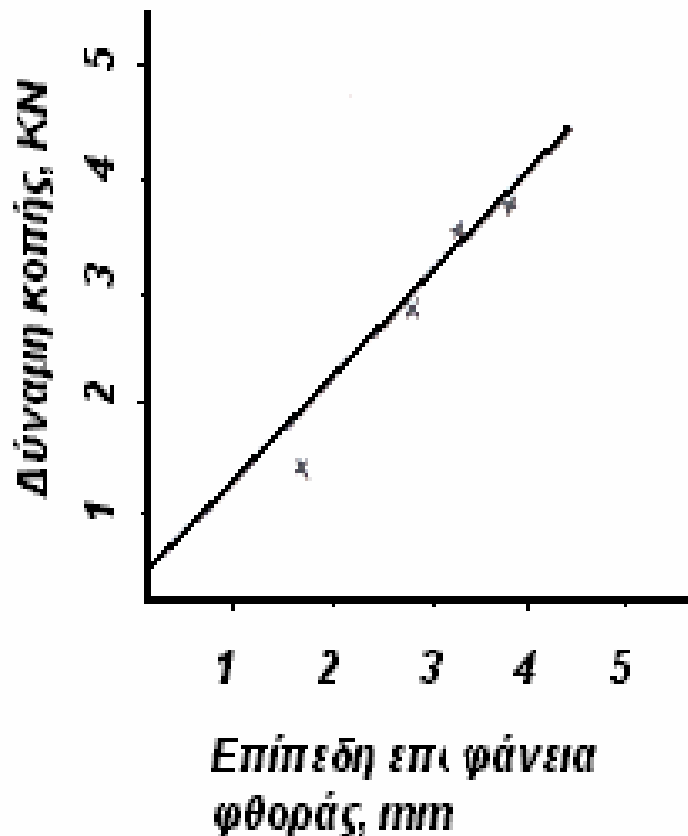
Την φθοροποιό ικανότητα του εξορυσσομένου πετρώματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η σκληρότητα και η φθοροποιός ικανότητα είναι δύο διαφορετικές ιδιότητες του πετρώματος, παρατηρείται δε το φαινόμενο πολλά σχετικά μαλακά πετρώματα να είναι ιδιαίτερα φθοροποιά.

Οι Kenny και Johnson (Kenny et al, 1976 – Kenny et al, 1977) μελετώντας την φθορά κοπτικών εργαλείων λόγω τριβής διαπίστωσαν ότι, η κύρια επίπτωση της φθοράς στο κοπτικό εργαλείο είναι η απομάκρυνση ενός πρίσματος μετάλλου από την κάτω επιφάνεια του κοπτικού και η δημιουργία μιας επίπεδης επιφάνειας πλάτους  $W$  (Σχήμα 14). Η επιφάνεια αυτή σχηματίζει μια αρνητική γωνία οπίσθιας ελευθερίας και το θραυσμένο πέτρωμα, που εγκλωβίζεται στην περιοχή αυτή, αυξάνει λόγω τριβών την δύναμη κοπής (Σχήμα 15).



Σχήμα 14. Διαδοχικές φάσεις δημιουργίας επίπεδης επιφάνειας φθοράς σε κοπτικό εργαλείο τύπου σφήνας.



Σχήμα 15. Επίδραση της επίπεδης επιφάνειας φθοράς του κοπτικού εργαλείου στην δύναμη κοπής.

Η απόδοση του κοπτικού εργαλείου επηρεάζεται σημαντικά από την φθορά που υφίσταται. Επίπεδη επιφάνεια φθοράς ( $W$ ) ολίγων χιλιοστών αυξάνει κατά πολλές φορές την δύναμη κοπής, που πρέπει να αναπτύξει το κοπτικό εργαλείο.

#### 4.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Για τη εκτίμησης της φθοράς των κοπτικών εργαλείων ο McFeat – Smith (McFeat – Smith et al, 1977) πραγματοποίησε δοκιμές κοπής με κοπτικό εργαλείο τύπου σφήνας, από καρβίδιο βολφραμίου με 10% κατά βάρος κοβάλτιο και μέγεθος κόκκων  $3.5 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$ , πλάτος 12.7 mm και με ταχύτητα κοπής 150mm/sec. Ύστερα από την κοπή 71 διαφορετικών ιζηματογενών πετρωμάτων διαπίστωσε ότι η φθορά του κοπτικού συνδέεται με χαρακτηριστικές ιδιότητες του πετρώματος σύμφωνα με την σχέση:

$$W = 0.55 + 4.25 \cdot 10^{-5} S^3 - 1.88 \cdot 10^{-3} C^3 + 1.2 \cdot 10^{-6} Q^3 \dots (mg/m) \quad (7)$$

όπου:

W: φθορά του κοπτικού εργαλείου, mg/m

S: σκληρότητα πετρώματος κατά Shore

C: συντελεστής συγκόλλησης των κόκκων του πετρώματος (τιμές από 0-10)

Q: περιεκτικότητα του πετρώματος σε χαλαζία, %

Για την εκτίμηση της φθοροποιού ικανότητας των πετρωμάτων χρησιμοποιείται και ο ‘Δείκτης Schymezeck’, που υπολογίζεται από την σχέση:

$$F = \frac{\sigma t * Q * d}{100} \quad (8)$$

όπου:

F : Δείκτης Schymezeck

σt: αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος, Kg/cm<sup>2</sup>

Q : περιεκτικότητα του πετρώματος σε χαλαζία, %

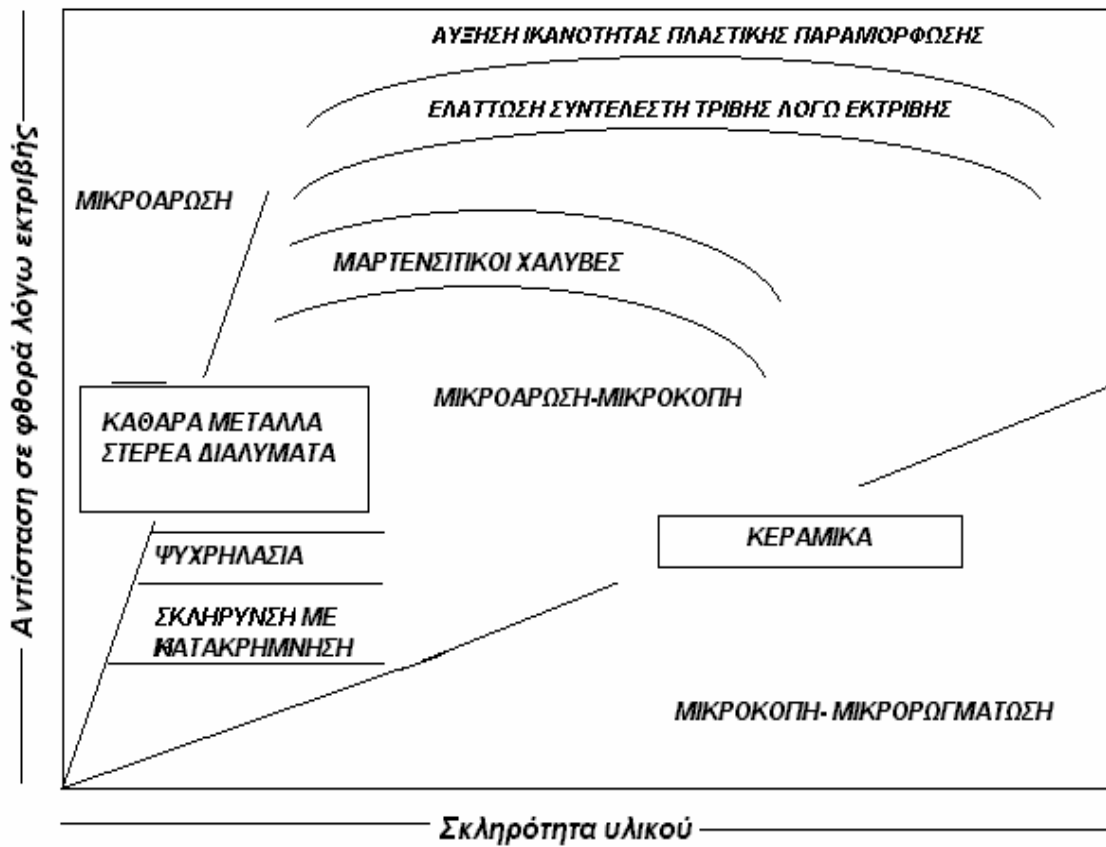
d : διάμετρος κόκκων του πετρώματος, cm

#### 4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΤΗ ΦΘΟΡΑ

Ο συντελεστής τριβής, όπως αναφέρθηκε δεν χαρακτηρίζει, γενικά ένα υλικό, αλλά εκφράζεται πάντοτε ως προς μια επιφάνεια αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) και για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, - υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει το ανάγλυφο των επιφανειών οι οποίες βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση.

Το ανταγωνιστικό υλικό καθορίζει πολλές φορές και το μηχανισμό με τον οποίο η διεργασία της τριβής προκαλεί φθορά του υλικού και απώλεια μάζας.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 16, ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού από τη φθειρόμενη επιφάνεια, εξαρτάται από τη σκληρότητά του, η οποία επηρεάζει και το μηχανισμό φθοράς.



Σχήμα 16. Εξάρτηση της αντίστασης σε φθορά λόγω εκτριβής υλικού σε συνάρτηση με τη σκληρότητα του.

## 5. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σήραγγες είναι έργα, τα οποία χαρακτηρίζονται από τη σταθερή διατομή τους, συνήθως κυκλική ή πεταλοειδής, και εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς, όπως είναι οι συγκοινωνιακές ή αρδευτικές σήραγγες, με οριζόντιο ή κεκλιμένο διαμήκη άξονα, μικρής ή μεγάλης διατομής και οι σήραγγες οδεύσεως σωληνώσεων.

Η τέχνη της κατασκευής σιράγγων βρίσκεται σε μια κρίσιμη καμπή: Η τεχνολογική πρόοδος στα συναφή έργα Πολιτικού Μηχανικού, η τάση για καλύτερες και ασφαλέστερες συνθήκες λειτουργίας και η ανάγκη οικονομικών λύσεων, σε συνδυασμό με τον παράγοντα χρόνο, είναι τα κυριότερα κίνητρα για την εφαρμογή νέων μεθόδων και νέων μηχανικών μέσων διατήσεως χωρίς τη χρήση εκρηκτικών, εφ' όσον το επιτρέπουν και οι εδαφολογικές συνθήκες. Τα μέχρι σήμερα θετικά αποτελέσματα, αλλά και το γεγονός της ζητήσεως συστημάτων μηχανικής διατήσεως, προδιαγράφουν περαιτέρω αύξηση εφαρμογών, και μάλιστα σημαντική, της μηχανικής διατήσεως.

Η έρευνα των πολυδιάστατων φαινομένων, οι εναλλακτικές τεχνικές λύσεις, οι οποίες δίνονται στα παρουσιαζόμενα προβλήματα, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της τεχνολογίας, θα διευρύνουν στο μέλλον την εφαρμογή της μηχανικής διατήσεως σε άγνωστους μέχρι σήμερα τομείς. Ίσως καμία άλλη περιοχή των δοκιμών δραστηριότητας δεν παρουσιάζει την ποικιλία των επιστημονικών ενοτήτων όπως αυτή της μηχανικής διατήσεως. Η πετρογραφία και η τεχνική γεωλογία και κατ' επέκταση η βραχομηχανική, η κατασκευαστική ικανότητα και εμπειρία του Μηχανικού, ο μηχανικός και ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, τα προβλήματα της μεταλλουργίας, ο εξαιρισμός, η οργάνωση και εποπτεία των εργασιών μέχρι και των συστημάτων αυτόματου ελέγχου και εξυπηρετήσεως καλύπτουν πολλές και διαφορετικές επιστημονικές ενότητες. Η συνεργασία όλων αυτών των επιστημονικών ενοτήτων οδηγεί στην επιτυχία του υπογείου έργου.

Η πρώτη προσπάθεια εκσκαφής σήραγγας, χωρίς την χρησιμοποίηση εκρηκτικών υλικών αλλά με μηχανικά μέσα, έγινε το 1856 από τον Wilson στην κατασκευή σιδηροδρομικής σήραγγας κοντά στο Μασαχουσέτη, μήκους 4,7 μιλίων. Η κατασκευή της σήραγγας διήρκεσε

21 έτη. Η μηχανή Wilson άντεξε μόνο 3 μέτρα σήραγγας. Οι ζημιές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ήταν τόσο μεγάλες, ώστε δεν επέτρεψαν τη συνέχιση της προσπάθειας.

Η δεύτερη σοβαρή προσπάθεια έγινε κατά έτη 1881-1883 στη διάνοιξη δύο ερευνητικών σηράγγων υδραγωγείου. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε τότε κατασκευάστηκε με βάση την εμπειρία από τις μηχανές κατακόρυφου διατρήσεως πηγαδιών για την εξόρυξη πετρελαίου. Και τα αποτελέσματα της προσπάθειας αυτής ήταν πτωχά λόγω κυρίως της ελλείψεως των απαραίτητων γεωλογικών και τεχνολογικών γνώσεων, αλλά και των κατάλληλων μετάλλων και πηγών κινητηρίου ενέργειας.

Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο οι μηχανές ολομέτρου διατρήσεως παρουσιάζουν ραγδαία εξέλιξη. Πρωτοπόροι είναι οι μηχανικοί Robbins (πρώτη αξιόλογη μηχανή ολομέτρου κοπής το 1953) και Wohlemeyer (σε συνεργασία με τα εργοστάσια Atlas – Corco και Habegger). Ακολουθούν οι Αμερικανική εταιρεία Robbins, οι Γερμανικές Damag και Wirth, η Σουηδική Atlas Corco, η Ιαπωνική Mitsubishi και η Γαλλική NFM.

Η πρώτη σήραγγα μεγάλης διατομής σε βράχο κατασκευάστηκε με μηχανικά μέσα το 1963 στο Pakistan. Η σήραγγα είχε διάμετρο διατρήσεως 11.20m και μήκος 4,3km. Από τότε ο ρυθμός κατασκευής σηράγγων με μηχανικά μέσα παρουσιάζει συνεχή αύξηση.

## **5.2 ΤΥΠΟΙ ΜΗΧΑΝΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΕΩΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

Μια σημαντική κατάταξη των μηχανών διατρήσεως σηράγγων, χωρίς χρήση εκρηκτικών, σύμφωνα με τη σημερινή τεχνολογική εξέλιξη, δίνει ο Πίνακας 4. Η βασική διάκριση είναι σε μηχανές ολομέτρου κοπής (Tunnel Boring Machines, TBM), σημειακής κοπής (Road Headers) και μηχανές μικρής διαμέτρου (Microtunnelling). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ο υδραυλικός εκσκαφές σόβελ με στρεφόμενο φτυάρι (Tunneling Excavator).

Για την κατασκευή σηράγγων μεγάλης διατομής χρησιμοποιούνται τα εξής συστήματα:

α) Μηχανική διάτρηση όλη της διατομής με μηχανές ανοικτού τύπου. Εφαρμόζεται σε σκληρά εδάφη.

β) Μηχανική διάτρηση όλης της διατομής με μηχανές απλής ή διπλής ασπίδας τηλεσκοπικού τύπου. Εφαρμόζεται σε μαλακά εδάφη.

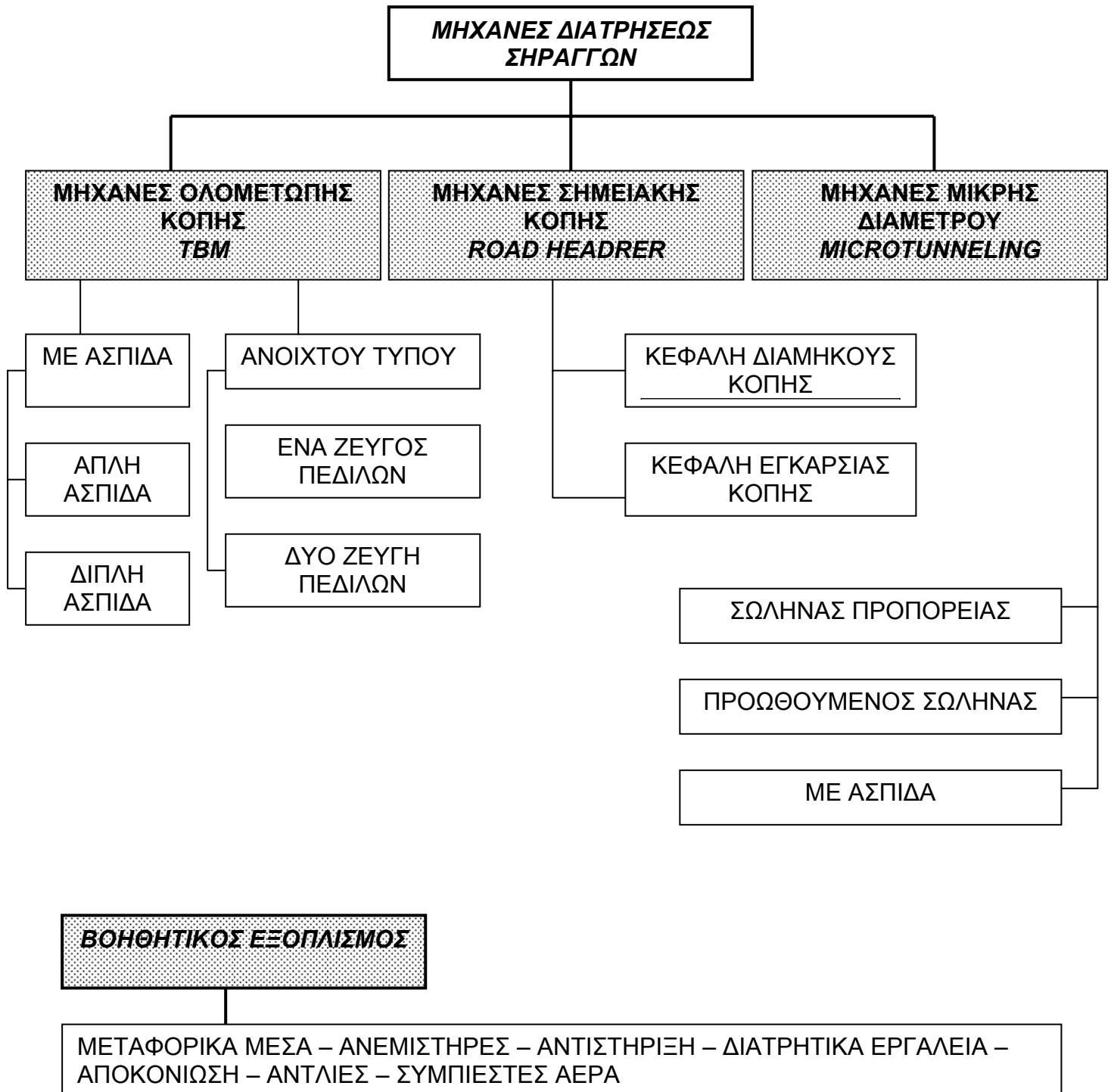
γ) Μηχανική διάτρηση με οδηγητική σήραγγα (pilot tunnel) και στη συνέχεια διεύρυνση.

δ) Μηχανική διάτρηση με απλό ή πολλαπλό μηχάνημα σημειακής κοπής.

Τα κυριότερα λειτουργικά στοιχεία του μηχανήματος είναι η κοπτική κεφαλή, ο φορέας της κοπτικής κεφαλής, τα πλαίσια της μηχανής, τα πέδιλα στηρίξεως, οι κύλινδροι προωθήσεως της κεφαλής υδραυλικής λειτουργίας, οι κινητήρες της κοπτικής κεφαλής και η απλή ή διπλή ασπίδα στα μηχανήματα με ασπίδα.

Τα μηχανήματα διατήσεως υποστηρίζονται από μια σειρά βοηθητικών μηχανημάτων, τα οποία έλκονται από το κύριο σώμα του μηχανήματος (back-up, σύστημα υποστηρίξεως). Τα βοηθητικά αυτά μηχανήματα είναι η ηλεκτρική εγκατάσταση (μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στο μέτωπο), ο μετασχηματιστής και οι διακόπτες, το υδραυλικό ασυγκρότητα, τα μηχανήματα τοποθέτησεως των προκατασκευασμένων στοιχείων επενδύσεως (δακτύλιοι), τα διατηρητικά μηχανήματα για την τοποθέτηση τόξων και αγκυρίων, το μηχάνημα εκτοξεύσεως σκυροδέματος, το σύστημα αποκονιώσεως (όταν χρειάζεται) και τα μηχανήματα μεταφοράς και φορτώσεως των υλικών. Τα μηχανήματα σημειακής κοπής έχουν επίσης υδραυλική προώθηση της κεφαλής και σύστημα αγκυρώσεως, ιδιαίτερα όταν το μηχάνημα εργάζεται σε σήραγγα υπό κλίση.

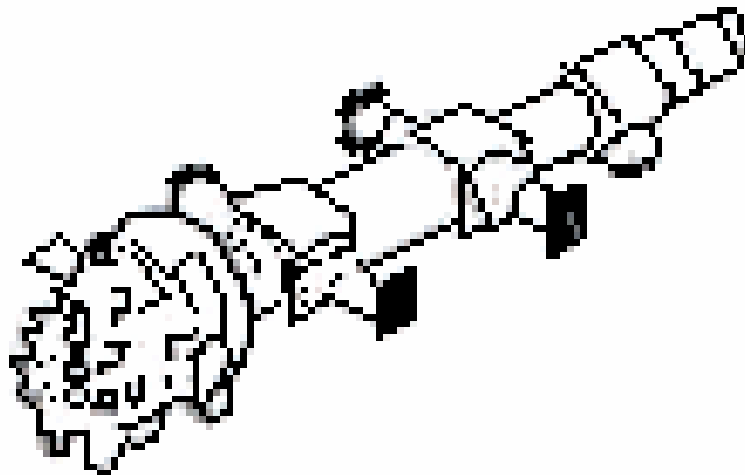
Πίνακας 4. Συστηματική κατάταξη μηχανών διατρήσεως σηράγγων χωρίς χρήση εκρηκτικών.





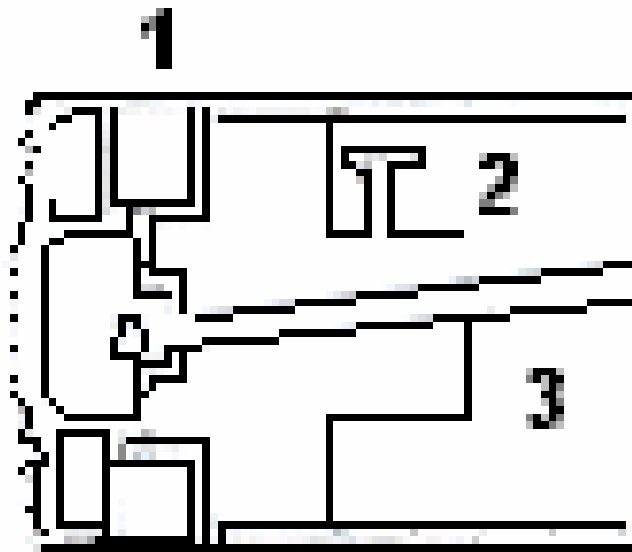
Τα σχήματα 17, 18, 19 και 20 δίνουν τις χαρακτηριστικές μορφές των μηχανημάτων του Πίνακα 4.

Κατά την επιλογή του μηχανικού εξοπλισμού για την διάνοιξη της σήραγγας πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις διάφορες παραμέτρους, όπως είναι η διατομή της σήραγγας (κυκλική ή πεταλοειδής), η διαθεσιμότητα υπαρχόντων μηχανών, οι γεωλογικές συνθήκες, οι περιβαντολλογικές επιπτώσεις (επίδραση σκόνης, παρενέργειες ανατινάξεων) και ο χρόνος κατασκευής.



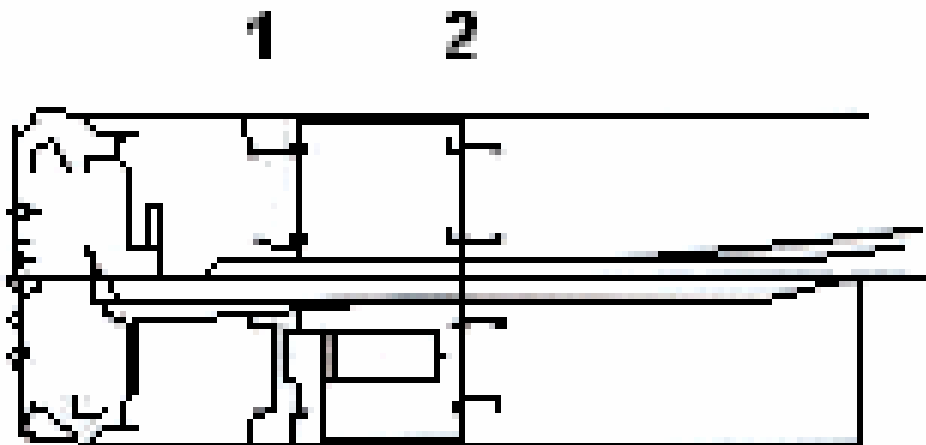
Σχήμα 17. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου.

Καταλληλότητα: Χαλαρά εδάφη 1 Ασπίδα, 2 Δακτύλιοι εσωτερικής επενδύσεως, 3 Μεταφορέας:



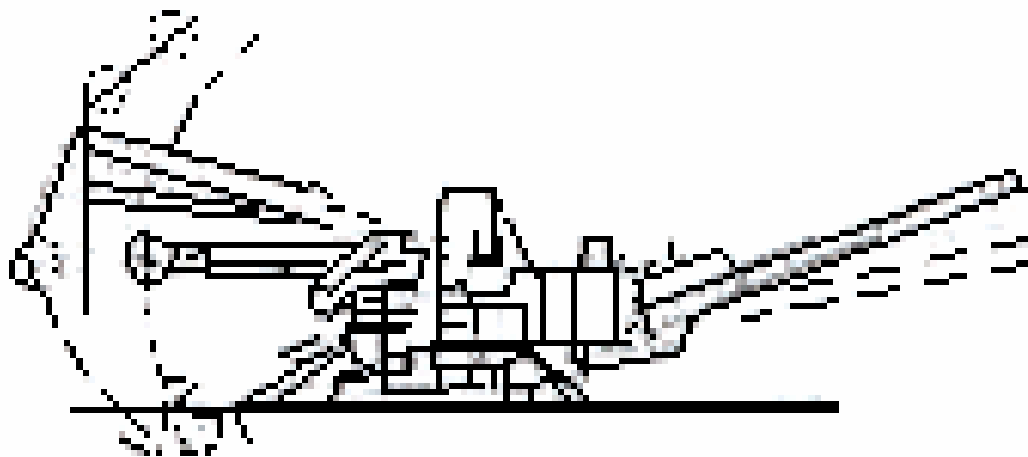
Σχήμα 18. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με απλή ασπίδα.

Καταλληλότητα: Χαλαρά εδάφη 1 Εμπρόσθια άρθρωση, 2 Οπίσθια άρθρωση:



Σχήμα 19. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με διπλή ασπίδα.

Καταλληλότητα: Μαλακός βράχος 40-110Μρα:



Σχήμα 20. Μηχάνημα σημειακής κοπής. Liebherr R942HD.



## **6. ΜΗΧΑΝΕΣ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ**

Οι μηχανές ολομέτωπης κοπής (TBM, Tunnel Boring Machines, Full Face Machines) διακρίνονται, ανάλογα με τη διαμόρφωση και την περιοχή εφαρμογής, σε δύο βασικές κατηγορίες:

- A) Μηχανές ανοικτού τύπου (Σχήμα 17). Είναι κατάλληλες για σκληρό πέτρωμα (>110 Mpa).
- B) Μηχανές με ασπίδα (ΣΧ. 18, 19). Διακρίνονται σε μηχανές με απλή ή διπλή ασπίδα. Είναι κατάλληλες κυρίως για σαθρά και χαλαρά εδάφη. Με προϋποθέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε πετρώματα χαμηλής σκληρότητας.

### **6.1 ΜΗΧΑΝΗ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΣΚΛΗΡΟ ΠΕΤΡΩΜΑ**

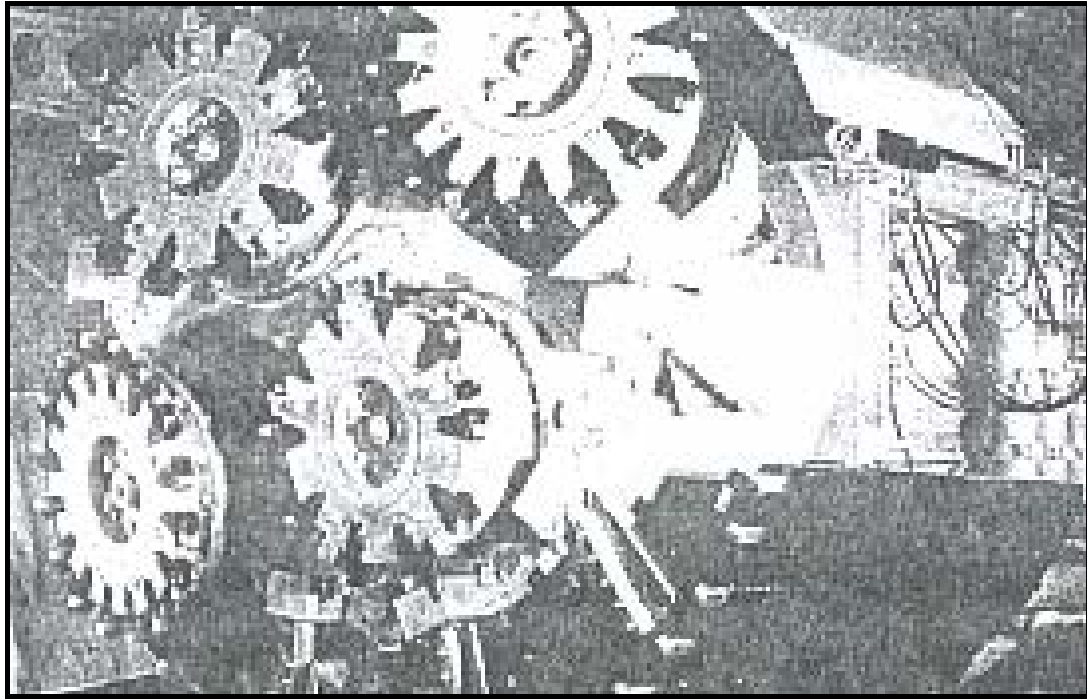
Διακρίνονται δύο μέθοδοι κοπής σε σκληρό πέτρωμα ανάλογα με την επενέργεια του κοπτικού εργαλείου πάνω στο βράχο:

#### **6.1.1 ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ ΥΠΟΚΟΠΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στη δεκαετία του 60. Η διεύθυνση κοπής είναι κάθετη προς τον άξονα προώθησής του μηχανήματος. Το κοπτικό εργαλείο έχει μορφή δοντιού και μοιάζει με τα κοπτικά εργαλεία των μηχανουργικών τόνων. Τα κοπτικά εργαλεία είναι κατάλληλα στερεωμένα στην περιφέρεια μιας ή περισσοτέρων στρεφόμενων δορυφορικών κεφαλών, τις οποίες φέρει η κύρια στρεφόμενη κεφαλή του μηχανήματος. Με την περιστροφή των δορυφορικών κεφαλών “αποφλοιώνεται” το πέτρωμα πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια του μετώπου, όπως περίπου η εκχόνδρωση αξόνων με μηχανουργικό τόρνο. Οι δορυφορικές κεφαλές με τα κοπτικά εργαλεία περιστρέφονται γύρω από τον δικό τους άξονα και ταυτόχρονα γύρω από τον κεντρικό άξονα του μηχανήματος σε μορφή δορυφορικής κινήσεως. Με τη μορφή αυτή κοπής το πέτρωμα κόβεται σε τεμάχια μεγέθους 5-15cm ανάλογα με τη γεωλογική του σύνθεση. Είναι επομένως ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, το γεγονός, ότι το κοπτικό εργαλείο δεν αναλύεται σε καθολική κοπή και θρυμματισμό του πετρώματος αλλά σε ένα τμήμα του, με αποτέλεσμα μειωμένη φθορά. Μειονέκτημα, και μάλιστα σοβαρό, είναι η συχνή θραύση των κοπτικών εργαλείων, που οφείλεται στην ανομοιόμορφη σύνθεση του πετρώματος και ιδιαίτερα στους κρυστάλλους

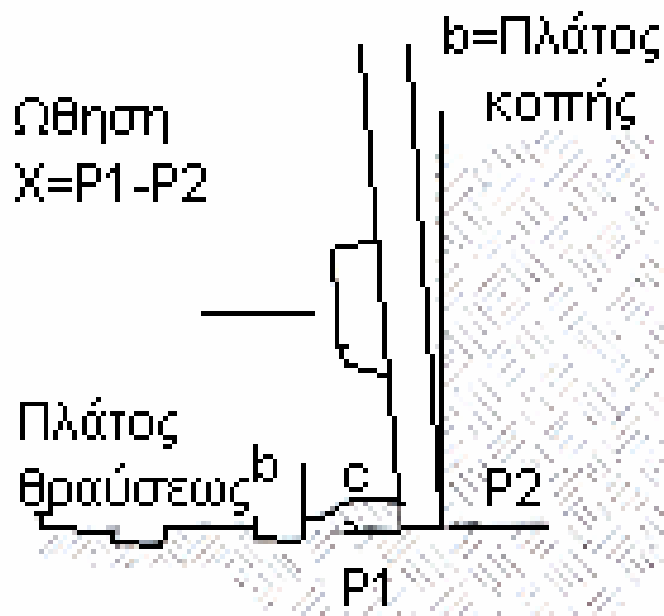
που περιέχει και η απαιτούμενη υψηλή ροπή στρέψεως, η οποία οφείλεται στους μεγάλους μοχλοβραχίονες των κοπτήρων.

Αντιπροσωπευτικός τύπος της μεθόδου υποκοπής είναι το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής των εργοστασίων Atlas – Corco – Habegger, το οποίο βασίστηκε σε σχέδια του μηχανικού Wohlmeyer. Ο τύπος αυτός, με διάμετρο 4,2m, χρησιμοποιήθηκε στη διάνοιξη της σήραγγας Θηβών του υδραγωγείου Μόρνου σε σχετικά σκληρό πέτρωμα (Σχήμα 18). Οι κοπτήρες, που κατασκευάζονται από ειδικό σκληροχάλυβα, είναι στερεωμένοι στην περιφέρεια των δορυφορικών κοπτικών κεφαλών. Οι δορυφορικές κεφαλές στρέφονται περί το γεωμετρικό τους άξονα και ταυτόχρονα ως δορυφόροι περί τον κεντρικό άξονα του μηχανήματος. Το μηχάνημα φέρει συνήθως τέσσερις δορυφορικές κεφαλές. Οι ταχύτητες περιστροφής των δορυφορικών κεφαλών και του τύμπανου εξαρτώνται από την φύση του πετρώματος και τη δύναμη προεντάσεως των πεδίων προς τα τοιχώματα της σήραγγας και είναι της τάξεως των 7 έως 12 στροφών ανά λεπτών. Η ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου, σε συνδυασμό με την επιβαλλόμενη αξονική δύναμη, προσδιορίζουν το μέγεθος των αποκοπτομένων τεμαχίων και την καθαρή ταχύτητα προώθησεως. Η εργασία στερεώσεως των κοπτικών εργαλείων πάνω στο φορέα τους γίνεται με συγκόλληση ή σφήνωση στο συνεργείο του εργοταξίου, το οποίο πρέπει να διαθέτει τα απαραίτητα εργαλεία και συσκευές επισκευής. Ο φορέας με το εργαλείο προσαρμόζεται στη συνέχεια με σύσφιξη πάνω στη δορυφορική κοπτική κεφαλή. Η αντικατάσταση των κοπτήρων πρέπει να γίνεται γρήγορα, γιατί η φθορά τους είναι υψηλή, ιδιαίτερα όταν το μηχάνημα εργάζεται σε σκληρό πέτρωμα. Η σύσφιξη πάνω στη στρεφόμενη κεφαλή πρέπει να είναι πολύ καλή, γιατί σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος κρουστικών φορτίων κατά τη λειτουργία με αποτέλεσμα αυξημένες φθορές και καταστροφή του εργαλείου.



Σχήμα 18. Μηχανή ολοπέτωπης κοπής, τύπος Wohlmeyer, κατασκ. Atlas – Corco – Habegger. Μέθοδος υποκοπής του πετρώματος (δεκαετία 1690).

Πλεονεκτήματα της μηχανής Atlas – Corco – Habegger, όπως αναφέρθηκε, είναι η υποκοπή του πετρώματος σε ένα ποσοστό της τάξεως του 25 έως 30%, ενώ το υπόλοιπο θραύεται από την ώθηση του κοπτικού εργαλείου. Από τη γεωμετρική εποπτεία της κοπής φαίνεται, ότι οι κάθετα στον άξονα της σήραγγας κινούμενοι κοπτήρες σχηματίζουν στην εσωτερική επιφάνειά της μια μορφή περικοχλίου (τμήμα b και κόβεται, Σχ. 19). Το τμήμα c, που δεν κόβεται, θραύεται από την ώθηση της στρεφόμενης κεφαλής χωρίς να καταπονείται το κοπτικό εργαλείο. Δεν αντισταθμίζει όμως το σοβαρό μειονέκτημα της υψηλής φθοράς των κοπτικών εργαλείων και επομένως του υψηλού κόστους λειτουργίας.



Σχήμα 19. Γεωμετρική εποπτεία της κοπής του πετρώματος με τη μέθοδο της υποκοπής.

Η μηχανή Habegger χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή πολλών σηράγγων στη δεκαετία του 60, και στην Ελλάδα στην κατασκευή της σήραγγας Θηβών του Υδραγωγείου Μόρνου.

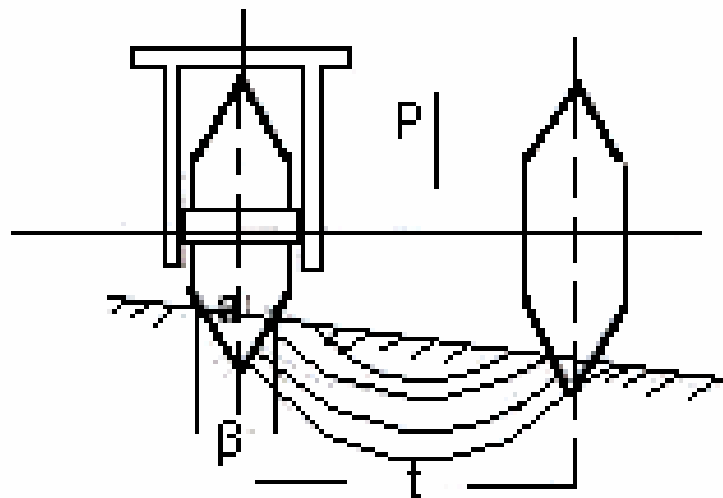
### 6.1.2 ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΜΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥΣ ΔΙΣΚΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΠΤΗΡΕΣ

Η εξέλιξη των μηχανών ολομέτωπης κοπής έκλινε προς τη μέθοδο διατρήσεως με στρεφόμενους δισκοειδείς κοπτήρες, η οποία χρησιμοποιείται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά. Κατά τη μέθοδο αυτή, η οποία εφαρμόζεται και στη τεχνική διανοίξεως σηράγγων μικρής διαμέτρου (Microtunneling), τα κοπτικά εργαλεία είναι στρεφόμενοι δισκοειδείς κοπτήρες, οι οποίοι είναι στρεφόμενοι σε διάφορες θέσεις της στρεφόμενης κοπτικής κεφαλής. Οι στρεφόμενοι κοπτήρες κόβουν το πέτρωμα παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας, κυλιόμενοι πάνω στην επιφάνεια του μετώπου. Ο στρεφόμενος κοπτήρας διαμορφώνεται ως δίσκος ή κύλινδρος. Ο δίσκος φέρει αφαιρετό κωνικό μανδύα από σκληροχάλυβα τριγωνικής διατομής με ή χωρίς προεξοχές (καρφιά κοπής). Ο κυλινδρικός μανδύας φέρει προεξοχές με καρφιά ή οδόντες.

Τα καρφιά, ή η αιχμή του δισκοειδούς κοπτήρα, διεισδύουν με την ισχυρή ώθηση του μηχανήματος μέσα στο πέτρωμα. Η διείσδυση εξαρτάται από τη φύση του πετρώματος, από τη διάμετρο του δίσκου (μέχρι 600mm), από τη γωνία του δίσκου και από την δύναμη



ωθήσεως, την οποία αναπτύσσει το μηχάνημα. Η κοπτική κεφαλή – φορέας των δισκοειδών κοπτήρων περιστρέφεται περί το γεωμετρικό άξονα του μηχανήματος. Οι δισκοειδείς κοπτήρες κυλίνουν πάνω στο μέτωπο με αποτέλεσμα, οι τάσεις, που αναπτύσσονται και είναι μεγαλύτερες από το όριο ελαστικότητας του πετρώματος, να καταστρέφουν την εσωτερική συνοχή του, προκαλώντας έτσι τον θρυμματισμό του. Τη διαδικασία εισχωρήσεως του κοπτήρα στο πέτρωμα και της θραύσεως κατά τις επιφάνειες ολισθήσεως (στη στρώση του πετρώματος) δείχνει το σχήμα 20.



Σχήμα 20. Γεωμετρική θεώρηση της εισχωρήσεως του δισκοειδούς κοπτήρα στο πέτρωμα.

$\alpha$ = γωνία κώνου κοπτήρα,  $P$ = δύναμη ωθήσεως.

Σε πολύ σκληρά εδάφη ο δισκοειδής κοπτήρας εξοπλίζεται με καρφιά από σκληροχάλυβα. Τα καρφιά υπόκεινται και αυτά σε υψηλή φθορά και συχνές θραύσεις. Ευρύτερη εφαρμογή βρίσκουν οι δισκοειδείς κοπτήρες με μανδύα κωνικής διατομής από σκληρό χάλυβα. Με τη μορφή αυτή κοπτήρα το υλικό δεν κονιοποιείται, όπως στην περίπτωση των καρφιών, αλλά κόβεται σε σχετικά μεγαλύτερα τεμάχια (ανάλογα με το πέτρωμα μέχρι 30mm), οπότε η φθορά του κοπτικού εργαλείου είναι μικρότερη. Επίσης το ενεργό μήκος κοπής του κοπτήρα είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τη σημειακή κοπή του καρφιού, επομένως η διάρκεια ζωής του εργαλείου μεγαλύτερη.

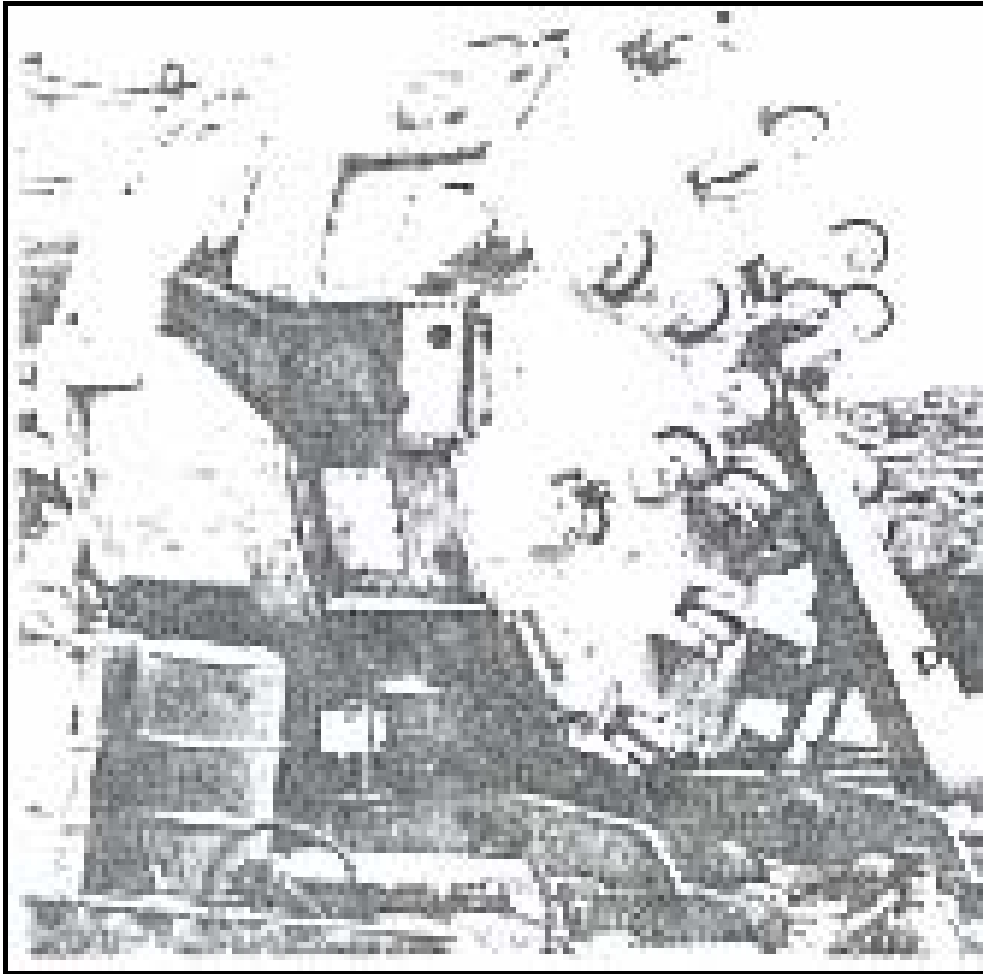
Ο δισκοειδής κοπτήρας εδράζεται πάνω σε έδρανο κυλίσεως, το οποίο στερεώνεται στο στρεφόμενο τύμπανο – φορέα με ισχυρούς κοχλίες και κυλιέται (υπό την ισχυρή πίεση του

μηχανήματος) πάνω στην επιφάνεια του μετώπου και σε συνεργασία με τον κατάλληλα τοποθετημένο γειτονικό κοπήρα, προκαλεί θραύση του πετρώματος κατά τις επιφάνειες ολισθήσεως (Σχήμα 21). Οι θέσεις των συνεργαζομένων κοπήρων, η διάμετρος και ο αριθμός τους εξαρτάται από τη φύση του πετρώματος. Το μέγεθος και η ποσότητα που υλικού εξορύσσεται εξαρτάται από τη μορφή των επιφανειών ολισθήσεως, από τη σκληρότητα του πετρώματος, από την επιβεβλημένη δύναμη ωθήσεως και από τη μορφή και τη διάταξη των κοπήρων. Ο θρυμματισμός ενός τμήματος του υλικού είναι αναπόφευκτος με αποτέλεσμα τη δημιουργία σκόνης στο μέτωπο. Για το λόγο αυτό απαιτούνται ισχυρά μηχανήματα αποκονιώσεως, που λειτουργούν με αναρρόφηση ή και με πίεση.

Αντιπροσωπευτικός τύπος μηχανήματος ολομέτωπης κοπής με δισκοειδείς κοπήρες είναι η μηχανή των εργοστασίων Robbins. Οι μηχανές των εργοστασίων Wirth, Demag και Lawrence εργάζονται με βάση την ίδια αρχή. Στη περίπτωση κατακόρυφων διατρήσεων ο κοπήρας διαμορφώνεται και ως κυλινδρικό σώμα με καρφιά από σκληροχάλυβα. Με τα καρφιά επιδιώκεται η αύξηση της διάρκειας ζωής του εργαλείου σε σκληρό πέτρωμα (σκληρότητα πάνω από 180Mpa).

### **6.1.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΡΗΣΕΩΣ ΜΕ ΔΙΣΚΟΕΙΔΕΙΣ ΚΟΠΗΤΗΡΕΣ**

Το σύστημα διατρήσεως ή εκσκαφής είναι το σημαντικότερο τμήμα του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής, αφού από αυτό εξαρτάται η λειτουργικότητα και παραγωγικότητα του μηχανήματος. Αποτελείται από την κοπτική κεφαλή με τα κοπτικά εργαλεία, την κίνηση της κοπτικής κεφαλής και το σύστημα ωθήσεως. Το πέτρωμα σκάβεται στο μέτωπο με τους δισκοειδείς κοπήρες, οι οποίες κυλίνουν σε ομόκεντρους κύκλους πάνω στην επιφάνεια του μετώπου υπό την ενέργεια της ωθητικής δυνάμεως. Η καθαρή ταχύτητα προωθήσεως του μηχανήματος εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής και από τις γεωλογικές παραμέτρους του εδάφους. (Πίνακας 5).



Σχήμα 21. Είσοδος σήραγγας Κυθαιρώνα. Κοπτική κεφαλή με κυκλιόμενους δισκοειδείς κοπτήρες. Μηχανή Robbins με διάμετρο 4,2m.

Πίνακας 5. Παράμετροι μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής.

Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανής

Γεωλογικές παράμετροι

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Στροφές κοπτικής κεφαλής        | Αντοχή πετρώματος                              |
| Δύναμη ωθήσεως κοπτικής κεφαλής | Σκληρότητα                                     |
| Ροπή στρέψεως κοπτικής κεφαλής  | Αποξεστικότητα                                 |
| Γεωμετρία κοπήρα                | Εσωτερική διαμόρφωση πετρώματος                |
| Φθορά κοπήρα                    | Σχιστότητα                                     |
| Διάμετρος κοπήρα                | Προσανατολισμός ως προς τον άξονα της σήραγγας |
| Διάταξη κοπήρων                 | Υπόστρωμα                                      |

## Μέθοδος κινήσεως κεφαλής

Η καθαρή ταχύτητα προωθήσεως είναι γραμμική συνάρτηση των στροφών της κοπτικής κεφαλής και της διεισδύσεως του κοπτήρα ανά στροφή της κοπτικής κεφαλής. Η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$p = (F / F_1)^b \quad (9)$$

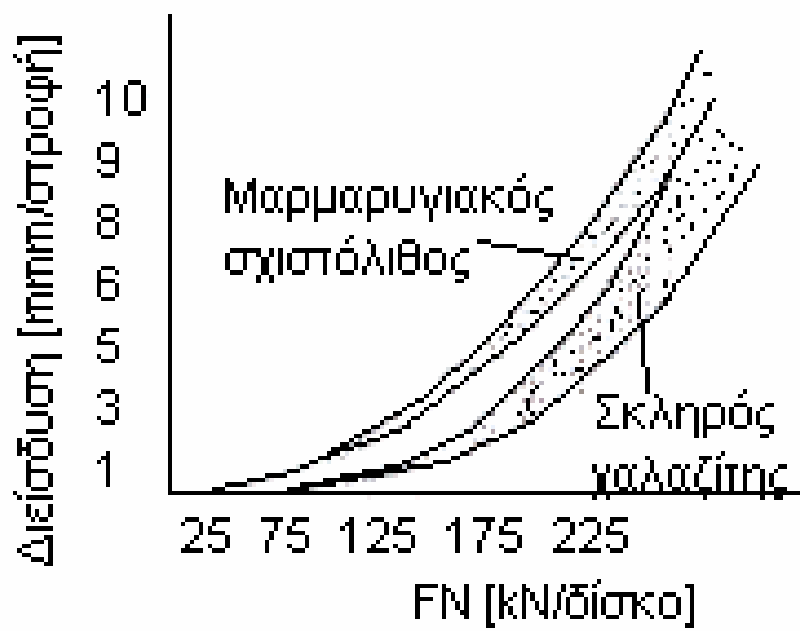
$p$  = Καθαρή διείσδυση (mm/ στροφή)

$F_1$  = Ανηγμένη ώθηση για διείσδυση 1mm (kN)

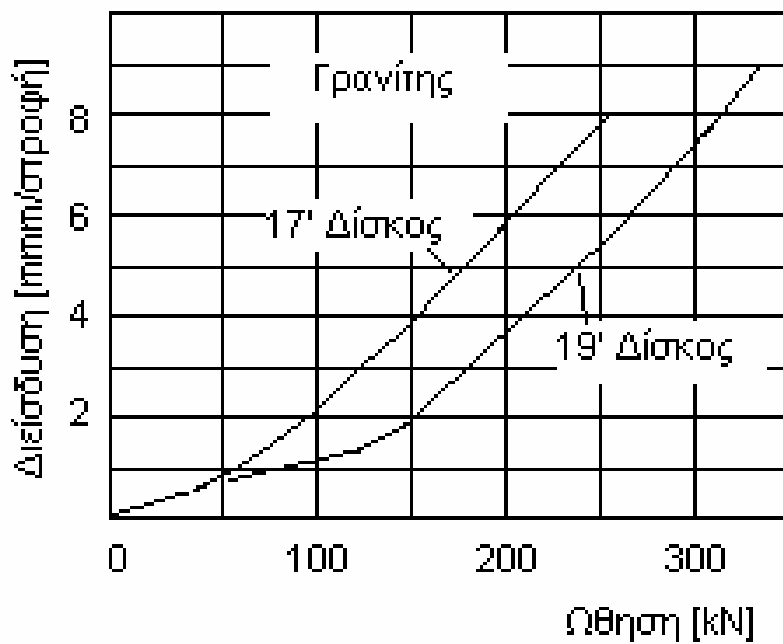
$F$  = Ώθηση (kN)

$b$  = Εκθέτης

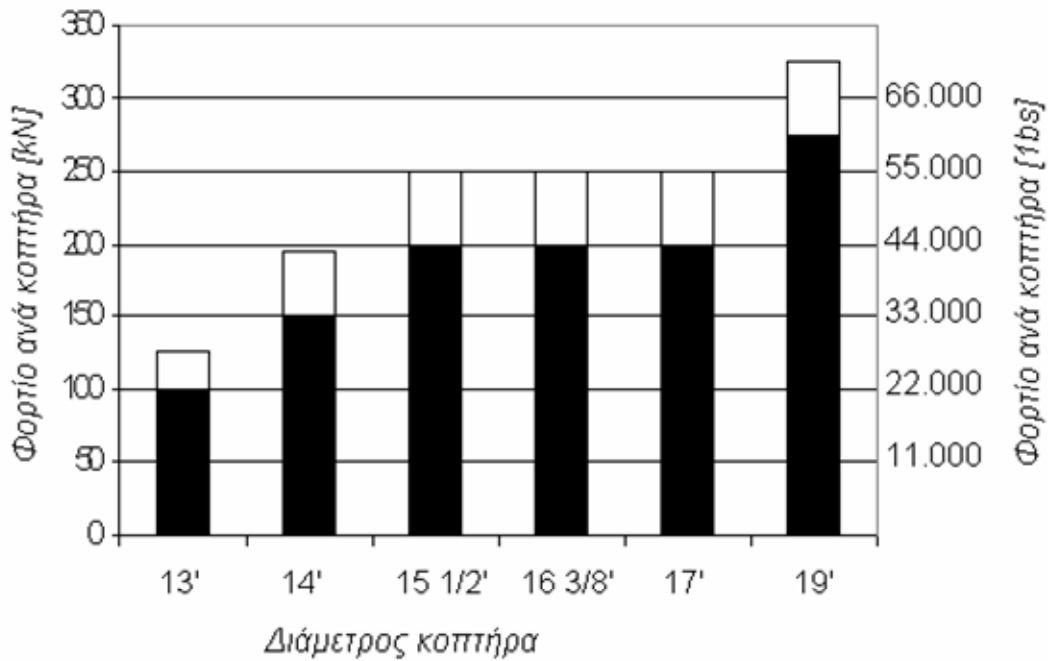
Η ώθηση  $F_1$  εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογία, τη διάμετρο του κοπτήρα και τη διάταξη των κοπτήρων. Ο εκθέτης  $b$  προσδιορίζεται από τη δύναμη ωθήσεως  $F_1$  και από την γεωλογία, κυμαίνεται μεταξύ 1,7 και 2,5 για τις περισσότερες κατηγορίες βράχων. Η επίδραση της ωθήσεως στην ταχύτητα προωθήσεως για διάφορα είδη βράχων φαίνεται στα Σχήματα 22α, 22β και 23. Είναι φανερό, ότι η φθορά του κοπτήρα και η αντίστοιχη διεύρυνση της επιφάνειας επαφής έχει σημαντική επίδραση στο βάθος διεισδύσεως και κατά συνέπεια στην ταχύτητα προωθήσεως.



Σχήμα 22α. Καθαρή διείδυση σε συνάρτηση από τη δύναμη ωθήσεως.  
(πηγή Wirth)



Σχήμα 22β. Καθαρή διείδυση σε γρανίτη κοπήρων 17'' και 19''.  
(πηγή Wirth)



Σχήμα 23. Μέγιστο φορτίο κοπήρα για διαφόρους διαμέτρους. Από μελέτη των Hermann Hanburger και Dr. Walter Weber των εργοστασίων Wirth.

Ως προς τις ιδιότητες του πετρώματος, η μονοαξονική αντοχή θλίψεως, η αντοχή σε εφελκυσμό, ο δείκτης σημειακού φορτίου, η σχιστότητα και η εσωτερική δομή του πετρώματος επηρεάζουν την ταχύτητα προώθησεως. Οι γεωλογικές αυτές παράμετροι είναι η βάση της επιλογής και διαμορφώσεως των διαφόρων τύπων μηχανών.

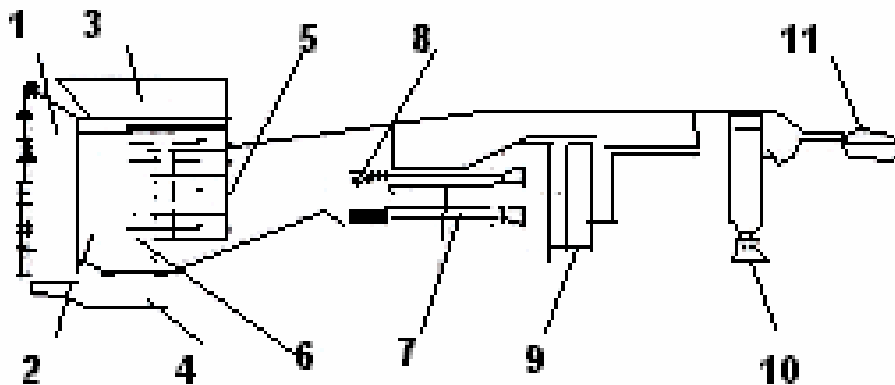
#### **6.1.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ**

Οι μηχανές της κατηγορίας αυτής είναι κατάλληλες για σκληρά πετρώματα, αντοχής μεγαλύτερης των 120Μρα. Το κύριο σώμα του μηχανήματος στηρίζεται στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας με ισχυρά υδραυλικά έμβολα και πέδιλα, τα οποία υπηρετούν ως υπομόχλια για την προώθηση της κοπτικής κεφαλής. Η προώθηση της κεφαλής γίνεται από μια ή περισσότερες σειρές τηλεσκοπικών ωθητικών κυλίνδρων.

Υπάρχουν δύο τύποι μηχανών ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου, οι οποίες διαφέρουν στη βασική διαμόρφωση τους ως προς τον αριθμό και τη διάταξη των πεδίων στηρίξεως στα τοιχώματα και ως προς το σύστημα κατευθύνσεως. Διακρίνονται μηχανές με ένα ζεύγος πεδίων (Σχήμα 24), με δύο ζεύγη σε παράλληλη διάταξη (Σχήμα 25) και με τέσσερα ζεύγη σε σταυρωτή διάταξη (Σχήμα 26).

### 6.1.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.

Η περιγραφή της λειτουργίας γίνεται με βάση τα σχέδια των σχημάτων 24, 25 και 26. Το χαρακτηριστικό της απλής μηχανής TBM ανοικτού τύπου είναι η χρησιμοποίηση ενός ζεύγους κυλίνδρων προεντάσεως προς τα τοιχώματα της σήραγγας. Όταν απαιτούνται μεγαλύτερες δυνάμεις ωθήσεως και το έδαφος αναμένεται να είναι χαμηλής αντοχής σε δυνάμεις θλίψεως, τότε χρησιμοποιούνται μηχανές με πολλαπλά πέδιλα. Κατά τη φάση της εκσκαφής η μηχανή προεντείνεται πλευρικά προς τα τοιχώματα για την απόκτηση της απαιτούμενης προσφύσεως, η οποία είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των δυνάμεων ωθήσεως της κεφαλής. Η προώθηση γίνεται με τους κυλίνδρους προωθήσεως. Όταν εξαντληθεί η διαδρομή των εμβόλων προωθήσεως της μηχανής διακόπτεται η λειτουργία, η μηχανή εδράζεται στα βοηθητικά πέδιλα, υδραυλικής λειτουργίας, και οι υδραυλικοί κύλινδροι πλευρικής στηρίξεως συμπύσσονται. Το σύστημα των υδραυλικών κυλίνδρων προωθήσεως συμπύσσεται με αναστροφή του υδραυλικού κυκλώματος των εμβόλων και το σύστημα των κυλίνδρων προεντάσεως κινείται προς την φορά του μετώπου κατά μια διαδρομή εμβόλου. Οι κύλινδροι προεντείνονται στη νέα θέση προς τα τοιχώματα, μαζεύονται τα βοηθητικά πέδιλα στηρίξεως και ο κύκλος εκσκαφής επαναλαμβάνεται για ένα μήκος διαδρομής εμβόλου.



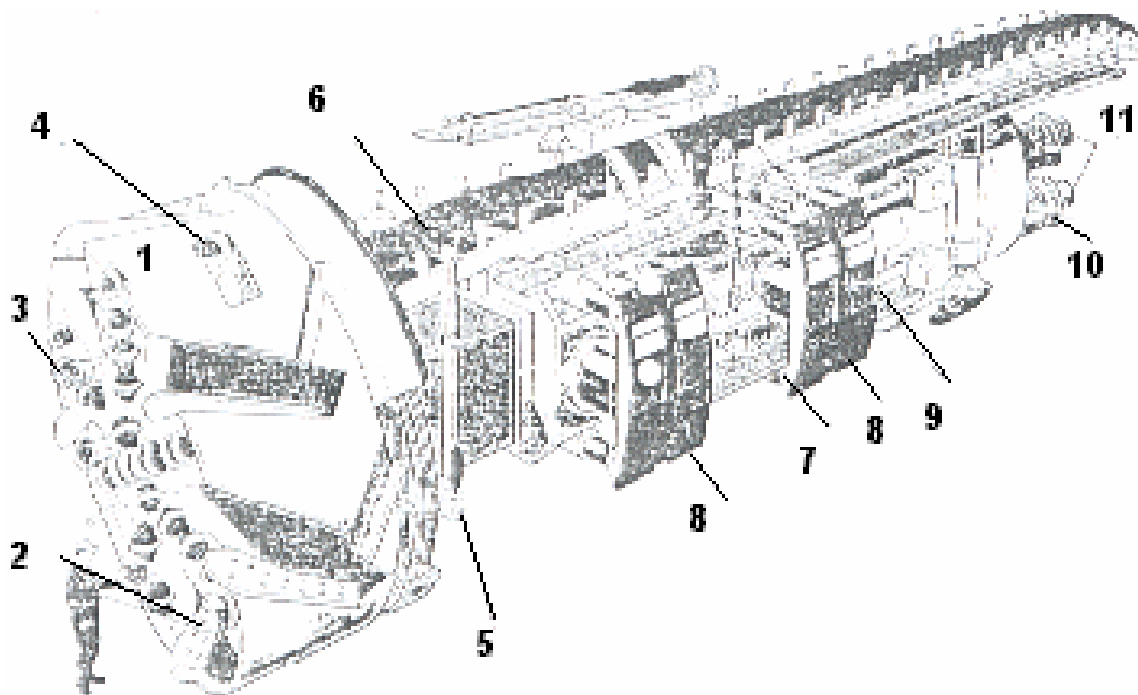
Σχήμα 24. Διαμόρφωση μηχανήματος ανοικτού τύπου, κατασκ. Robbins. Οι κινητήρες της κοπτικής κεφαλής βρίσκονται πάνω στο φορέα.

1. Κοπτική κεφαλή, 2. Φορέας κοπτικής κεφαλής με πέδιλο ολισθήσεως, και πλευρικούς οδηγούς, 3. Προστατευτική ασπίδα οροφής, 4. Βοηθητικό πέδιλο στηρίξεως, 5. Κινητήρας κεφαλής με συμπλέκτη και μειωτή στροφών, 6. Πλευρική στήριξη, 7. Κύλινδροι

προωθήσεως, 8. Κύριος φορέας μηχανήματος, 9. Πλευρικά πέδιλα, 10. Οπίσθια βοηθητική στήριξη, 11. Μεταφορικός ιμάντας.

Το σύστημα είναι απλό και δεν απαιτεί πολλούς χειρισμούς. Το μειονέκτημα είναι, ότι λόγω των υψηλών δυνάμεων στήριξεως, απαιτείται αντίστοιχα ανθεκτικό πέτρωμα. όταν παρουσιαστούν ριγμάτα ή κενά, τότε η λειτουργία του μηχανήματος είναι προβληματική. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται τοιχεία αντιστήριξεως από σκυρόδεμα.

Όταν ο βράχος είναι σαθρός, τότε το μηχάνημα εξοπλίζεται με δίδυμα πέδιλα στήριξεως – προεντάσεως σε κάθε πλευρά ή δυο σειρές πεδίων, τα οποία βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο (κατασκευές Robbins, Atlas Copco Jarva). Ένα ακόμα πλεονέκτημα των δυο σειρών πεδίων είναι η καλύτερη κατεύθυνση του μηχανήματος κατά τα διάρκεια της φάσεως προωθήσεως. Η αρχή λειτουργίας του μηχανήματος είναι η ίδια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.



Σχήμα 25. Μηχανή ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου για σκληρό πέτρωμα με δυο διπλούς κυλίνδρους προεντάσεως (Atlas Copco Jarva MK 27).

1.Κοπτική κεφαλή, 2. Ανθρωποθυρίδα επισκέψεως μετώπου, 3. Δισκοειδείς κοπτήρες, 4. Κοπτήρας εξισώσεως, 5. Διατρητικό μηχανήμα τοποθετήσεως αγκυρίων, 6. Μεταφορικός

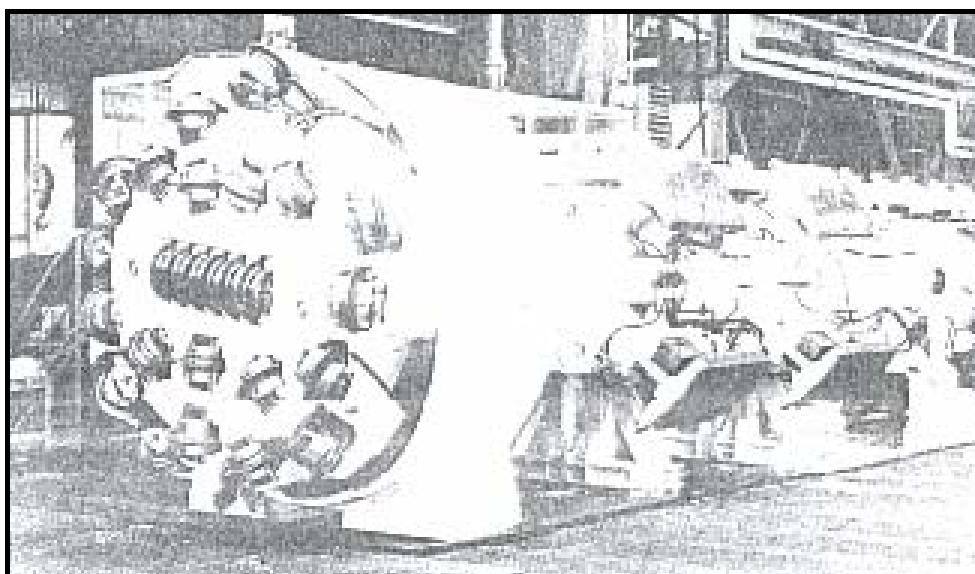


ιμάντας μηχανήματος, 7. Θέση χειριστή, 8. Τέσσερα ζεύγη πεδίων προεντάσεως, 9. Διατρητικό εργαλείο για ερευνητικές οπές προπορείας, 10. Πλανητικό σύστημα μειώσεως στροφών, 11. Κινητήρες ρυθμιζόμενου αριθμού στροφών.

### **6.1.6 ΜΗΧΑΝΗ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ WIRTH**

Τα εργοστάσια Wirth διαμορφώνουν το μηχάνημα ανοικτού τύπου με δυο σειρές πεδίων προεντάσεως τοποθετημένων σε σταυρωτή διάταξη (Σχήμα 26). Η διάταξη αυτή σε δυο επίπεδα εξασφαλίζει βελτιωμένες συνθήκες εφαρμογής των πιέσεων στα τοιχώματα της σήραγγας και έτσι είναι δυνατή η στήριξη του μηχανήματος σε βράχο μειωμένης αντοχής σε θλίψη και σε διαταραγμένες ζώνες. Επίσης εξασφαλίζει πολύ καλή και ισοσταθμισμένη στήριξη και κατεύθυνση της κοπτικής κεφαλής κατά τη διάρκεια της κοπής σχεδόν ανεξάρτητα από τις γεωλογικές μεταβολές και δεν απαιτεί διορθώσεις κατευθύνσεως κατά τη φάση της διατρήσεως. Οι διορθώσεις γίνονται μετά το πέρας του κύκλου προωθήσεως, όταν το μηχάνημα εδράζεται στα εμπρόσθια στηρίγματα.

Το μηχάνημα της Wirth, όπως και τα μηχανήματα των Robbins, Atlas – Copco, Jarva και Borotec, είναι εξοπλισμένα με βοηθητικές διατάξεις για ερευνητικές και ενισχυτικές διατρήσεις γύρω από το μέτωπο και την τοποθέτηση τόξων, αγκυρίων αντιστηρίξεως και εργαλείων εκτοξευμένου σκυροδέματος. Η εκτέλεση των εργασιών αυτών παράλληλα με την εκσκαφή, συμβάλει στην αύξηση του βαθμού εκμεταλλεύσεως του μηχανήματος.



Σχήμα 26. Διαμόρφωση μηχανήματος ανοικτού τύπου για σκληρό πέτρωμα Wirth με δυο σειρές των τεσσάρων πεδίων προεντάσεως. Οι κινητήρες της κεφαλής είναι τοποθετημένοι στην ουρά.

Κοπτική κεφαλή, 2. Φορέας κοπτικής κεφαλής, 3. Πέδιλα προεντάσεως, 4. Μεταφορικός ιμάντας, 5. Συγκρότημα μηχανών υποστηρίξεως (back up), 6. Ασπίδα κοπτικής κεφαλής.

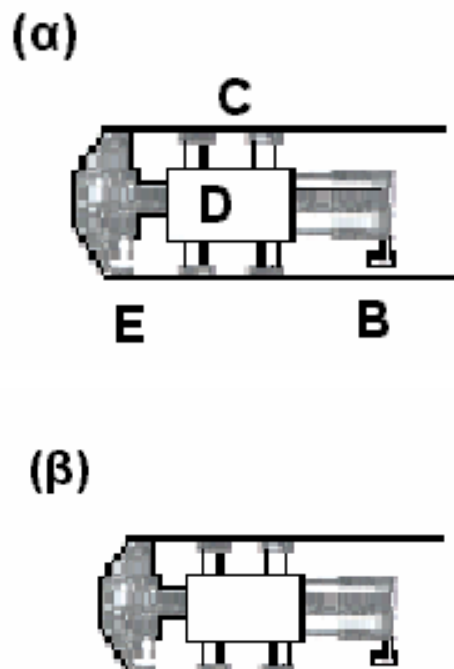
Περιγραφή κύκλου λειτουργίας (Σχήμα 27):

Έναρξη κύκλου διατρήσεως με τα πέδιλα στηρίξεως C σε προένταση. Τα πέδιλα εδράσεως B και ευθυγραμμίσεως E είναι μαζεμένα.

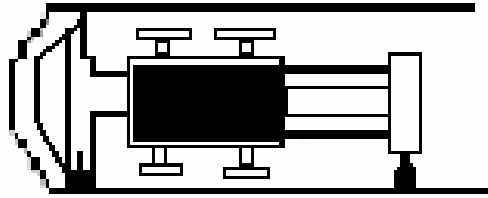
Η κοπτική κεφαλή προωθείται έως ότου εξαντληθεί η διαδρομή του εμβόλου προωθήσεως.

Η μηχανή εδράζεται στα πέδιλα εδράσεως B και ευθυγραμμίσεως E. Μαζεύονται τα πέδιλα προεντάσεως και το σώμα D κινείται προς την κεφαλή.

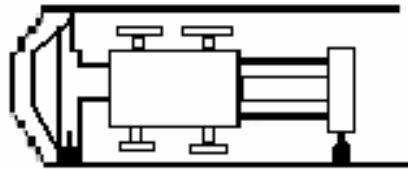
Τα πέδιλα στηρίξεως προεντείνονται προς τα τοιχώματα και μαζεύονται τα πέδιλα εδράσεως και ευθυγραμμίσεως.



(γ)



(δ)



Σχήμα 27. Κύκλος λειτουργίας μηχανήματος ανοικτού τύπου.

### **6.1.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ**

Μηχανές ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου Robbins χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Ελλάδα με επιτυχία στη διάνοιξη των σηράγγων του υδραγωγείου Μόρνου, σήραγγες Γκιάνας και Κιθαιρώνα (Σχήμα 21). Οι στροφές του τυμπάνου με τους στρεφόμενους κοπτήρες (ο αριθμός τους εξαρτάται από τις διαστάσεις της σήραγγας και από τη φύση του πετρώματος) κυμαίνονται περί τις 6 ανά πρώτο λεπτό. Η επιβεβλημένη δύναμη σε κάθε κοπήρα ήταν ανάλογη με τις εδαφολογικές συνθήκες 6-15 τόνοι. Η διαφορά ακτινών ομοκέντρων κύκλων ή η απόσταση των κοπήρων μπορούσε να μεταβληθεί μεταξύ 12 και 40cm. Γωνία  $\alpha_2=60-90^\circ$ . Φθορά κοπτικών εργαλείων (σε τιμές 1996)  $300-900\Delta\rho\chi/m^3$ . Η φθορά μπορεί να αυξηθεί στο πενταπλάσιο σε πολύ σκληρά πετρώματα μη επιδεκτικά μηχανικής διατρήσεως. Η ημερήσια προχώρηση (τρεις βάρδιες) ήταν κατά μέσο όρο 25m/ημέρα (εκτός υποχρεωτικών παύσεων εργασίας).

Χαρακτηριστική μορφή σύγχρονης μηχανής ολομέτωπης κοπής ανοικτού τύπου για σκληρό πέτρωμα είναι ο τύπος Atlas Corco – Jarva MK 27 με δυο σειρές ζευγών πεδύλων σε οριζόντια διάταξη.

Περιγραφή μηχανήματος: 1 Κυλιόμενοι δισκοειδείς κοπτήρες σε κατάλληλη διάταξη, 2 Ανθρωποθυρίδες για την κυκλοφορία μεταξύ μετώπου και εσωτερικού χώρου, 3 Κοπτική κεφαλή με δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικές διαμέτρους σήραγγας, 4 Αναπτυσσόμενος βραχίονας με κοπτικό δίσκο για την εξίσωση και διεύρυνση της διαμέτρου της σήραγγας σε περιπτώσεις σαθρών εδαφών, τα οποία απαιτούν μέτρα άμεσης προστασίας, 6 Μεταφορικός ιμάντας μηχανήματος, ο οποίος απορρίπτει το υλικό στο μεταφορικό ιμάντα του συστήματος υποστηρίξεως (back up), 7 Θέση χειριστή, 8 Πέδιλα με κυλίνδρους προεντάσεως, δύναμη προεντάσεως κάθε κυλίνδρου μέχρι 450 τόνους, 9 Υδραυλικό διατηρητικό εργαλείο για ερευνητικές διατρήσεις προπορείας, μέγιστο μήκος 50m, 10 Πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων, 11 Κινητήρες κοπτικής κεφαλής με αυτόματη προσαρμογή των στροφών στην παρουσιαζόμενη αντίσταση. Η αυτόματη ρύθμιση γίνεται με αλλαγή της συχνότητας και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε δύσκολα εδάφη και στη φύση της εκκινήσεως.

## **6.2 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΑΣΠΙΔΑ**

Τα μηχανήματα με ασπίδα χρησιμοποιούνται σε σαθρά μη αυτοφερόμενα και με μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες εδάφη, στα οποία είναι απαραίτητη η άμεση προστασία και αντιστήριξη της σήραγγας αμέσως μετά την εκσκαφή.

Διακρίνονται δυο μορφές μηχανημάτων με ασπίδα: Μηχανήματα με απλή ασπίδα και μηχανήματα με διπλή (τηλεσκοπική) ασπίδα. Η επιλογή εξαρτάται από τις εδαφολογικές συνθήκες και τη γεωμετρία της σήραγγας. Μηχανήματα με διπλή ασπίδα προσαρμόζονται καλύτερα σε εδάφη με μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες, έχουν μεγαλύτερη ευελιξία σε κίνηση πάνω σε καμπύλες, οπωσδήποτε με καμπυλότητα μικρότερη από 200 μέτρα, και έχουν τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς διακοπή για τη τοποθέτηση των δακτυλίων επενδύσεως. Ένα μεγάλο ποσοστό οδικών σηράγγων μεγάλης διατομής σε μαλακά εδάφη διατρήθηκαν τα τελευταία χρόνια με μηχανήματα ολομετωπικής κοπής με διπλή ασπίδα, με σύγχρονη τοποθέτηση των επενδυτικών στοιχείων μόνιμης προστασίας από σκυρόδεμα, σπανιότερα από μέταλλο (ΜΕΤΡΟ, ΕΟΑΕ, ΠΑΘΕ, ΕΡΓΟΣΕ).

## **6.2.1 ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ**

Οι μηχανές με απλή ασπίδα αποτελούνται κυρίως από την ασπίδα, το σημαντικότερο εργαλείο του μηχανήματος διατρήσεως, από την κοπτική κεφαλή με τη μονάδα κινήσεως, από το σύστημα ωθήσεως, από το σύστημα συναρμολογήσεως των προκατασκευασμένων στοιχείων επενδύσεως, από το συγκρότημα των κινητηρίων μονάδων, από το σύστημα φορτώσεως των μεταφορικών μέσων και από το σύστημα υποστηρίξεως (back-up system). Για τη μείωση του κινδύνου σφηνώσεως της ασπίδας, που μπορεί να οφείλεται στα υπερβολικά φορτία των υπερκειμένων στρωμάτων, και για καλύτερες συνθήκες κατευθύνσεως, πρέπει το μήκος της να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Για ασφαλέστερη λειτουργία χρησιμοποιείται το σύστημα της διπλής ασπίδας με άρθρωση, η οποία συνδέει γειτονικά τμήματα των ασπίδων (Σχήμα 29).

Η εκσκαφή και επένδυση (αντιστήριξη) της σήραγγας γίνονται μέσα στην προστατευόμενη από την ασπίδα περιοχή. Η αντιστήριξη εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων δακτυλίων (segments, Tübbing) από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι δακτύλιοι μπορούν να σχεδιαστούν έτσι, ώστε να αποτελέσουν την τελική επένδυση της σήραγγας ή να θεωρηθούν ως πρωτογενής αντιστήριξη και στη συνέχεια να διαστρωθεί σκυρόδεμα για την τελική ασφάλιση ή και στεγάνωση. Σε σύγκριση με τα μηχανήματα ανοικτού τύπου, η προώθηση των μηχανών με ασπίδα περιορίζεται από την ταχύτητα τοποθετήσεως των δακτυλίων αντιστήριξεως.

Η διάνοιξη σηράγγων μεγάλης διατομής με ασπίδα σε εδάφη με σαθρό βράχο (περίπτωση ΜΕΤΡΟ Αθήνας) μπορεί να οδηγήσει σε παγίδευση της ασπίδας. Σε σήραγγες μεσαίου μεγέθους το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με μια πρόσθετη υπερεσκαφή ή με ασπίδα μορφής λεπίδας με ρυθμιζόμενη διάμετρο, η οποία αποτελείται από χωριστά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά ανθίστανται στη σύγκλιση του βράχου με μια ελεγχόμενη δύναμη. Δεν είναι ακόμη γνωστό μέχρι ποια διάμετρο μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή με ασφάλεια.

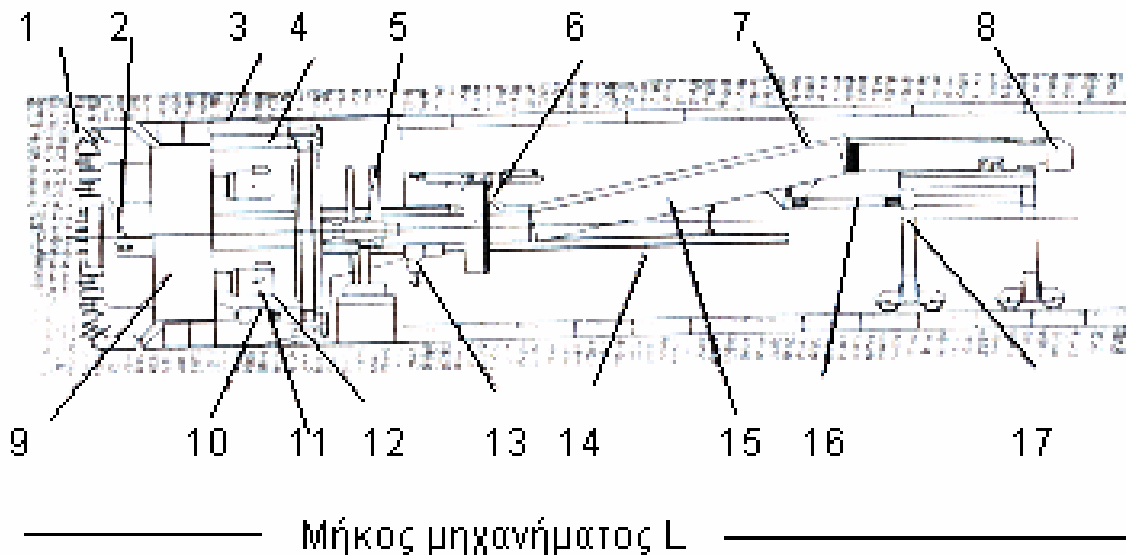
Για την αντιστήριξη του βράχου οι κενοί χώροι πίσω από τους προκατασκευασμένους σπονδυλωτούς δακτυλίους γεμίζουν με ειδικό τσιμεντένεμα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια ολοκληρωμένη αντιστήριξη και στεγάνωση σε όλη την περιφέρεια του δακτυλίου. Άλλη μέθοδος είναι η προένταση των δακτυλίων προς το συγκλίνον πέτρωμα. Ως υλικό πληρώσεως

του χώρου μεταξύ ράχης δακτυλίου και εδάφους χρησιμοποιούνται διάφορα είδη κονίας με βάση το τσιμέντο ή ακόμα με μπεντονίτη, εποξικές ρητίνες ή και συνθετικά υλικά. Πρέπει να δίνεται προσοχή στη στεγάνωση. Κρίσιμα σημεία στους σποδυλωτούς δακτυλίου είναι όλοι οι αρμοί και ιδιαίτερα οι γωνίες. Για το λόγο αυτό οι δακτύλιοι φέρουν περιμετρικά λάστιχο στεγανώσεως.

Είναι απαραίτητο ο προμηθευτής της μηχανής TBM να γνωρίζει τις παραμέτρους των μικρομετακινήσεων, την αναμενόμενη αντίδραση του διαταραγμένου εδάφους και το μέγεθος της αλλαγής της διατομής. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για την τελική σχεδίαση του μηχανήματος.

Οι φάσεις λειτουργίας του μηχανήματος ανά κύκλο είναι (Σχ. 28):

Εκσκαφή και σκυροδέτηση πλάτης δακτυλίων. Με τη περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, η οποία εδράζεται μέσα στην εμπρόσθια ασπίδα, κόβεται το υλικό, το οποίο καταπίπτει στον πυθμένα. Η εξωτερική διάμετρος της ασπίδας είναι λίγο μικρότερη από τη διάμετρο εκσκαφής της κεφαλής, για να επιτρέπει διορθώσεις κατευθύνσεως και να αποτρέπει παγίδευση της κεφαλής. Στον πυθμένα η ασπίδα εδράζεται με το βάρος της πάνω στο δακτύλιο επενδύσεως. Η απαραίτητη για τη διείσδυση ώθηση αναπτύσσεται από τους ωθητικούς κυλίνδρους, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι περιφερειακά μέσα στην ασπίδα και στηρίζονται, ως υπομόχλιο, στον τελευταίο (προς το μέτωπο) δακτύλιο. Συνήθως, για τη προστασία του σκυροδέματος των δακτυλίων, μεταξύ δακτυλίου και εμβόλων ωθήσεως παρεμβάλλεται ένας μεταλλικός δακτύλιος. Τα υλικά εκσκαφής απορρίπτονται από τους κάδους της κοπτικής κεφαλής σε ένα μεταφορικό ιμάντα, ο οποίος τα μεταφέρει και τα φορτώνει στα μεταφορικά μηχανήματα (ελαστικοφόρα οχήματα, σιδηροδρομικά βαγόνια ή σπανιότερα μεταφορικοί ελαστικοί ιμάντες).



Σχήμα 28. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με απλή ασπίδα. Σχέδιο Robbins.

1. Κεφαλή κοπής, 2 Οχετός υλικών εκσκαφής, 3 Ασπίδα, 4 Κύλινδροι ωθήσεως, 5 Μηχανή τοποθετήσεως δακτυλίων, 6 Ερευνητικές διατρήσεις προπορείας, 7 Μεταφορέας μηχανήματος, 8 Μεταφορέας συστήματος υποστηρίξεως, 9 Αρθρωτό σύστημα στηρίξεως κεφαλής, 10 Κύλινδρος αρθρωτής κινήσεως, 11 Κινητήρες κεφαλής, 12 Σωλήνας δοκιμίου, 13 Ανυψωτική διάταξη, 14 Δοκός ανυψωτικής διάταξεως, 17 Οχετός αέρα, 16 Κύλινδρος έλξεως συστήματος υποστηρίξεως, 17 Σύστημα υποστηρίξεως, back-up.

Κατά τη διάρκεια της φάσεως εκσκαφής η ασπίδα προωθείται κατά ένα βήμα προωθήσεως ίσο με το πλάτος του σπονδυλωτού δακτυλίου. Η ουρά της ασπίδας, η οποία είναι ενωμένη με την κυρία ασπίδα, ελευθερώνει κατά την προώθηση τον χώρο μεταξύ των τοποθετημένων δακτυλίων και του πετρώματος. Ο χώρος αυτός γεμίζει με το υλικό πληρώσεως.

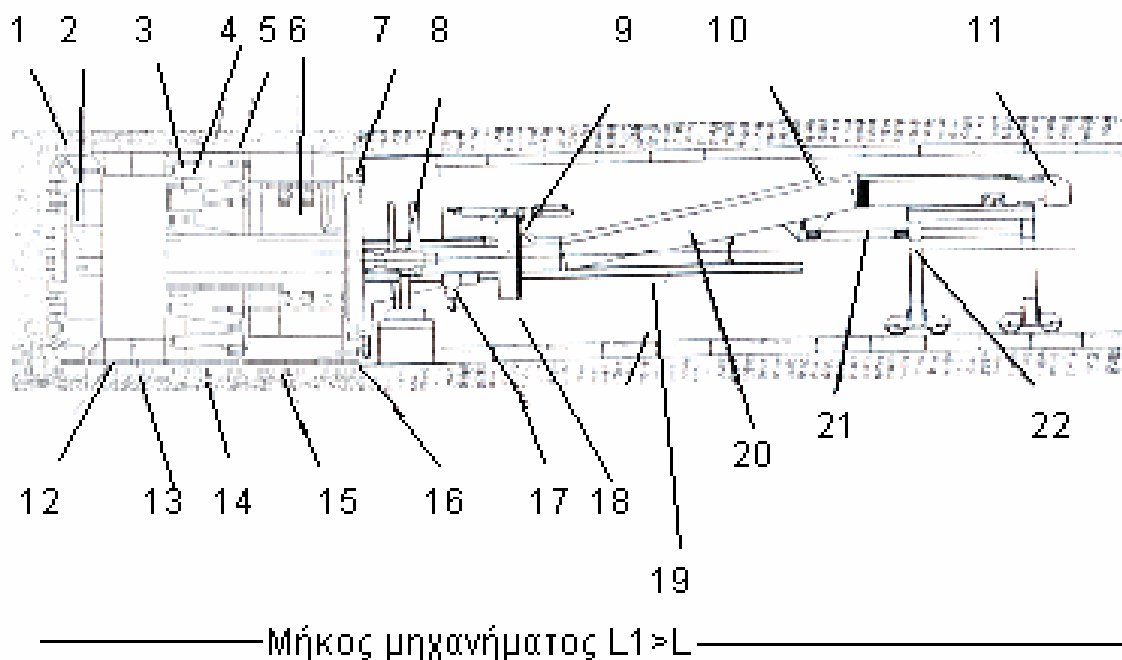
Όταν εξαντληθεί η διαδρομή των εμβόλων ωθήσεως, συμπύσσονται τα έμβολα μαζί με το μεταλλικό προστατευτικό δακτύλιο και ελευθερώνεται ο χώρος για την τοποθέτηση νέας σειράς δακτυλίων. Ο μεταλλικός δακτύλιος είναι εξάρτημα του μηχανήματος και τοποθετείται μεταξύ δακτυλίων σκυροδέματος και εμβόλου ωθήσεως.

Τοποθέτηση δακτυλίων επενδύσεως. Με την προστασία του οπισθίου τμήματος της ασπίδας τοποθετούνται τα στοιχεία του νέου δακτυλίου. Η τοποθέτηση γίνεται με τη βοηθητική διάταξη Erector, η οποία είναι εξάρτημα του συστήματος υποστηρίξεως του μηχανήματος. Ο

μεταλλικός δακτύλιος πιέζεται πάνω στο νέο δακτύλιο επενδύσεως και επαναλαμβάνεται ο νέος κύκλος εκσκαφής.

### 6.2.2 ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΑΣΠΙΔΑΣ

Μια εναλλακτική μορφή της μηχανής ολομέτωπης κοπής με απλή ασπίδα είναι η μηχανή με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα (Σχ. 29)



Σχήμα 29. Μηχάνημα ολομέτωπης κοπής με διπλή τηλεσκοπική ασπίδα.

Κεφαλή κοπής, 2 Οχετός υλικών εκσκαφής, 3 Κινητήρια μονάδα, 4 Κύλινδροι ωθήσεως κεφαλής, 5 Αρθρωτοί κύλινδροι, 6 Ερευνητικές διατρήσεις προπορείας, 7 Σωλήνας δοκιμίου, 8 Ασπίδα ουράς, 9 Διατρητικό μηχανήμα δοκιμίων, 10 Μεταφορέας μηχανήματος, 11 Μεταφορέας συστήματος υποστηρίξεως, 12 Εμπρόσθια ασπίδα, 13 Στήριξη κεφαλής, 14 Τηλεσκοπική ασπίδα, 15 Ασπίδα στηρίξεως στα τοιχώματα, 16 Βοηθητικό πέδιλο ωθήσεως, 17 Μηχανή τοποθετήσεως δακτυλίων, 18 Ανυψωτικό μηχανήμα, 19 Δοκός ανυψωτικής διατάξεως, 20 Οχετός αέρα, 21 Κύλινδρος έλξεως συστήματος υποστηρίξεως, 22 Σύστημα υποστηρίξεως, back- up.



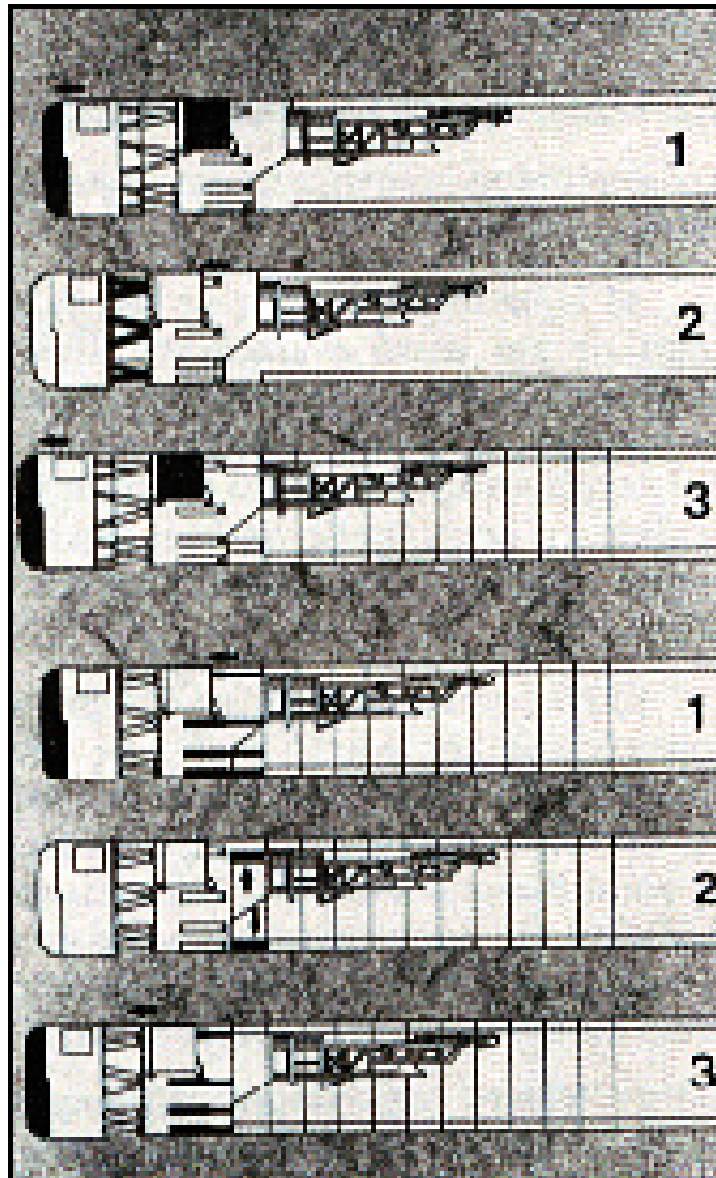
Το σύστημα της διπλής ασπίδας έχει τη δυνατότητα της προωθήσεως της κεφαλής με σύγχρονη τοποθέτηση των σπονδυλωτών δακτυλίων, όταν το επιτρέπουν οι εδαφολογικές συνθήκες. Για την περίπτωση αυτή το μηχάνημα φέρει πλευρικά πέλδρα στηρίξεως στα τοιχώματα της σήραγγας, όπως οι μηχανές ανοικτού τύπου. Είναι κατάλληλο για μη αυτοφερόμενα χαλαρά εδάφη με μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες μέχρι και εδάφη χαμηλής σκληρότητας. Το μήκος του μηχανήματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τη μηχανή απλής ασπίδας.

Η μηχανή αποτελείται από την εμπρόσθια ασπίδα με την κοπτική κεφαλή, το κύριο έδρανο και τη μονάδα κινήσεως και από την ασπίδα ουράς για την τοποθέτηση των δακτυλίων επενδύσεως. Η εμπρόσθια ασπίδα και η κύρια ασπίδα συνδέονται μεταξύ τους με το τηλεσκοπούμενο τμήμα και τους υδραυλικούς κυλίνδρους τηλεσκοπήσεως (προωθήσεως κεφαλής). Τα πλευρικά πέλδρα στηρίξεως είναι μια νέα εξέλιξη για να μπορεί το μηχάνημα να στηρίζεται στα τοιχώματα της σήραγγας, αν το επιτρέπει η αντοχή του εδάφους, και να συνεχίζει την εκσκαφή, ενώ παράλληλα τοποθετούνται οι προστατευτικοί δακτύλιοι. Η ανάπτυξη των πέλδρων στηρίξεως γίνεται μέσα από δυο παράθυρα, τα οποία είναι ανοιγμένα στην ασπίδα. Η μηχανή Robbins της εικόνας 30α έχει δυο σειρές πλευρικών πέλδρων στηρίξεως. Όταν η μια σειρά πέλδρων είναι ενεργοποιημένη, με προένταση στα τοιχώματά της σήραγγας για τη προώθηση της κεφαλής, η δεύτερη σειρά βρίσκεται στη διαδικασία της επόμενης στηρίξεως. Αυτή η αλληλουχία φάσεων επαναλαμβάνεται συνεχώς. Κάθε σειρά πέλδρων είναι στερεωμένη σε χωριστές ασπίδες, στη μεσαία ασπίδα (δεύτερη) και στην οπίσθια ασπίδα (τρίτη). Ο ακριβής συγχρονισμός των δυο σειρών πέλδρων- ασπίδων στηρίξεως ρυθμίζεται από μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω στο μηχάνημα.



Σχήμα 30α. Μηχάνημα Robbins διπλής τηλεσκοπικής ασπίδας με δυο σειρές πεδίων στηρίξεως για συνεχή λειτουργία.

Στην περίπτωση κατά την οποία οι γεωλογικές συνθήκες δεν απαιτούν αντιστήριξη, τότε η εμπρόσθια ασπίδα με την κοπτική κεφαλή προωθείται με την ενέργεια των κυλίνδρων ωθήσεως ενώ η κύρια ασπίδα στηρίζεται στα τοιχώματα της σήραγγας με την ενέργεια των πεδίων στηρίξεως, όπως στη περίπτωση των μηχανημάτων ανοικτού τύπου. Αν η δύναμη στηρίξεως προς τα τοιχώματα δεν είναι ικανή να προωθήσει την κοπτική κεφαλή, που οφείλεται σε χαμηλή αντοχή του εδάφους, τότε η μηχανή λειτουργεί ως κοινή μηχανή με απλή ασπίδα, δηλαδή η προχώρηση πρέπει να διακόπτεται για να τοποθετηθούν οι δακτύλιοι. Ο κύκλος λειτουργίας περιγράφεται στην εικόνα 30β.



Σχήμα 30β. Λειτουργία μηχανήματος ολομέτωπης κοπής διπλής ασπίδας.

Έδαφος με σχετική αντοχή για την παραλαβή φορτίων.

Τα πέδιλα στηρίξεως στην οπίσθια ασπίδα εκτονώνονται προς το τοίχωμα της σήραγγας για την παραλαβή των δυνάμεων ωθήσεως και στρεπτικής ροπής της κοπτικής κεφαλής, που βρίσκεται στη φάση διατρήσεως και της εμπρόσθιας ασπίδας.

Με τα πέδιλα στηρίξεως μαζεμένα, υποχωρούν οι κύλινδροι ωθήσεως και έλκουν την οπίσθια ασπίδα προς τα εμπρός.

Ο κύκλος διατρήσεως επαναλαμβάνεται. Η τοποθέτηση δακτυλίων επενδύσεως, αν απαιτείται, μπορεί να γίνει παράλληλα με την προώθηση της κεφαλής.

### Έδαφος σταθερό χωρίς δυνατότητα παραλαβής φορτίων.

Οι βοηθητικοί κύλινδροι ωθήσεως στηρίζονται στην επένδυση της σήραγγας και προωθούν την κοπτική κεφαλή.

Οι βοηθητικοί κύλινδροι ωθήσεως υποχωρούν για να τοποθετηθούν οι δακτύλιοι επενδύσεως. Ο κύκλος διατρήσεως επαναλαμβάνεται.

Ο κίνδυνος της παγίδευσης των μηχανημάτων διπλής ασπίδας είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τα μηχανήματα απλής ασπίδας. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο μήκος του συστήματος της διπλής ασπίδας. Στην περίπτωση σαθρών εδαφών ή και καμπυλών με σχετικά μικρή ακτίνα καμπυλότητας, τοποθετείται μια άρθρωση μεταξύ της κύριας ασπίδας και του τηλεσκοπούμενου τμήματος, η οποία δίνει τη δυνατότητα μικρών συγκλίσεων κατά το διαμήκη άξονα (μηχανές διπλής ασπίδας με άρθρωση). Με τη διάταξη αυτή η κίνηση του μηχανήματος μοιάζει με τον ερπυσμό ερπετού.

Για την προστασία του προσωπικού, ιδιαίτερα με διπλή ασπίδα σε σαθρά εδάφη, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των κοπτικών από την εσωτερική πλευρά της μηχανής.

Οι μεγαλύτερες τηλεσκοπούμενες μηχανές με διπλή ασπίδα και άρθρωση, που κατασκευάστηκαν μέχρι σήμερα, εργάζονται στη διάνοιξη των σηράγγων του Ολυμπιακού Μετρό Αθηνών, δύο μηχανές, διάμετρος 9,5m, και στη σήραγγα της Μάγλης, συνολικά οκτώ μηχανές με διάμετρο 8,36 έως 8,72 m.

### **6.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΣΕΩΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΚΕΦΑΛΩΝ**

Τα κυριότερα συστήματα κινήσεως των κοπτικών κεφαλών για σκληρό έδαφος είναι:

Ηλεκτρονική κίνηση με μια ή δυο βαθμίδες στροφών της κοπτικής κεφαλής και κοινό συμπλέκτη. Είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο σύστημα κινήσεως μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής με καλά αποτελέσματα σε ομοιόμορφο βράχο. Εργάζεται στις δυο ταχύτητες ανάλογα με τη μορφή του πετρώματος. Υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να παγιδευτεί η κεφαλή στην περίπτωση εκκινήσεως σε δύσκολα πετρώματα, λόγω της χαμηλής αιχμής ροπής στρέψεως για μικρό χρονικό διάστημα, που μπορεί να δώσει ο συμπλέκτης.

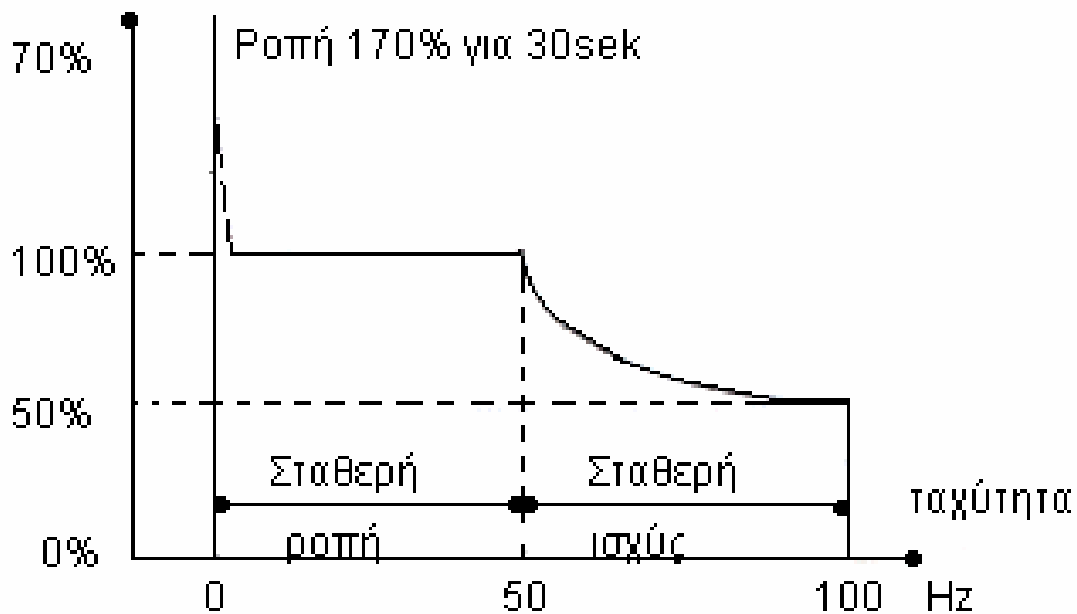
Ηλεκτρική κίνηση με δυο βαθμίδες στροφών και υδραυλική μονάδα παροχής υψηλής ροπής στρέψεως κατά την εκκίνηση. Το σύστημα αυτό συνδυάζει την απλή λειτουργία της κανονικής κινήσεως με δύο ταχύτητες και την παροχή υψηλής ροπής στρέψεως κατά τις φάσεις εκκινήσεων. Κατά τη φάση διατήσεως η μηχανή λειτουργεί ως απλή μηχανή δυο ταχυτήτων, ενώ κατά τις φάσεις των εκκινήσεων οι υδραυλικοί κινητήρες δίνουν στο σύστημα υψηλές τιμές ροπής στρέψεως για απεριόριστο χρονικό διάστημα, αποκλεισμένου έτσι του κινδύνου παγιδεύσεως της κεφαλής.

Υδραυλική κίνηση. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση μεγάλων μηχανών με ασπίδα και σε δύσκολο έδαφος. Έχει το πλεονέκτημα της συνεχούς προσαρμογής των στροφών της κεφαλής στην παρουσιαζόμενη αντίσταση, όπως στην περίπτωση των υδροστατικών συστημάτων των εκσκαφών υδραυλικής λειτουργίας. Η ροπή εκκινήσεως για χαμηλό αριθμό στροφών, που πλησιάζει το μηδέν, είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να παρέχεται για απεριόριστο χρόνο.

Αυτόματη ρύθμιση στροφών με μετατροπή της συχνότητας της ηλεκτρικής ενέργειας, με την οποία τροφοδοτούνται οι κινητήρες (Σχ. 31). Το σύστημα αυτό είναι εξέλιξη των εργοστασίων Atlas Copco και Asea Brown Boveri. Η περιοχή ρυθμίσεων των στροφών αποτελείται από δυο τμήματα, στο πρώτο τμήμα οι κινητήρες δίνουν την πλήρη ισχύ μέχρι την ονομαστική ταχύτητα στα 50 Hz, στο δεύτερο τμήμα η συχνότητα μεταβάλλεται μέχρι 100 Hz. Στην περιοχή αυτή η καμπύλη λειτουργίας ακολουθεί την υπερβολή  $k \cdot M_f \cdot n = N$ . Για τη μεταβολή της συχνότητας τοποθετούνται πριν από τους κινητήρες μετατροπείς συχνότητας (frequency converters). Κατά τη φάση εκκινήσεως το σύστημα δίνει αυξημένη ροπή στρέψεως μέχρι 70% της ονομαστικής για 30 δευτερόλεπτα, με 30% αύξηση της καταναλώσεως ενέργειας.

Τα συστήματα ενέργειας με αυτόματη προσαρμογή στροφών και ροπής στρέψεως έχουν το βασικό πλεονέκτημα, ότι η λειτουργία του μηχανήματος, ιδιαίτερα σε δύσκολα εδάφη, δεν εξαρτάται από το χειριστή, με αποτέλεσμα να είναι ασφαλέστερη, να αποφεύγονται οι κίνδυνοι παγιδεύσεως της κεφαλής στις εκκινήσεις και στις περιπτώσεις καταπτώσεως βράχων στο μέτωπο (αυξημένη ζήτηση ροπής στρέψεως) και να βελτιώνεται ο συντελεστής εκμεταλλεύσεως.

## Ροπή στρέψεως

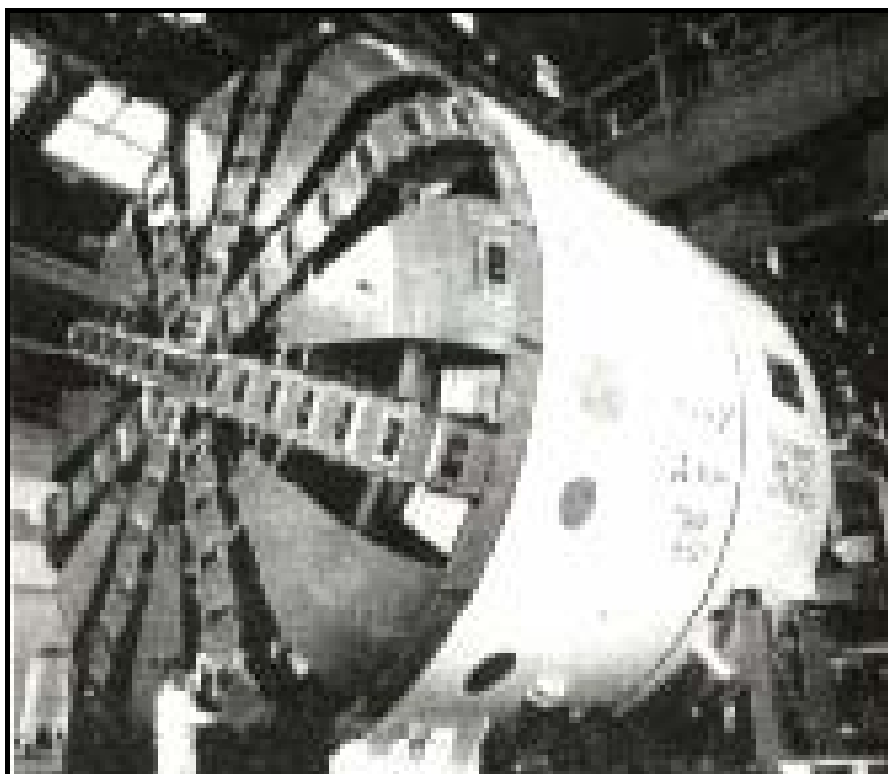


Σχήμα 31. Αυτόματο σύστημα κινήσεως κεφαλής κοπής με μεταβολή της συχνότητας.

### 6.2.4 ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ΑΘΗΝΑΪΚΟΥ ΜΕΤΡΟ

Η διάνοιξη των σηράγγων των γραμμών του Αθηναϊκού Μετρό έγινε με δυο όμοια μηχανήματα ολομέτωπης κοπής με διπλή αρθρωτή ασπίδα. Τα μηχανήματα σχεδιάστηκαν από την MHI (Mitsubishi Heavy Industries) της Ιαπωνίας και κατασκευάστηκαν από την NFM (Neyric Framatone Mecanique) της Γαλλίας.

Το πρώτο μηχάνημα άρχισε την εκσκαφή από τη θέση του σταθμού Λάρισας με κατεύθυνση προς την οδό Δεληγιάννη (γραμμή 2) και το δεύτερο από τη θέση Κατεχάκη με κατεύθυνση προς την οδό Πανορμου (γραμμή 3). Το συνολικό μήκος εκσκαφής είναι 5900m για τη γραμμή 2 και 5800m για τη γραμμή 3 (Σχήμα 32α). το βάθος εκσκαφής κυμαίνεται μεταξύ 6 και 28 μέτρα, κάτω από το υψόμετρο αρχαιοτήτων και των δικτύων κοινής ωφελείας.



Σχήμα 32α. Η μηχανή ολομέτωπης κοπής διπλής αρθρωτής ασπίδας για τη διάνοιξη των σηράγγων του Αθηναϊκού Μετρό.

Τα γενικά τεχνικά στοιχεία των μηχανημάτων είναι:

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| Συνολικό μήκος περίπου              | 149m          |
| Συνολικό βάρος κενό                 | 1650 τόνοι    |
| Συνολική εγκατεστημένη ισχύς        | KVA           |
| Κεφαλή κοπής, εξωτερική διάμετρος   | 9,456m        |
| Ταχύτητα περιστροφής                | 0-4 στρ/λ     |
| Διάμετρος δισκοειδών κοπτήρων       | 17''(431,8)mm |
| Βάρος διπλής αρθρωτής ασπίδας       | 880 τόνοι     |
| Μέγιστη διαδρομή κυλίνδρων ωθήσεως  | 2.300mm       |
| Πίεση λειτουργίας κυλίνδρων ωθήσεως | 260 bar       |
| Διάμετρος κυλίνδρων ωθήσεως         | 320mm         |
| Αριθμός κυλίνδρων ωθήσεως           | 28            |
| Συνολική δύναμη ωθήσεως             | 5.600 τόνοι   |
| Αναμενόμενη ταχύτητα εκσκαφής       | 8 cm/min      |

Για 16 ώρες ανά ημέρα  
Διάμετρος έτοιμης σήραγγας

10m/ ημέρα  
8,5m

Η εμπρόσθια ασπίδα του μηχανήματος φέρει 6 ακτινωτούς υδραυλικούς κυλίνδρους με πέδιλα διαμέτρου 250mm, 350 bar, με διαδρομή 150mm. Τα ακτινωτά πέδιλα χρησιμεύουν για να στηρίζεται το μηχάνημα στα πλευρικά της σήραγγας και να αποφεύγεται η περιστροφή του γύρω από τον άξονά της σήραγγας κατά την εκσκαφή σκληρού εδάφους.

Το μηχάνημα αποτελείται από την κοπτική κεφαλή με τους δισκοειδείς κοπτήρες και απολήπτες, η οποία λειτουργεί πάνω σε μια χαλύβδινη προστατευτική ασπίδα βαρέως τύπου, και περιστρέφεται πάνω στο μέτωπο της σήραγγας. Τα προϊόντα εκσκαφής οδηγούνται από τη θέση της κεφαλής με ενδιάμεσο ταινιόδρομο στα οχήματα του μεταφορικού συρμού, τα οποία βρίσκονται στην περιοχή του συστήματος υποστηρίξεως (back-up). Το σύστημα υποστηρίξεως αποτελείται από 8 βαριά μεταλλικά πλαίσια, τα οποία συγκροτούν το κυλιόμενο τμήμα. Το σύστημα, το οποίο έλκεται από το διατηρητικό μηχάνημα, είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του (μεταφορά και τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων, μεταφορά και πλήρωση με κονία των χώρων μεταξύ δακτυλίων και εδάφους, τοποθέτηση αγκυρίων και δομικού πλέγματος, φόρτωση των υλικών εκσκαφής στα μηχανήματα μεταφοράς, εκτόξευση σκυροδέματος).

Ο μεταφορικός συρμός κινείται πάνω σε σιδηροτροχιές σε όλο το μήκος της σήραγγας. Κατά την κίνηση από το μέτωπο προς την έξοδο μεταφέρει τα προϊόντα εκσκαφής, ενώ κατά την επιστροφή προς το μέτωπο μεταφέρει τα προκατασκευασμένα τεμάχια των σπονδυλωτών δακτυλίων και άλλα υλικά, τα οποία ενσωματώνονται στη σήραγγα. Τα στοιχεία μεταφέρονται με κυλιόμενη διάταξη από τα οχήματα του συρμού στη θέση, που βρίσκεται το μηχάνημα τοποθετήσεως (erector). Κάθε σπονδυλωτός δακτύλιος αποτελείται από 8 στοιχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με γαλβανισμένους κοχλίες. Το ένα από τα 8 στοιχεία έχει μικρό μήκος χορδής και χρησιμεύει ως κλειδί (σφήνα). Οι διαστάσεις των δακτυλίων είναι: Εξωτερική διάμετρος 9180mm, εσωτερική διάμετρος 8480mm και πάχος 350mm. Το πλάτος τους είναι 1,5m και το βάρος 5,8 τόνοι. Για την εξασφάλιση καλύτερης συναρμογής μεταξύ των στοιχείων των δακτυλίων αλλά και για τη στεγανοποίηση στις θέσεις των αρμών τοποθετούνται ειδικά ελαστικά παρεμβύσματα (Σχ. 32β).



Η στήριξη των κυλίνδρων ωθήσεως στον τελευταίο δακτύλιο γίνεται με την παρεμβολή μεταλλικού δακτυλίου για την κατανομή των τάσεων και την προστασία του δακτυλίου επενδύσεως. Συνολικά οι δυο γραμμές θα απαιτήσουν περισσότερα από 70.000 προκατασκευασμένα στοιχεία επενδύσεως, τα οποία παράγονται σε εργοστάσιο προκατασκευής (Σχ. 32γ και 32δ). Ο συνολικός όγκος σκυροδέματος 250.000m<sup>3</sup> και ο σιδήρους οπλισμός 40.000 τόνοι.

Το κέντρο ελέγχου βρίσκεται πάνω στο back up του μηχανήματος. Η θέση της εμπρόσθιας και οπίσθιας ασπίδας προσδιορίζεται ακριβώς και καταγράφεται ως προς την προπορεία, την προεξοχή και την κύλιση. Οι τρεις απαραίτητες για τον έλεγχο του μηχανήματος μετρήσεις του συστήματος είναι οι εξής:

Προπορεία (Lead). Είναι ο οριζόντια γωνία του μετώπου της ασπίδας, που μετράται ως η απόσταση, κατά την οποία η μια πλευρά της ασπίδας προπορεύεται της άλλης, σε σχέση με σημεία, που έχουν καθοριστεί κατά μήκος της σήραγγας.

Προεξοχή (look up ή over hand). Είναι η κατακόρυφη γωνία του μετώπου της ασπίδας, που μετράται ως η απόσταση, κατά την οποία ο πυθμένας προπορεύεται ή καθυστερεί σε σχέση με τη στέψη.

Κύλιση (Roll). Είναι η περιστροφή της ασπίδας γύρω από τον άξονα της σήραγγας.

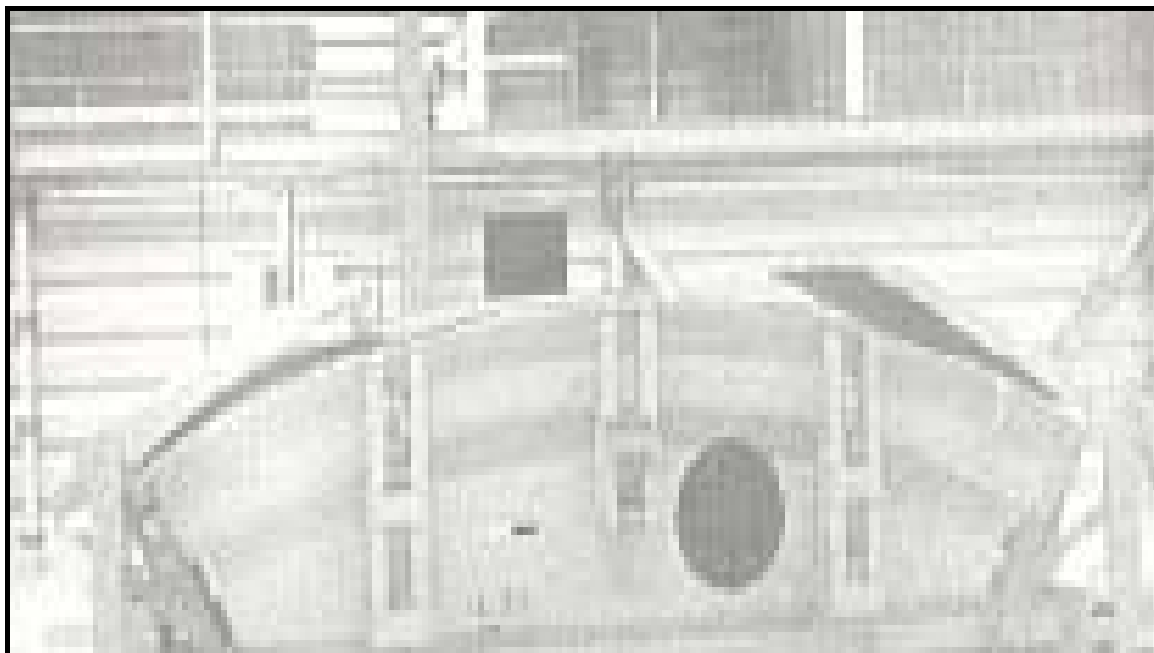
Διαφορές πορείας μπορούν να διορθωθούν από το χειριστή με ρύθμιση της περιστροφής της κοπτικής κεφαλής (διεύθυνση, ροπή στρέψεως, ταχύτητα περιστροφής), με το σύστημα των αρθρωτών υδραυλικών κυλίνδρων, το σύστημα ελέγχου των εμπρόσθιων πλευρικών πεδύλων και των προωθητικών υδραυλικών κυλίνδρων (επιλογή, ροή, πίεση λαδιού).



Σχήμα 32β. Προκατασκευασμένοι δακτύλιοι επενδύσεως με περιφερειακό λάστιχο στεγανώσεως. Στη μέση στοιχείο δαπέδου (Αθηναϊκό Μετρό).



Σχήμα 32γ. Εργοστάσιο προκατασκευής δακτυλίων επενδύσεως.



Σχήμα 32δ. Σιδηρότυπος προκατασκευασμένων δακτυλίων.

Το μηχάνημα κατευθύνεται από σύστημα σκοπεύσεως Laser (CAP/ ZED). Το σύστημα ZED χρησιμοποιεί Laser, το οποίο υποδεικνύει τις συντεταγμένες από την οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση της θέσεως του εμπρόσθιου σημείου της κεφαλής κοπής και τις μεταδίδει στο σύστημα CAP. Η ακτίνα Laser, όπως έχει ορισθεί και ευθυγραμμιστεί με τη συμβατική τεχνική του θεοδολίχου, δίνει προσδιοριζόμενη γραμμή και αναγνωρίσιμο σημείο, το οποίο προβάλλεται συνεχώς στο μέτωπο του στόχου στην οπίσθια ασπίδα του μηχανήματος. Η συσκευή τοποθετείται σε σταθμό στη στέψη της σήραγγας, έτσι ώστε οι γραμμές Laser να προβάλλονται κατ' ευθείαν στο στόχο. Το σύστημα CAP αναγνωρίζει (διαβάζει) τις τιμές ελέγχου, που μεταδίδει το σύστημα ZED. Ο χειριστής με το χέρι ή με αυτόματο χειρισμό προσπαθεί να τηρήσει τις παραπάνω τιμές με ενεργοποίηση των πιέσεων και των ροών λαδιού στους προωθητικούς κυλίνδρους, στην ταχύτητα περιστροφής και στη ροπή στρέψεως της κοπτικής κεφαλής. Σε περίπτωση σημαντικής εκτροπής, που επισημαίνεται από το σύστημα ZED, προσδιορίζεται μια διορθωτική καμπύλη, η οποία έχει σκοπό να επαναφέρει το μηχάνημα στην αρχική πορεία.

Η απόκλιση μπορεί να οφείλεται:

Σε δυσκολία του χειριστή να ακολουθήσει την αρχική πορεία.

Σε αναπροσαρμογή της ακτίνας Laser του συστήματος ZED.

Η διορθωτική ενέργεια πρέπει να συμφωνεί με την αρχική μέγιστη ακτίνα καμπυλότητας 250 μέτρων με την εξασφάλιση των 38mm γύρω από τον τοποθετημένο προκατασκευασμένο δακτύλιο και την ανοχή των 80mm στη θέση του άξονα της σήραγγας.

### **6.2.5 ΜΗΧΑΝΗ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ ROBBINS**

Η δάτρηση της σήραγγας του καναλιού κάτω από τη Μάγνη (Channel Tunnel) έγινε με δυο μηχανές Robbins TBM 271-273 και 271-244 διαμέτρου 8,36m σε παράλληλη λειτουργία στις δυο σήραγγες κυκλοφορίας. Η μια από τις δύο μηχανές επέτυχε παγκόσμιο ρεκόρ προχωρήσεως 1719,1 m σε ένα μήνα (αιχμή παραγωγής τον 19<sup>ο</sup> μήνα από την έναρξη των εργασιών) κάτω από σχετικά δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας (καταπτώσεις νερών στη σήραγγα) και με παράλληλη τοποθέτηση των προκατασκευασμένων δακτυλίων επενδύσεως.

Η επένδυση της σήραγγας κυκλοφορίας έγινε με προκατασκευασμένα στοιχεία δακτυλίων από σκυρόδεμα και χάλυβα. Η εσωτερική διάμετρος 7,6 m απαιτούσε 9 στοιχεία πλέον το στοιχείο κλειδί για το σχηματισμό ενός πλήρους δακτυλίου. Για την παραγωγή των προκατασκευασμένων δακτυλίων εγκαταστάθηκαν τέσσερα εργοστάσια με ικανότητα παραγωγής το καθένα 70 στοιχεία ανά 12ωρη βάρδια. Η αιχμή της παραγωγής έφτασε τα 1000 στοιχεία ανά 24ωρο. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 500.000 στοιχεία. Η ταχεία ωρίμαση των στοιχείων γινόταν σε θερμοκρασία 50 °C για την απόκτηση αντοχής 10 N/mm<sup>2</sup> σε έξι ώρες. Σε ορισμένες θέσεις χρησιμοποιήθηκαν και χαλύβδινα στοιχεία.

### **6.3 ΒΑΘΜΟΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΟΛΟΜΕΤΩΠΗΣ ΚΟΠΗΣ**

Ο βαθμός εκμεταλλεύσεως των μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής επηρεάζεται από τις παράλληλες δραστηριότητες, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη συμπλήρωση του κύκλου εκσκαφής, δηλαδή τοποθέτηση συστημάτων προσωρινής και μονίμου αντιστηρίξεως, αλλαγή κοπτικών δίσκων, εργασίες συντηρήσεως, αναμονή των οχημάτων μεταφοράς, και από τις γεωλογικές συνθήκες. Ο Πίνακας που ακολουθεί δίνει ανάλυση των παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν το βαθμό εκμεταλλεύσεως.

Πίνακας 6. Βαθμός εκμεταλλεύσεως μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής

Ενδεικτικές τιμές

|                               |       |   |
|-------------------------------|-------|---|
| Καθαρή διάτρηση               | 49    | % |
| Αναμετάθεση                   | 4     |   |
| Κοπήρες, αλλαγή & επιθεώρηση  | 11    |   |
| Ανεξέλεγκτες διακοπές         | 4     |   |
| Σύστημα υποστηρίξεως (βλάβες) | 4     |   |
| Εισοδος νερών                 | 7     |   |
| Αναμονή συρμού μεταφοράς      | 12    |   |
| Γεωλογικές & λοιπές διακοπές  | 9     |   |
|                               | <hr/> |   |
|                               | 100   | % |



## 7. ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΚΟΠΗΣ.

Τα τελευταία χρόνια οι μηχανές σημειακής κοπής (Αγγλ. Roadheader, Γερμαν. Teilschittmaschine) χρησιμοποιούνται με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό τόσο στα υπόγεια τεχνικά έργα, όσο και στη διάνοιξη στοών μεταλλείων. Σε σύγκριση με τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής έχουν το πλεονέκτημα, ότι μπορούν να διανοίξουν, εκτός της κυκλικής, διάφορες διατομές σήραγγας (κυκλική, πεταλοειδής, ορθογωνική) και διατομές διαφορετικών διαστάσεων χωρίς αλλαγή των λειτουργικών τους στοιχείων. Επίσης έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας πάνω σε κλειστές. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες γεωλογικές και κατασκευαστικές συνθήκες εργασίας. Η χρήση τους είναι εύκολη και δεν απαιτούν πολυδάπανα συστήματα υποστηρίξεως. Με τη τοποθέτηση του μηχανήματος μέσα σε ασπίδα χρησιμοποιείται και σε χαλαρά εδάφη. Σε σήραγγες μεγάλης διαμέτρου μέσα στο χώρο της ασπίδας μπορεί να τοποθετηθούν περισσότερες κοπτικές κεφαλές (Σχ. 35). Για τη συγκράτηση του μετώπου, όταν απαιτείται, τοποθετούνται εγκάρσιες δοκοί αντιστηρίξεως. Τα μειονεκτήματά τους, σε σύγκριση με τις μηχανές ολομέτωπης κοπής, είναι η χαμηλή εκσκαπτική ικανότητα, ο περιορισμός σε πετρώματα με αντοχή μέχρι 110Μρα (από περίπου 70 Μρα και άνω η φθορά των κοπτικών εργαλείων αρχίζει να γίνεται αντικοινομική) και η οριακή διατομή μέχρι 42m<sup>2</sup>. Η διαμόρφωση του μηχανήματος σημειακής κοπής και τα κύρια τμήματα, τα οποία το συνθέτουν, φαίνονται στο σχήμα 33 (για μια κοπτική κεφαλή).



Σχήμα 33. Μηχανή σήραγγων σημειακής κοπής (κατασκευή Alpine).

1. Πρόβολος κοπτικής κεφαλής, 2 Δισκοειδή έδρανα, 3 Διάταξη αυτοφορτώσεως, 4 Μεταφορικός μάντας φορτώσεως, 5 Ερπυστριοφόρο φορείο, 6 Πλαίσιο βάσεως, 7 Ηλεκτρική εγκατάσταση, 8 Υδραυλική μονάδα.

Οι μηχανές σημειακής κοπής διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες:

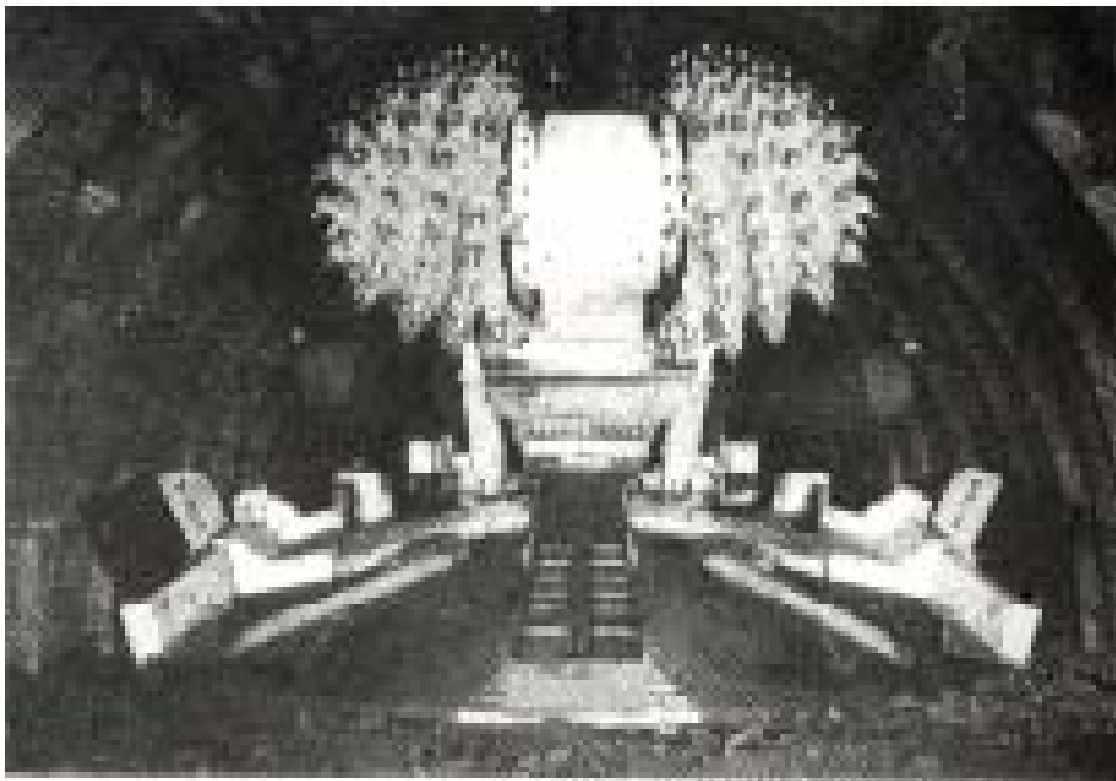
- A) Μηχανές με κεφαλή διαμήκους κοπής (σπειροειδής κεφαλή). Η κοπτική κεφαλή κόβει το πέτρωμα παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας (σχ. 33).
- B) Μηχανές με διπλή κεφαλή εγκάρσιας κοπής και δυο κοπτικούς κυλίνδρους (κεφαλή διπλού τυμπάνου). Η κοπτική κεφαλή διαμορφώνεται ως διπλό στρεφόμενο τύμπανο με τους δυο κοπτικούς κυλίνδρους εκατέρωθεν ου διαμήκους άξονα του προβόλου (σχ. 34).
- Γ) Μηχανές με μια κεφαλή εγκάρσιας κοπής. Στην περίπτωση αυτή το μήκος της κυλινδρικής κεφαλής είναι ίσο με το πλάτος της διατομής της σήραγγας.
- Δ) Μηχανές με κεφαλή εγκάρσιας κοπής και πλευρική μετακίνηση της κυλινδρικής κεφαλής (παραλλαγή της γ).
- Ε) Μηχανές με ασπίδα με μια ή περισσότερες κοπτικές κεφαλές (σχ. 35). Οι τελευταίες είναι κατάλληλες για σήραγγες μεγάλης διαμέτρου σε σαθρό πέτρωμα.



Σχήμα 34. Μηχανή σημειακής κοπής με κεφαλή διαμήκους κοπής (κατασκ. Paurat). Τύπος T1.10 για πετρώματα μέχρι 100Μρα.



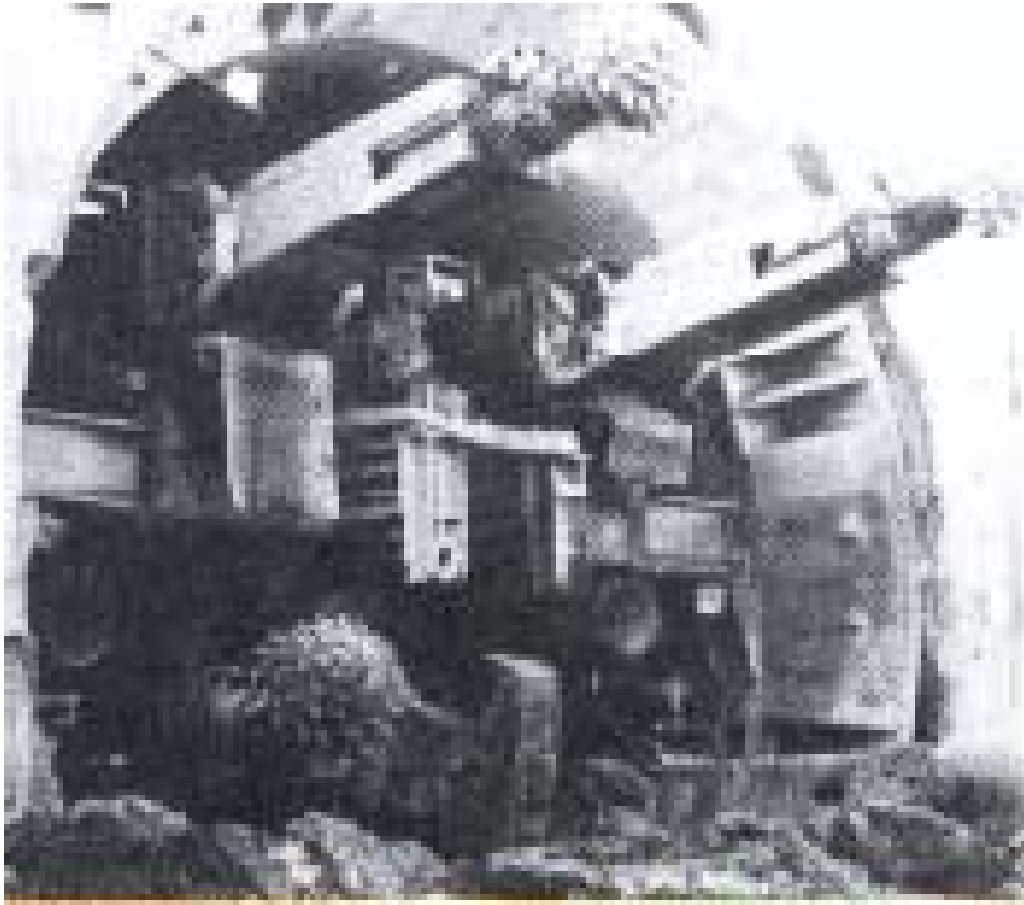
Τελευταίες έρευνες απέδειξαν, ότι η αρχή της αξονικής κοπής των κεφαλών εγκάρσιας κοπής υπερέχει σε λειτουργικές ιδιότητες των κεφαλών διαμήκους κοπής, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις συμπαγών πετρωμάτων. Οι μηχανές μικρής ισχύος κοπής (αναφέρεται στην ισχύ κινήσεως του κοπτικού τυμπάνου) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχηματισμούς αντοχής σε θλίψη μέχρι  $3000 \text{ N/cm}^2 = 30 \text{ Mpa}$ . Οι μηχανές ισχύος μέχρι  $100 \text{ kW}$  μπορούν να εργαστούν οικονομικά σε πετρώματα μέχρι  $80 \text{ Mpa}$  και με  $200 \text{ kW}$  σε πετρώματα μέχρι  $100 \text{ Mpa}$ . Τα σύγχρονα μηχανήματα με κοπτική ισχύς  $400 \text{ kW}$  μπορούν να εργαστούν και σε πετρώματα  $120 \text{ Mpa}$  (με αυξημένες φθορές). Σε μαλακά εδάφη χρησιμοποιούνται μηχανήματα σημειακής κοπής με ασπίδα με ένα ή δυο κοπτικούς προβόλους, (σχ. 36).



Σχήμα 35. Μηχανή με διπλή κεφαλή εγκάρσιας κοπής και δυο κοπτικούς κυλίνδρους (κατασκ. Westfalia Becorit).

Τα εργοστάσια Westfalia Becorit ειδικευμένα στην κατασκευή μηχανημάτων σημειακής κοπής διατήσεως σηράγγων, κατασκευάζουν τρεις τύπους. Ο μεγαλύτερος τύπος WAV 300 κινείται σε ερπύστριες και έχει τη δυνατότητα να ανοίξει σήραγγα διατομής μέχρι  $58 \text{ m}^2$ , πλάτος πυθμένα  $6,750 \text{ m}$  και ύψος κοπής  $5,30 \text{ m}$  χωρίς πλευρική μετατόπιση. Με την εγκατεστημένη ισχύ της κεφαλής κοπής των  $300 \text{ kW}$  έχει τη δυνατότητα οικονομικής εκσκαφής σε πετρώματα με αντοχή θλίψεως  $12.000 \text{ N/cm}^2 = 120 \text{ Mpa}$ . Συνολική

εγκατεστημένη ισχύ 437 kW. Η ελάχιστη διατομή, στην οποία μπορεί να εργαστεί το μηχάνημα, πρέπει να έχει πλάτος 4,2 m και ύψος 2,3 m.



Σχήμα 36. Μηχάνημα σημειακής κοπής με ασπίδα, τρεις κοπτικές κεφαλές και οριζόντια δοκό αντιστηρίξεως μετώπου (Doscó, S600, διάμετρος 11m).

Το σύστημα κοπής με τη στρεφόμενη κοπτική κεφαλή είναι συναρμολογημένο πάνω σε ένα έλκηθρο, το οποίο με δυο υδραυλικούς κυλίνδρους δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να ολισθαίνει προς το μέτωπο κοπής κατά 600 mm. Με το σύστημα αυτό είναι δυνατή η στερέωση του μηχανήματος πριν την έναρξη της κοπής, έτσι ώστε να μη καταπονείται το σύστημα του φορείου και των ερπυστριών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Όταν το μηχάνημα σκάβει σήραγγα με μεγάλη κλίση, η αγκύρωση στον πυθμένα της σήραγγας είναι απαραίτητη για την εξάσκηση της απαιτούμενης πίεσεως στο μέτωπο. Χωρίς την υδραυλική προώθηση του συστήματος κοπής η εκσκαφή σε κεκλιμένη σήραγγα θα ήταν αδύνατη. Για την προστασία από την σκόνη τη μηχανήμα, εκτός από διάφορες εξελιγμένες διατάξεις μειώσεως της σκόνης, είναι εξοπλισμένο με δικό του σύστημα αποκονιώσεως και με

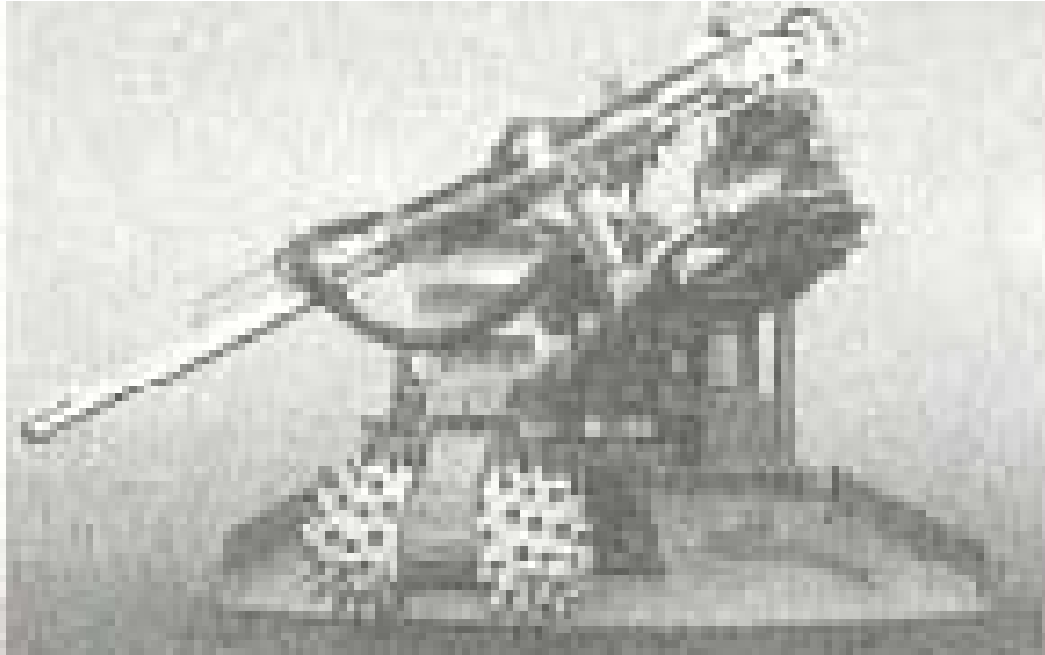
πρόσθετο σύστημα μειώσεως του θορύβου. Η τροφοδότηση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τάση 1.000V από μια σταθερή εκτυλίχτρια καλωδίου.

Τα αυστριακά εργοστάσια Alpine είναι ειδικευμένα στην κατασκευή μηχανημάτων για την εκμετάλλευση υπογείων έργων κυρίως μεταλλείων (Σχ. 31). Για τα τεχνικά έργα κατασκευάζουν τον τύπο AMT 70, ο οποίος ήδη χρησιμοποιείται στην Ελλάδα για την κατασκευή των υπόγειων έργων του Αθηναϊκού Μετρό. Το μηχάνημα μπορεί να σκάψει μέτωπο διαστάσεων ύψους μέχρι 7,5 m (μέχρι 7,9 m με ανύψωση κατά 300 mm του πυργίσκου του προβόλου κοπής) και πλάτους μέχρι 9,5 m. Το υδραυλικό σύστημα έχει εναλλακτικές επιλογές κινήσεως με συμβατικό ηλεκτροκινητήρα ή νηζελοκινητήρα. Το μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με τα εξής πρόσθετα εργαλεία: Υδραυλικό σύστημα τοποθετήσεως ελασμάτων ασπίδων και χαλύβδινων αγκυρώσεων, σύστημα ανυψώσεως και τοποθετήσεως τόξων αντιστηρίξεως και πρόβολο αντοχής σε θλίψη μέχρι 60Μpa. Η διάμετρος της κοπτικής κεφαλής είναι 850mm, η δύναμη ωθήσεως, η οποία ασκείται από τις ερπύστριες είναι 200 kN, η πίεση του υδραυλικού συστήματος 150-160 bar, η εγκατεστημένη ισχύς 395 kW, η ισχύς κοπής 236 kW (τάση V/50 Hz) και το συνολικό βάρος 60 τόνοι. Μπορεί να εξοπλισθεί με διατρητικό μηχάνημα.

Για μικρές διαστάσεις σήραγγας τα εργοστάσια Westfalia κατασκευάζουν τον τύπο Renard 40. Το πλάτος του μηχανήματος είναι 1200mm, το ύψος απορρίψεως 1000 έως 2000 mm, το μήκος 6940 mm, η μέγιστη επιφάνεια μετώπου  $17 \text{ m}^2$ , η δύναμη ωθήσεως με πίεση 200 bar 81kN και η εγκατεστημένη ισχύς 70 kW.

## **7.1 ΠΡΟΣΘΕΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΚΟΠΗΣ**

Τα σύγχρονα μηχανήματα σημειακής κοπής εξοπλίζονται με διατρητικό μηχάνημα (Σχ. 37) για την κατασκευή ανιχνευτικών οπών προπορείας ή ενισχυτικών οπών στο μέτωπο και στα τοιχώματα για την τοποθέτηση αγκυρίων. Επίσης εξοπλίζονται με διάταξη τοποθετήσεως τόξων και ελασμάτων αντιστηρίξεως (Σχ. 38). Τα μεγαλύτερα μηχανήματα φέρουν διάταξη εκτοξεύσεως σκυροδέματος και σύστημα αποκονιώσεως. Ο χειρισμός των διατάξεων αυτών γίνεται με υδραυλικό σύστημα, το οποίο επιτρέπει και χειρισμό εξ αποστάσεως. Για την κατεύθυνση του μηχανήματος εφαρμόζονται συστήματα H.Y. με οθόνη και δέσμη laser.



Σχήμα 37. Διατρητικό μηχάνημα οπών μετώπου και αγκυρίων.



Σχήμα 38. Διάταξη τοποθετήσεως τόξων οροφής.

Η ρύθμιση στροφών της κοπτικής κεφαλής γίνεται με το χέρι ή αυτόματα με κατάλληλο υδραυλικό σύστημα. Τα εργοστάσια Alpine εφαρμόζουν σύστημα με αντλίες αυτορυθμιζόμενης παροχής και αναλογικές βαλβίδες ανιχνεύσεως φορτίου.

## 7.2 ΩΡΙΑΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΚΟΠΗΣ

Η ωριαία απόδοση του μηχανήματος ( $m^3/h$ ) δίνεται ως συνάρτηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του πετρώματος, η οποία εκφράζεται σε MPa. Μια ένδειξη της κατηγορίας του πετρώματος ανάλογα με την αντοχή δίνει ο Πίνακας 7.

Πίνακας 7. Κατάταξη πετρωμάτων ανάλογα με τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη.

| Αντοχή σε θλίψη<br>MPa | Χαρακτηρισμός |
|------------------------|---------------|
| Μεγαλύτερη 280         | Πολύ υψηλή    |
| 180 έως 280            | Υψηλή         |
| 80 έως 180             | Μέση          |
| 40 έως 80              | Χαμηλή        |
| Μικρότερη 40           | Πολύ χαμηλή   |

Τα εργοστάσια Paurat δίνουν τις ωριαίες αποδόσεις για τα μηχανήματα σημειακής κοπής E 169 και E 195 (Πίνακας 8) σε συνάρτηση από την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη.

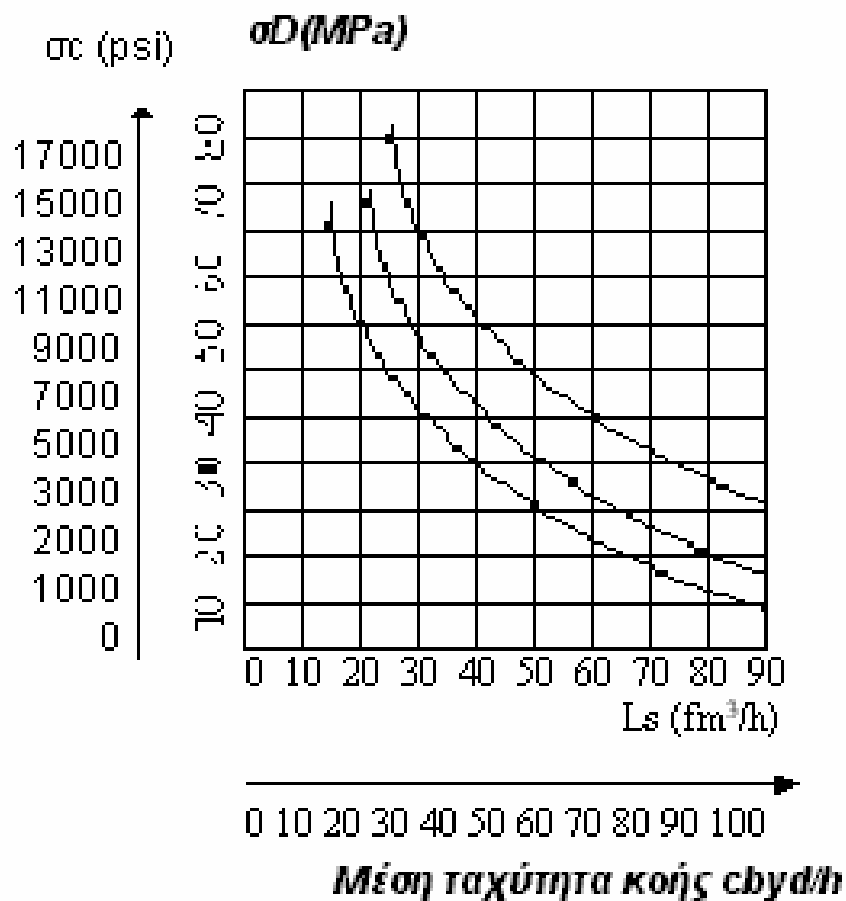
Τα εργοστάσια Alpine δίνουν για μηχανήματα ισχύος 136, 218 και 340 PS τις καμπύλες του σχήματος 38, από τις οποίες προσδιορίζεται η αντίστοιχη ωριαία απόδοση σε συνάρτηση από τη σκληρότητα.

Οι τιμές του πίνακα 9 και των καμπυλών του σχήματος 39 είναι ενδεικτικές. Η πραγματική απόδοση εξαρτάται από τις συνθήκες, που επικρατούν μέσα στη σήραγγα, από τις παράλληλες εργασίες στο μέτωπο και από την ικανότητα των μεταφορικών συστημάτων.

Πίνακας 8. Ωριαίες αποδόσεις μηχανημάτων σημειακής κοπής  
Μηχανήματα Paurat E169 και E195.

| Αντοχή<br>θλίψη<br>MPa | σε | Απόδοση κοπής<br>$m^3/h$<br>Μέση | Κατανάλωση<br>κοπτικών/ $m^3$ |
|------------------------|----|----------------------------------|-------------------------------|
|------------------------|----|----------------------------------|-------------------------------|

|     | Μέγιστη |     | Ελάχιστη | Μεγ.  | Ελάχ. |
|-----|---------|-----|----------|-------|-------|
| <20 | >130    | >90 | >45      | <0,02 | <0,01 |
| 20  | 115     | 80  | 40       | 0,05  | 0,01  |
| 30  | 100     | 70  | 30       | 0,07  | 0,02  |
| 40  | 91      | 63  | 31       | 0,09  | 0,03  |
| 50  | 80      | 50  | 25       | 0,12  | 0,04  |
| 60  | 55      | 38  | 19       | 0,015 | 0,05  |
| 70  | 39      | 27  | 13       | 0,18  | 0,06  |
| 80  | 30      | 22  | 10       | 0,22  | 0,08  |
| 90  | 20      | 14  | 7        | 0,18  | 0,12  |
| 100 | 10      | 6   | 0        | 0,40  | 0,30  |



Σχήμα 39. Μέση ωριαία απόδοση μηχανημάτων σημειακής κοπής (πηγή Alpine).

Κριτήρια επιλογής μηχανήματος σημειακής κοπής.

- Δυνατότητα εργασίας σε υπόγεια έργα με μεταβαλλόμενες διαστάσεις, στα οποία απαιτείται συχνή εναλλαγή της θέσεως του μηχανήματος.
- Άμεση προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες εδάφους.
- Εκσκαφή κάτω από το επίπεδο κυλίσεως του μηχανήματος για την τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων δαπέδου.
- Κίνηση με ηλεκτρική ενέργεια ή πετρελαιοκινητήρα.





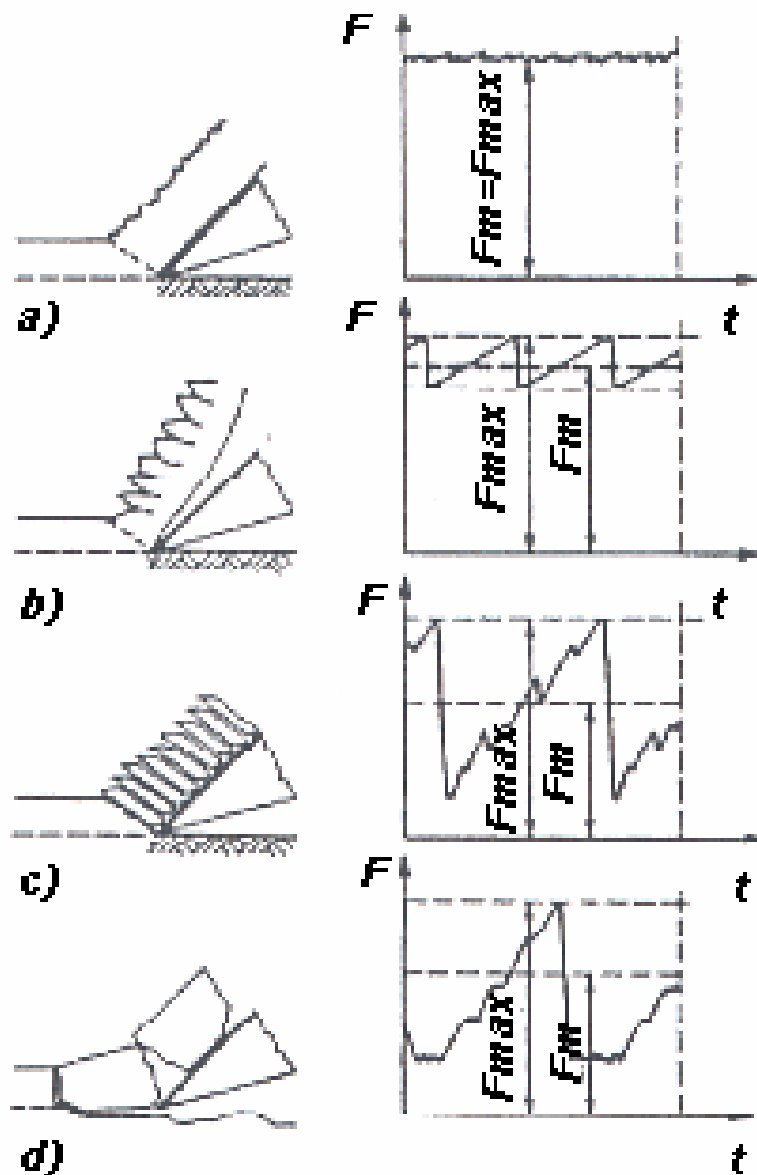
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΘΕΩΡΙΕΣ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

#### 1. ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάγκη για μια καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού κοπής των πετρωμάτων, όταν εξορύσσονται με μηχανικά μέσα που φέρουν κοπτικά εργαλεία τύπου σφήνας, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός θεωρητικού υπόβαθρου, των θεωριών κοπής, με βάση τις οποίες προσδιορίζονται οι δυνάμεις, που πρέπει να ασκήσουν τα κοπτικά εργαλεία επί του πετρώματος για να επιτευχθεί η κοπή του.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται διάφορες μορφές κοπής των πετρωμάτων, όταν προσβάλλονται από κοπτικό εργαλείο τύπου σφήνας, καθώς και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής. Στα αντίστοιχα διαγράμματα παρατηρείται μια συνεχής διακύμανση του μεγέθους της δύναμης κοπής, μεταξύ ενός μέγιστου και ελάχιστου, συναρτήσει του χρόνου κατά τον οποίο πραγματοποιείται η εκσκαφή και για διάφορους τύπους πετρωμάτων (a: πλαστικά → d: ψαθυρά).



Σχήμα 1. Διάφορες μορφές κοπής πετρωμάτων και αντίστοιχα διαγράμματα δύναμης κοπής (F) και χρόνου κοπής (t) για διάφορους τύπους πετρωμάτων (a:πλαστικά → d: ψαθυρά).

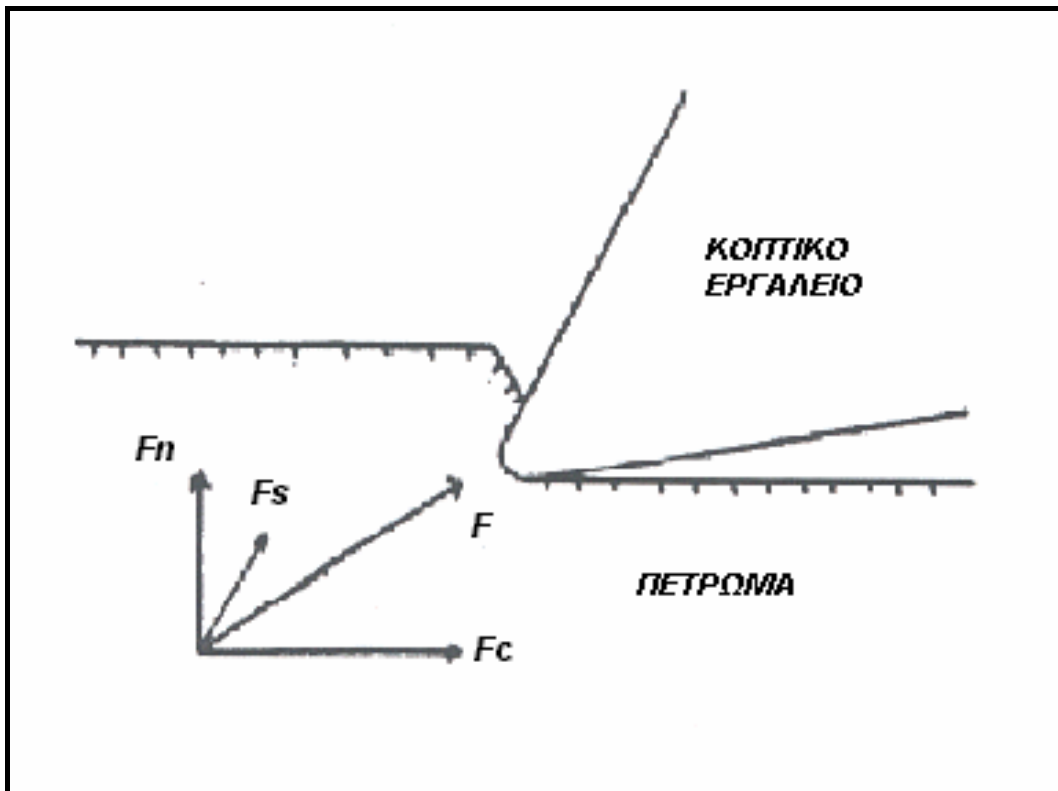
$F_{max}$ = Μέγιστη δύναμη κοπής,  $F_m$ = Μέση δύναμη κοπής.

Η συνισταμένη δύναμη κοπής (F), που αναπτύσσεται από την δράση – αντίδραση μεταξύ εργαλείου κοπής και πετρώματος, αναλύεται σε τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων στις εξής συνιστώσες (Σχήμα 2):

Την εφαπτομενική δύναμη ή δύναμη κοπής ( $F_c$ ), που έχει διεύθυνση παράλληλη προς την διεύθυνση κίνησης του εργαλείου κοπής.

Την ορθή δύναμη ( $F_n$ ), που έχει διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση κίνησης του εργαλείου κοπής.

Την πλευρική δύναμη ( $F_s$ ), που έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των δύο προηγούμενων.



Σχήμα 2. Ανάλυση των δυνάμεων κατά την κοπή των πετρωμάτων.

$F$ = Συνισταμένη δύναμη κοπής

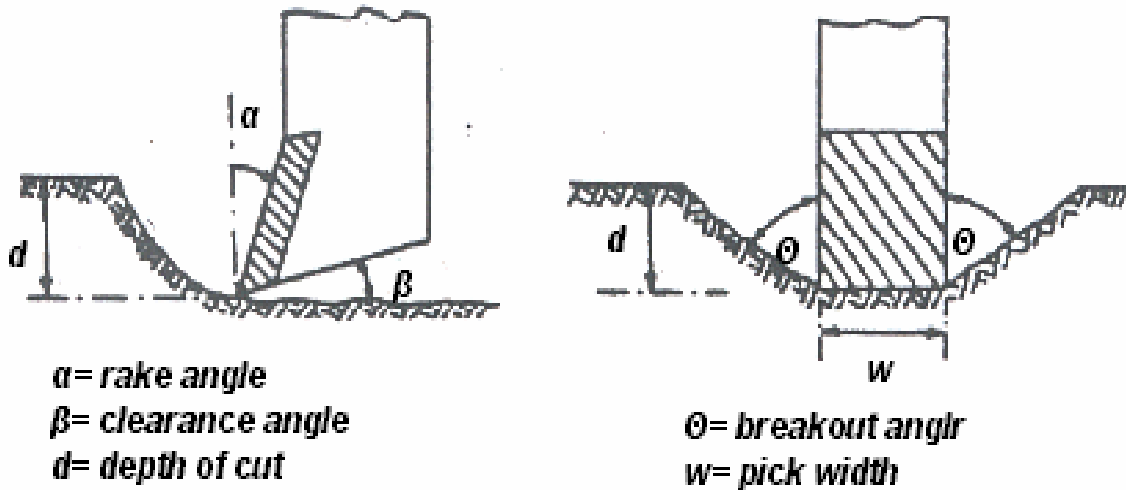
$F_c$ = Δύναμη κοπής

$F_n$ = Ορθή δύναμη

$F_s$ = Πλευρική δύναμη.

Από τις ανωτέρω συνιστώσες δυνάμεις μόνο η δύναμη κοπής παράγει έργο. Η μέση μέγιστη δύναμη κοπής παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην μελέτη φαινομένου της κοπής των πετρωμάτων.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός κοπτικού εργαλείου τύπου σφήνας.



Σχήμα 3. Η γεωμετρία κοπτικού εργαλείου τύπου σφήνας.

$\alpha$ : εμπρόσθια γωνία ελευθερίας

$\beta$ : οπίσθια γωνία ελευθερίας

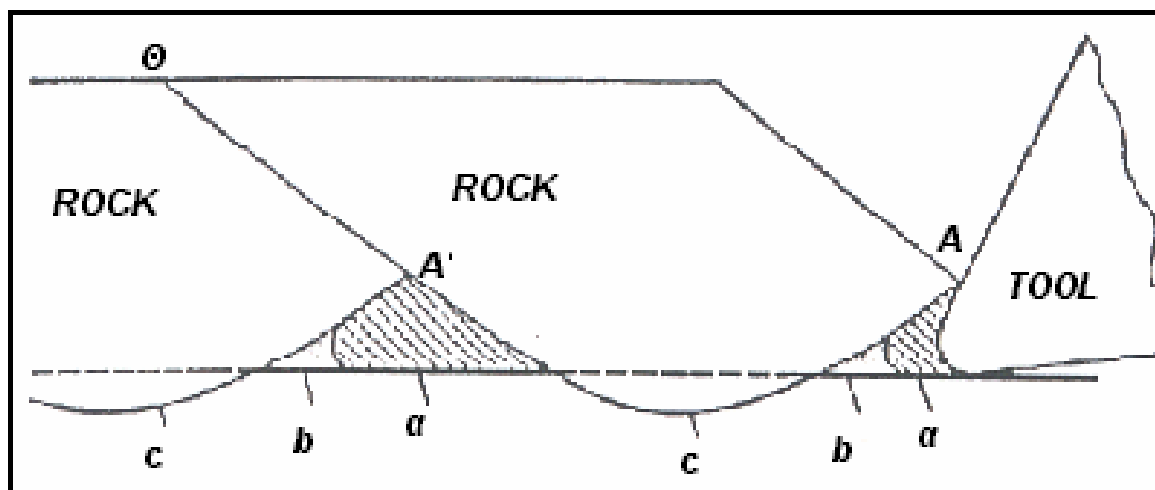
$d$ : βάθος κοπής

$\theta$ : γωνία πλευρικής υπερεκσκαφής

$w$ : πλάτος κοπτικής ακμής

Από τις θεωρίες κοπής των πετρωμάτων που έχουν αναπτυχθεί, η θεωρία του Merchant δέχεται ότι το πέτρωμα, υπό την επίδραση της σφήνας του κοπτικού εργαλείου, αστοχεί σε διάτμηση. Η θεωρία αυτή έχει εφαρμογή σε πετρώματα που παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά. Ο Evans ανέπτυξε την ομώνυμη θεωρία κοπής δεχόμενος ότι, το πέτρωμα αστοχεί σε εφελκυσμό, κάτι το οποίο παρατηρείται σε πετρώματα με ψαθυρή συμπεριφορά.

Ο Nishimatsu, 1971 δέχεται ότι, η κοπή των πετρωμάτων είναι μια πιο σύνθετη διεργασία, που περιλαμβάνει τρία στάδια (Σχήμα 4), την δημιουργία μιας πρωτεύουσας ζώνης σύνθλιψης (α), την αποκόλληση ενός τεμαχίου του πετρώματος (c) και τέλος την δημιουργία μιας δευτερεύουσας ζώνης σύνθλιψης (b). Μετά την αστοχία της ζώνης (b) το κοπτικό εργαλείο προχωρεί χωρίς ιδιαίτερη αντίσταση κατά μήκος της ζώνης (c) επειδή το τεμάχιο του πετρώματος έχει ήδη αποκολληθεί, και επαναλαμβάνεται ο ίδιος κύκλος κοπής. Ο Nishimatsu, εφαρμόζοντας το κριτήριο αστοχίας του Mohr, υπολογίζει την δύναμη κοπής συναρτήσει της αντοχής του πετρώματος σε διάτμηση.



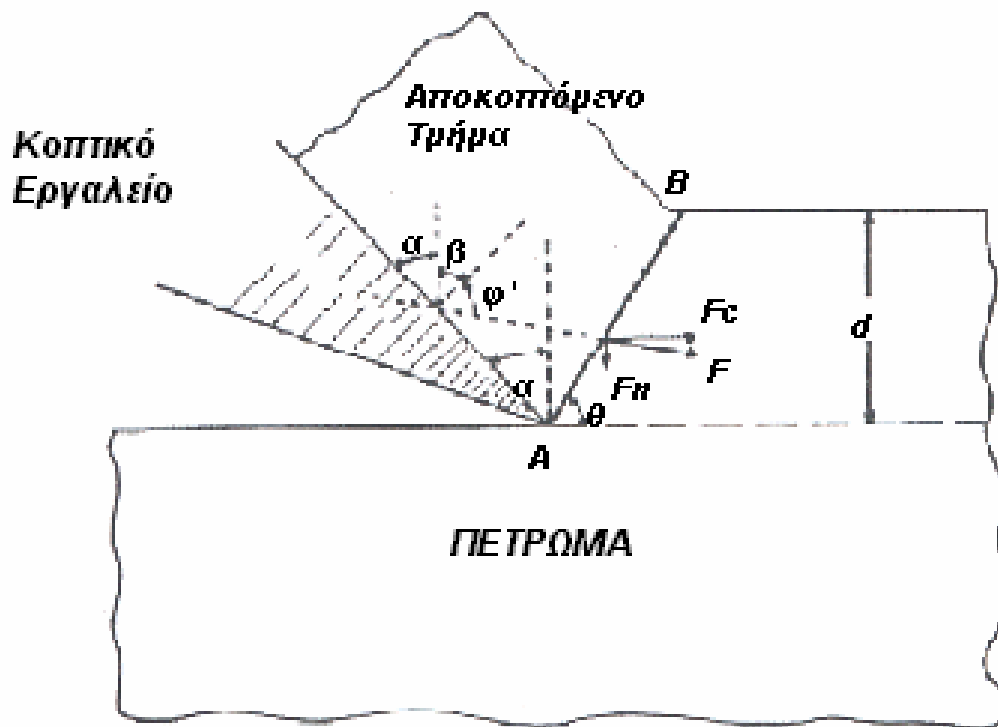
Σχήμα 4. Σχηματική παρουσίαση της διαδικασίας κοπής των πετρωμάτων από κοπτικό εργαλείο τύπου σφήνας κατά τον Nishimatsu, 1972.

## 2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ ΤΟΥ MERCHANT

Ο Merchant 1944, μελετώντας την κοπή μετάλλων με τη βοήθεια κοπτικών εργαλείων τύπου σφήνας, ανέπτυξε την ομώνυμη θεωρία κοπής, η οποία αργότερα έγινε αποδεκτή και για την κοπή πετρωμάτων που έχουν πλαστική συμπεριφορά (Evans et al, 1973).

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή (Σχήμα 5), το πέτρωμα υπό την επίδραση δύναμης  $F$ , που ασκείται από το κοπτικό επί του πετρώματος, το οποίο κόβει σε βάθος  $d$  από την ελεύθερη επιφάνεια του πετρώματος, αστοχεί σε διάτμηση, κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος  $AB$  που σχηματίζει γωνία  $\theta$  με το οριζόντιο επίπεδο. Το πέτρωμα έχει συνοχή  $C$ , ενώ ο συντελεστής τριβής μεταξύ μετάλλου και πετρώματος  $\mu'$  αντιστοιχεί σε γωνία τριβής  $\varphi'$ .

Επειδή το βάθος  $d$  είναι μικρό σε σχέση προς το πλάτος του κοπτικού εργαλείου, δεχόμαστε ότι επικρατούν συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το αποκοπόμενο τμήμα του πετρώματος βρίσκεται σε ισορροπία, εφαπτόμενο επί της επάνω πλευράς της σφήνας, η συνισταμένη δύναμη  $F$  αναλύεται σε οριζόντια και κάθετη συνισταμένη,  $F_c$  και  $F_n$  αντίστοιχα.



Σχήμα 5. Σχηματική παρουσίαση της κοπής κατά Merchant.

Με βάση την γεωμετρία του Σχήματος 5:

$$\frac{F_n}{F_c} = \cot(\pi - \beta - \phi') = -\cot(\beta + \phi') \quad (1)$$

όπου:

$\beta$  = συμπληρωματική γωνία της εμπρόσθιας γωνίας ελευθερίας του κοπτικού.

Προβάλλοντας τις δυνάμεις  $F_c$  και  $F_n$  κατά μήκος της γραμμής AB έχουμε:

$$F_c * \cos \theta - F_n * \sin \theta = \frac{C * d}{\sin \theta} \quad (2)$$

Αντικαθιστώντας την  $F_n$  στις σχέσεις (9) και (10) έχουμε:

$$F_c * \cos \theta + F_c * \cot(\beta + \phi') * \sin \theta = \frac{C * d}{\sin \theta} \quad \text{ή}$$

$$F_c = \frac{C * d * \sin(\beta + \phi')}{\sin \theta * \sin(\beta + \phi' + \theta)} \quad (3)$$

Η γωνία  $\theta$  υπολογίζεται συναρτήσει των άλλων γωνιών της κοπής, υποθέτοντας ότι η διεύθυνση του επιπέδου διάτμηση είναι τέτοια, ώστε η δύναμη κοπής και κατά συνέπεια η ενέργεια κοπής να είναι η ελάχιστη, δηλαδή:

$$\frac{\partial F_c}{\partial \theta} = 0$$

οπότε έχουμε:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}(\beta + \phi') \quad (4)$$

και αντικαθιστώντας στην σχέση (11):

$$F_c = 2 * C * d * \tan\left(\frac{\beta + \phi'}{2}\right) \quad (5)$$

Η θεωρία του Merchant αναπτύχθηκε για υλικά που έχουν μόνο συνοχή, μπορεί όμως να επεκταθεί και σε υλικά που έχουν συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ , οπότε λαμβάνει την μορφή (Gottlieb et al, 1981):

$$F_c = \frac{2 * C * d * \sin(\beta + \phi')}{[\cos \phi + \cos(\beta + \phi')] * [1 - \tan \phi * \tan 1/2(\beta + \phi' - \phi)]} \quad (6)$$

όπου:

$F_c$  = δύναμη κοπής ανά μονάδα μήκους κοπτικού, kg/m

$C$  = συνοχή του πετρώματος, kg/m<sup>2</sup>

$d$  = βάθος κοπής, cm

$\beta$  = συμπληρωματική γωνία της εμπρόσθιας γωνίας ελευθερίας του κοπτικού εργαλείου

$\phi'$  = γωνία τριβής μεταξύ πετρώματος και κοπτικού εργαλείου

$\phi$  = γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος

### 3. ΘΕΩΡΙΑ ΚΟΠΗΣ EVANS

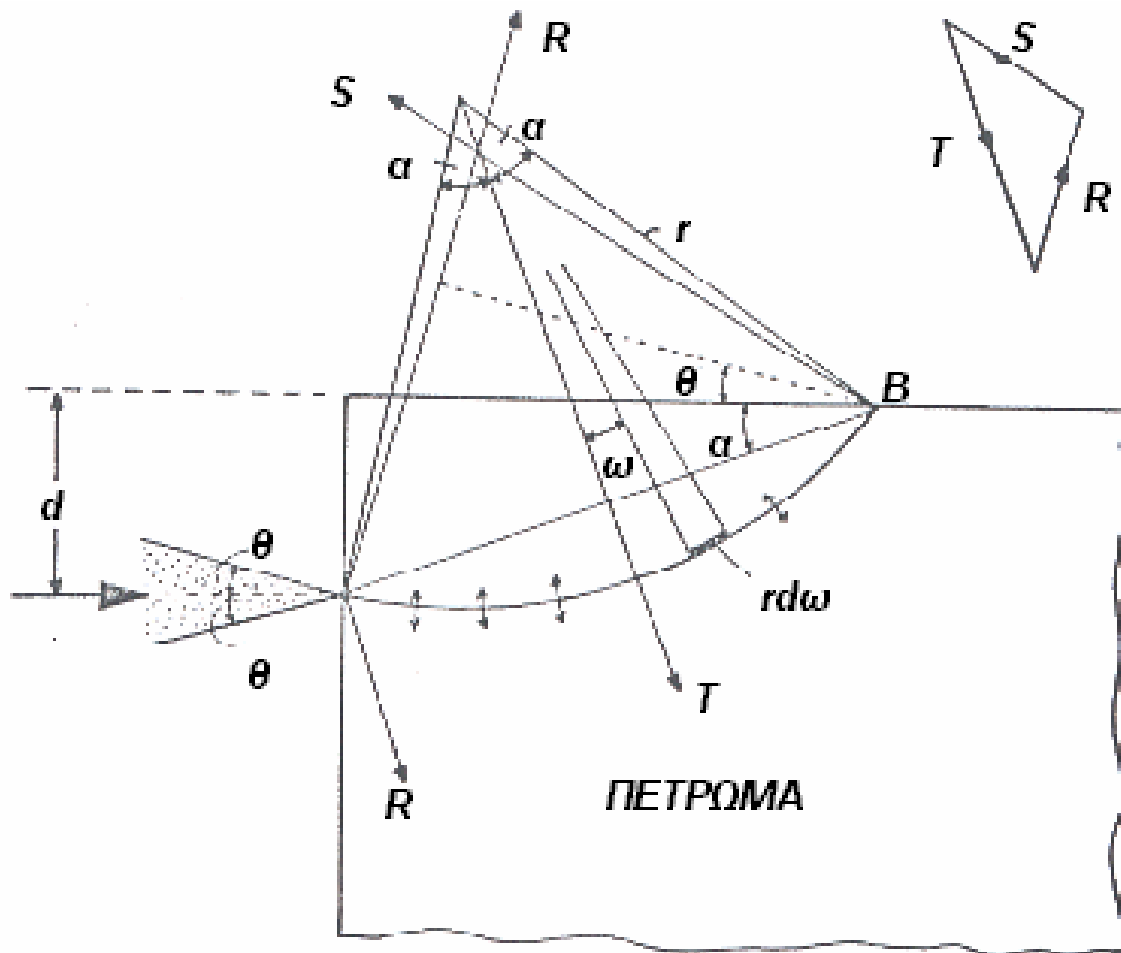
Ο Evans μελετώντας την κοπή άνθρακα, με εργαλεία τύπου σφήνας στο Mining Research Establishment του NCB της Αγγλίας, παρατήρησε ότι τα ψαθυρά πετρώματα, όπως ο άνθρακας, κατά την προσβολή τους με κοπτικά εργαλεία τύπου συμμετρικής σφήνας, αστοχούν σε εφελκυσμό κατά μήκος ενός τόξου, το οποίο αρχίζει από το άκρο της σφήνας και καταλήγει στην ελεύθερη επιφάνεια του πετρώματος (Evans, et al, 1973).

Στην αρχική διατύπωση της θεωρίας, λαμβάνεται υπόψη και η διείσδυση της σφήνας μέσα στο πέτρωμα πριν επέλθει η αστοχία του σε εφελκυσμό. Εάν όμως το βάθος στο οποίο πραγματοποιείται η κοπή  $d$  είναι τέτοιο, ώστε ο λόγος της διείσδυσης της σφήνας προς το βάθος κοπής να είναι πολύ μικρός, τότε οδηγούμαστε σε μια απλούστερη παραλλαγή της θεωρίας του Evans, που παρουσιάζεται στη συνέχεια (Evans, et al, 1973).

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η γεωμετρία της κοπής στην απλούστερη μορφή της θεωρίας. Δεχόμαστε ότι επικρατούν συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης και ότι η θραύση του πετρώματος πραγματοποιείται κατά μήκος τόξου κύκλου με ακτίνα  $r$ , το οποίο εφάπτεται οριζόντια στο άκρο της σφήνας  $A$ , ενώ αρχικά η ανάλυση υποθέτει ότι υπάρχει μηδενική τριβή μεταξύ της σφήνας και του πετρώματος.

Η σφήνα, υπό την επίδραση της δύναμης κοπή  $F_c$ , προσβάλλει το πέτρωμα σε βάθος  $d$  από την ελεύθερη επιφάνειά του.





Σχήμα 6. Γεωμετρία της κοπής κατά την θεωρία του Evans.

Στο αποκοπτόμενο τμήμα του πετρώματος δρουν οι εξής δυνάμεις. Η δύναμη R, κάθετα στην επιφάνεια της σφήνας, η συνισταμένη δύναμη  $T_a$  των δυνάμεων εφελκυσμού, που αναπτύσσονται στο τόξο όπου λαμβάνει χώρα η αστοχία και είναι κάθετη στην χορδή του τόξου AB, και τέλος μια τρίτη δύναμη που είναι απαραίτητη για να υπάρξει ισορροπία δυνάμεων στο αποκοπτόμενο τμήμα του πετρώματος, το οποίο υπό την επίδραση της σφήνας περιστρέφεται περί το σημείο B. λόγω της ισορροπίας των δυνάμεων, οι δυνάμεις R, T και S μπορούν να παρασταθούν ως προς την διεύθυνση και το μέγεθος τους με τις πλευρές τριγώνου, ενώ στην ανάλυση λαμβάνεται υπόψη η ισορροπία μιας λωρίδας του αποκοπτόμενου τμήματος πάχους ίσου προς την μονάδα.

Εάν  $\sigma_t$  είναι η αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό τότε:

$$T = \sigma * r \int_{-\alpha}^{\alpha} \cos \omega . d\omega = 2 * \sigma * r * \sin \alpha \quad (7)$$

όπου:

$r d\omega$  = τμήμα τόξου AB που σχηματίζει γωνία  $\omega$  με την ακτίνα συμμετρίας του τόξου.

Λαμβάνοντας τις ροπές των δυνάμεων περί το σημείο B έχουμε

$$R * \frac{d}{\sin \alpha} * \cos(\alpha + \theta) = T * r * \sin \alpha \quad (8)$$

Επίσης ισχύει:

$$\frac{d}{2 * \sin \alpha} = r * \sin \alpha \quad (9)$$

και κατόπιν αντικατάστασης στην σχέση (16):

$$R = \frac{\sigma * d}{2 * \sin \alpha * \cos(\alpha + \theta)} \quad (10)$$

Η οριζόντια συνιστώσα P της δύναμης R ισούται με:

$$P = R * \sin \theta$$

και λόγω της συμμετρίας της σφήνας:

$$F_c = 2 * P = 2 * R * \sin \theta \quad (11)$$

Αντικαθιστώντας της σχέση (19) στην (18):

$$F_c = \frac{\sigma * d * \sin \theta}{\sin \alpha * \cos(\alpha + \theta)} \quad (12)$$

Υποθέτουμε ότι η γωνία  $\alpha$  λαμβάνει τέτοια τιμή ώστε η τιμή της δύναμης  $F_c$  να είναι η ελάχιστη, δηλαδή,

$$\frac{\partial F_c}{\partial \alpha} = 0$$

οπότε:

$$\cos\alpha * \cos(\alpha + \theta) - \sin\alpha * \sin(\alpha + \theta) = 0$$

ή

$$\cos(2\alpha + \theta) = 0$$

και επομένως:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (13)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της γωνίας  $\alpha$  στη σχέση (20) έχουμε:

$$F_c = \frac{2 * \sigma t * d * \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (14)$$

Εάν τώρα λάβουμε υπόψη την τριβή μεταξύ σφήνας και πετρώματος, που αντιστοιχεί σε γωνία τριβής  $\phi'$ , τότε η διεύθυνση της δύναμης  $R$  θα σχηματίζει με την κάθετο στην πλευρά της σφήνας γωνία  $\phi'$ . Αυτό σημαίνει ότι η γωνία  $\theta$  στην σχέση (22) αντικαθίσταται με την γωνία  $(\theta + \phi')$  και η σχέση (22) λαμβάνει την μορφή:

$$F_c = \frac{2 * \sigma t * d * \sin(\theta + \phi')}{1 - \sin(\theta + \phi')} \quad (15)$$

Ο Whittaker (in Evans et al, 1973) επεξέτεινε την θεωρία του Evans για κοπτικά εργαλεία τύπου ασύμμετρης σφήνας, οπότε η σχέση (23) λαμβάνει την μορφή:

$$F_c = \frac{2 * \sigma_t * d * \sin \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) + \phi' \right]}{1 - \sin \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) + \phi' \right]} \quad (16)$$

όπου:

$F_c$  = δύναμη κοπής ανά μονάδα μήκους της κοπτικής ακμής, Kg/cm

$\sigma_t$  = αντοχή του πετρώματος σε εφελκυσμό, Kg/cm<sup>2</sup>

$d$  = βάθος εντομής, cm

$\varepsilon$  = γωνία εμπρόσθιας ελευθερίας του κοπτικού

$\phi'$  = γωνία τριβής μεταξύ κοπτικού και πετρώματος

Η θεωρία του Evans αναπτύχθηκε για την μελέτη της κοπής των ανθράκων και έχει εφαρμογή σε όλο το φάσμα των ανθράκων, που έχουν αντοχή σε μονοαξονική θλίψη από 4 MN/m<sup>2</sup> έως 80 MN/m<sup>2</sup>. Ο Roxborough, 1973, πραγματοποιώντας πειράματα κοπής στο Πανεπιστήμιο του Newcastle Upon Tyne, Αγγλίας, διαπίστωσε την εφαρμογή της θεωρίας του Evans και σε πετρώματα που έχουν ψαθυρή συμπεριφορά, όπως ο ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, ανυδρίτης και την προσάρμοσε ώστε να περιγράφει την κοπή πετρωμάτων με κοπτικά εργαλεία τύπου κωνικής σφήνας.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

### **ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Η ανάγκη ύπαρξης κάποιας ταξινόμησης των πετρωμάτων, η οποία, βασιζόμενη σε γενικά τεχνικά κριτήρια ή σε παραμέτρους του πετρώματος, να μπορεί να παρέχει κάποιες πληροφορίες για την συμπεριφορά του πετρώματος όταν μεταβληθεί η φυσική εντατική κατάστασή του, έχει από καιρό αναγνωριστεί. Έτσι μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με το θέμα αυτό προτείνοντας αντίστοιχες ταξινομήσεις για γενική ή ειδική χρήση (Τσουτρέλης, 1985, Μαρίνος, 1979).

### **1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**

#### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**

Η βραχομάζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι μεταβλητό (από θέση σε θέση) βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, δηλαδή μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχομάζας σε κατηγορίες και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχομάζας συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχομάζα

Ο δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD)

Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Η παρουσία υπόγειου νερού

#### **ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ**

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχομάζα εκφράζεται μέσω της αντοχής ( $\sigma_{ci}$ ) που προκύπτει κατά τη δομική μοναξονικής θλίψης (uniaxial compression strength) σε κυλινδρικά δοκίμια του “συμπαγούς” πετρώματος. Συχνά, τα αποτελέσματα των δοκιμών επηρεάζονται από την παρουσία εντός των δοκιμίων επιφανειών μικρής αντοχής σε

δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή άλλων ασυνεχειών, με συνέπεια οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του ‘‘συμπαγούς’’ πετρώματος.

Με βάση την αντοχή ( $\sigma_{ci}$ ), τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

**ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ**  
(κατά ISRM, 1987)

| Αντοχή $\sigma_{ci}$ (Μρα) | Κατηγορία πετρώματος | Περιγραφή  |
|----------------------------|----------------------|--|
| >250                       | Εξαιρετικά ισχυρό    | Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί                              |
| 100-250                    | Πολύ ισχυρό          | Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί        |
| 50-100                     | Ισχυρό               | Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί |
| 25-50                      | Μετρίως ισχυρό       | Δε χαράσσεται με μαχαίρι                                     |
| 5-25                       | Ασθενές              | Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι                                |
| 1-5                        | Πολύ ασθενές         | Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με νύχι         |
| 0.25-1                     | Εξαιρετικά ασθενές   | Χαράσσεται με νύχι   |

Η μηχανική αντοχή του ‘‘συμπαγούς’’ πετρώματος εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και το βάθος αποσάθρωσης. Με βάση το βαθμό αποσάθρωσης, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

**ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ**  
(κατά την British Geological Society, 1970)

| Κατηγορία πετρώματος | Περιγραφή              |
|----------------------|------------------------|
| Υγιές (F)            | Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης |

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Ελάχιστα αποσαθρωμένο<br>(F.W) | Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών   |
| Ολίγον αποσαθρωμένο<br>(S.W)   | Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού                             |
| Μετρίως αποσαθρωμένο<br>(M.W)  | Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα                                  |
| Έντονα αποσαθρωμένο<br>(H.W)   | Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού   |
| Πλήρως αποσαθρωμένο<br>(C.W)   | Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής                              |
| Έδαφος (R.S)                   | Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός) |

### ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχώμαζας (Rock Quality Designation- RQD) αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχώμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχίων μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

$$RQD = \frac{\sum (\text{μήκος τεμαχίων μήκους} > 10\text{cm})}{\text{Ολικό μήκος του πυρήνα}} \times 100\%$$

Ο δείκτης RQD αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχομάζας αν και παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Για παράδειγμα ένας πυρήνας μήκους 101mm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμία αύξηση του δείκτη RQD.

Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη) αλλά και σε ‘‘λεπτομέρειες’’ της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, το είδος της κοπτικής κεφαλής κλπ. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.

Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχομάζας. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πού υψηλότερο δείκτη RQD απ’ ότι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες.

## ΑΣΥΝΕΧΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

Οι ασυνέχειες (discontinuities) της βραχομάζας μπορεί να οφείλονται σε:

Ρήγματα (faults)

Διακλάσεις (joints)

Επιφάνειες στρώσης (bedding planes)

Επιφάνειες σχιστότητας (foliation)

Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχομάζας καθορίζεται από:

Τον αριθμό των συστημάτων (οικογενειών) ασυνεχειών (number of joint sets). Κάθε σύστημα ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες του ίδιου τύπου. Για παράδειγμα οι επιφάνειες στρώσης αποτελούν ένα σύστημα ασυνεχειών.

Την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος (joint spacing). Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται ως εξής:

| Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (m) | Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών |
|------------------------------------|---|
| >2m                                | Μεγάλη  |
| 0.6-2m                             | Αρκετά μεγάλη                                     |
| 0.2-0.6m                           | Μέση  |
| 0.06-0.2m                          | Μικρή   |
| <0.06m                             | Πολύ μικρή  |

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχομάζας καθορίζεται από:



Την τραχύτητα (roughness). Αναλόγως του βαθμού τραχύτητας, οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως: πού τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές (slickensided).

Το βαθμό εξαλλοίωσης (alteration) των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζεται από τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχίων:

(α) Μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή)

(β) Ολίσθηση έως 100mm

(γ) Ολίσθηση άνω των 100mm

Εναλλακτικά, ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (συνήθως προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος):

Πάχος 0, πάχος έως 1mm, πάχος 1-5mm, πάχος άνω των 5mm.

## **ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ**

Η παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, ιδίως σε βραχομάζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχομάζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Σε βραχομάζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με υγιείς ασυνέχειες (χωρίς υλικό πλήρωσης), η δυσμενής επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή έως αμελητέα, με εξαίρεση τις περιπτώσεις βραχομάζας με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο οπότε μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως.

## **1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ**

Η ταξινόμηση της βραχομάζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά την επακόλουθη κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μιας κατηγορίες βραχομάζας (που αντιστοιχούν σε κάποιες τυπικές διατομές σχεδιασμού), με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου

βραχομάζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχομάζας είναι:

Το σύστημα RMR (Bieniawski)

Το σύστημα Q (NGI)

Προφανώς έχει προταθεί από τον Hoek (1995) ένα νέο σύστημα κατάταξης (GSI) το οποίο είναι συμβατό με το σύστημα RMR και βελτιώνει αρκετά από τα μειονεκτήματά του. Στα επόμενα συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων RMR, GSI και Q.

### **1.2.1 Σύστημα RMR Bieniawski**

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976, έλαβε την τελική του μορφή το 1979 (Bieniawski, 1979) και παρουσιάστηκε (χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις) εκ νέου το 1989 (Bieniawski, 1989). Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχομάζας γίνεται με έξι (6) παραμέτρους εκάστη των οποίων λαμβάνεται μια τιμή. Το άθροισμα των τιμών των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Οι έξι παράμετροι και οι τιμές τους είναι:

Αντοχή του ‘συμπαγούς’ πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη ( $\sigma_{ci}$ )

| Αντοχή $\sigma_{ci}$ (Μρα) | Δείκτης R1 |
|----------------------------|------------|
| >250                       | 15         |
| 100-250                    | 12-15      |
| 50-100                     | 7-12       |
| 25-50                      | 4-7        |
| 5-25                       | 2-4        |
| 1-5                        | 1-2        |
| <1                         | 0          |

### **2. Δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD)**

| RQD (%) | Δείκτης R2 |
|---------|------------|
| >90     | 20         |
| 75-90   | 17-20      |
| 50-75   | 13-17      |
| 12-50   | 8-13       |
| <25     | 3          |

### 3. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

| Απόσταση (m) | Δείκτης R3 |
|--------------|------------|
| >2           | 20         |
| 0,6-2        | 15-20      |
| 0,2-0,6      | 10-15      |
| 0,06-0,2     | 8-10       |
| <0,06        | 5          |

### 4. Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών

| Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών                             | Δείκτης R4 |
|---|------------|
| Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση                             | 30         |
| Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm | 25         |
| Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm   | 20         |
| Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm    | 10         |
| Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm                           | 0          |

### 5. Παρουσία υπόγειου νερού

| Παρουσία υπόγειου νερού | Δείκτης R5 |
|-------------------------|------------|
| Καθόλου νερό            | 15         |
| Παρουσία υγρασίας       | 10         |

|                  |   |
|------------------|---|
| Υγρές επιφάνειες | 7 |
| Στάγδην          | 4 |
| Με ροή           | 0 |

#### 6. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

| Προσανατολισμός ασυνεχειών | Δείκτης R6 |
|----------------------------|------------|
| Πολύ ευμενής               | 0          |
| Ευμενής                    | -2         |
| Αδιάφορος                  | -5         |
| Δυσμενής                   | -10        |
| Πολύ δυσμενής              | -12        |

Ο δείκτης RMR υπολογίζεται ως το άθροισμα των δεικτών R1 έως R6. Με βάση τη τιμή του δείκτη RMR, η βραχομάζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

| Κατηγορία βραχομάζας | Τιμές του δείκτη RMR |
|----------------------|----------------------|
| Πολύ καλή - I        | 81-100               |
| Καλή - II            | 61-80                |
| Μέτρια - III         | 41-60                |
| Πτωχή - IV           | 21-40                |
| Πολύ πτωχή - V       | 0-20                 |

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων που συνήθως η βραχομάζα είναι καλής ποιότητας (RMR>40). Για βραχομάζας πτωχής ποιότητας (RMR<40) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Εύρος πιθανών τιμών του δείκτη RMR για πτωχής ποιότητας βραχομάζας

| Παράμετρος | Τιμές | Πιθανές τιμές του δείκτη |
|------------|-------|--------------------------|
| Αντοχή     | <5Mpa | 0, 1, 2                  |
| RQD        | <25%  | 3                        |

|                               |                   |       |
|-------------------------------|-------------------|-------|
| Απόσταση ασυνεχειών           | <15cm             | 5,5,9 |
| Κατάσταση ασυνεχειών          | Με υλικό πλήρωσης | 0, 10 |
| Παρουσία νερού                | Υγρές – Στάγδην   | 4, 7  |
| Προσανατολισμός<br>ασυνεχειών | Αδιάφορος         | -5    |

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι οι πιθανές τιμές του RMR είναι 7-26, δηλαδή 20 τιμές. Επιπλέον, στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη RMR έχει τεράστια σημασία η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών με πιθανό εύρος τιμών 0 ή 10 εάν το πάχος του υλικού πλήρωσεως είναι περισσότερο από 5mm ή λιγότερο από 5mm. Τούτο σημαίνει ότι η τιμή του RMR αλλάζει κατά 10 μονάδες (ποσοστό 50% της συνολικής τιμής) εάν το πάχος του υλικού πλήρωσεως μεταβληθεί από 4.9mm σε 5.1mm. Είναι προφανές ότι η επιρροή αυτή είναι υπερβολική και μάλιστα δεδομένου ότι η εκτίμηση του πάχους του υλικού πλήρωσεως των ασυνεχειών έχει σημαντική αβεβαιότητα.

Κατά τη χρήση του δείκτη RMR για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας συνιστάται ο υπολογισμός του RMR να γίνει με άθροιση μόνον των πέντε πρώτων παραμέτρων, δηλαδή χωρίς συμμετοχή της επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου, δεδομένου ότι η επιρροή αυτή λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου με διαφορετικό τρόπο.

### **1.2.2 Σύστημα GSI**

Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) προτάθηκε από τον Hoek (αρχικών το 1995 και με βελτιώσεις το 1998) και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με  $RMR < 40$  αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχώδων τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχώμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες  $RMR > 40$ , δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχώμαζες με  $RMR < 40$ , το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή




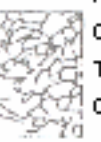
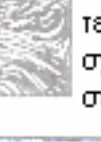
παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτοχρόνως παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων:

- (α) Της δομής της βραχώμαζας, που σχηματίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών.
- (β) Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο Σχήμα 1. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχώμαζας).

**ΠΟΣΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ  
ΚΑΤΑ ΗΟΕΚ – ΜΑΡΙΝΟΣ – ΜΠΕΝΙΣΗ (1998)**

| <b>ΔΕΙΚΤΗΣ<br/>ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ<br/>ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)</b>  |     | ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ                     |   |  |  |   |
|--|-----|---|---|--|--|---|
|  |     | ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ   | ΚΑΛΗ  | ΜΕΤΡΙΑ   | ΠΤΩΧΗ  | ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ  |
| <b>ΔΟΜΗ</b>  |     | Πολύ τραχεία, μη αποσαθρωμένη επιφάνεια (VERY GOOD) | Τραχεία, ελαφρά αποσαθρωμένη επιφάνεια με οξείδωσεις στις επιφάνειες (GOOD) | Απαλή, μετρία αποσαθρ. ή αλλοιωμένη επιφάνεια (FAIR) | Με γραμμές ολίσθησης, πολύ αποσαθρ. με συμπαγείς υμένες ή πληρωμένες με γωνιώδη θραύσματα πετρ | Με γραμμές ολίσθησης, πολύ αποσαθρ. με υμένες ή πληρωμένες με μαλακή άργιλο |
|  <p>Πολύ καλό αλληλοκλείδωμα αδιάταρακτης βραχώμαζας που αποτελείται από κυβικά μπλοκ οριζόμενα από 3 ορθογώνια τεμνόμενες ασυνέχειες (BLOCKY)</p>          | 80  | 70  |   |  |  |   |
|  <p>Αλληλοκλείδωμα μερικώς διαταραγμένης βραχώμαζας με πολλαπλά γωνιώδη μπλοκ σχηματιζόμενα από 4 ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών (VERY BLOCKY)</p> |     | 60  | 50  |  |  |   |
|  <p>Πτυχωμένη &amp; ρηγματωμένη με πολλές αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες σχηματίζοντας γωνιώδη μπλοκ (BLOCKY/ SEAMY)</p>                                     |     |   | 40  | 30   |  |   |
|  <p>Πτωχό αλληλοκλείδωμα, πολύ σπασμένη βραχώμαζα με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών &amp; στρογγυλεμένων μπλοκ (CRUSHED)</p>                                |     |   |   | 20   | 10   |   |
|  <p>Λεπτά φύλλα ασθενούς, συνήθως τεκτονισμένου βράχου. Η πυκνή &amp; έντονη σχιστοποίηση δεν επιτρέπει διαχωρισμό σε μπλοκ (εδώ φύλλα)</p>               | N/A | N/A   |   |  | 5  |   |

Σχήμα 1. Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά το σύστημα GSI. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχομάζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχομάζες με

μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχόμαζας).

### 1.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ Q (NGI)

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien και Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη “μέθοδο NATM”. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από τη σχέση:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$$

όπου:

RQD= δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας

$J_n$  = δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών

$J_r$  = βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών

$J_a$  = βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών

$J_w$  = συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού

SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stress Reduction Factor).

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος ( $RQD / J_n$ ) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν τη βραχόμαζα. Ο δεύτερος λόγος ( $J_r / J_a$ ) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας. Τέλος, ο τρίτος λόγος ( $J_w / SRF$ ) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχόμαζα. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων συνοψίζονται στα επόμενα.

#### 1. Συντελεστής RQD

Χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη RQD. Εάν  $RQD < 10\%$ , χρησιμοποιείται η συμβατική τιμή 10.



## 2. Συντελεστής $J_n$

| Οικογένειες ασυνεχειών                           | Τιμή του $J_n$ |
|--|----------------|
| Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες              | 0.5-1.0        |
| Μια οικογένεια                                   | 2              |
| Μια οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες    | 3              |
| Δύο οικογένειες                                  | 4              |
| Δύο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες   | 6              |
| Τρεις οικογένειες                                | 9              |
| Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες | 12             |
| Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες              | 15             |
| Θρυμματισμένο πέτρωμα                            | 20             |

Σε περιοχές διασταύρωσης σηράγγων, η τιμή του  $J_n$  τριπλασιάζεται. Σε περιοχές στομίων, η τιμή του  $J_n$  διπλασιάζεται.

## 3. Συντελεστής $J_r$

(α) Περίπτωση βραχόμαζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχίων για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

| Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών  | Τιμή του $J_r$ |
|--------------------------------------|----------------|
| Ασυνεχείς διακλάσεις                 | 4              |
| Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις | 3              |
| Ομαλές, κυματώδεις                   | 2              |
| Ολισθηρές (slickensided), κυματώδεις | 1,5            |
| Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες     | 1,5            |
| Ομαλές επίπεδες                      | 1,0            |
| Ολισθηρές επίπεδες                   | 0,5            |

(β) Περίπτωση βραχόμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

| Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών   | Τιμή του $J_r$ |
|---|----------------|
| Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος            | 1,0            |
| Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικώδες υλικό σε επαρκές πάχος ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος | 1,0            |

Στην περίπτωση αυτή η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα, η τιμή του  $J_r$  αυξάνεται κατά 1.

#### 4. Συντελεστής $J_a$

(α) Περίπτωση βραχόμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος.

| Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών                     | Τιμή του $J_a$ |
|---|----------------|
| Υγιή και πλήρως "επουλωμένα" τοιχώματα                                  | 0,75           |
| Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση                                   | 1,0            |
| Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (όχι αργιλικό) υλικό πλήρωσης | 2,0            |
| Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης  | 3,0            |
| Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2mm                       | 4,0            |

(β) Περίπτωση βραχόμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχίων για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

| Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών  | Τιμή του $J_a$ |
|--|----------------|
| Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά  | 4,0            |
| Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο πάχους έως 5mm  | 6,0            |
| Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5mm  | 8,0            |
| Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5mm. Η τιμή του $J_a$ εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης αργίλου | 8-12           |

(γ) Περίπτωση βραχόμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

| Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών                                    | Τιμή του $J_a$ |
|--|----------------|
| Ζώνες από θρυμματισμένο ιλο-αμμώδες υλικό  | 5              |
| Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος) | 6-24           |

#### 5. Συντελεστής $J_w$

| Παρουσία Υπόγειων Υδάτων                                   | Τιμή του $J_w$ |
|--|----------------|
| Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5lt/min     | 1,0            |
| Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης | 0,66           |

|  |                   |
|--|-------------------|
| Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές χωρίς υλικό πλήρωσης | 0,50              |
| Μεγάλη εισροή νερού με απόπλυση του υλικού πλήρωσης                | σημαντική 0,33    |
| Πολύ μεγάλη εισροή νερού μειούμενη με την πάροδο του χρόνου        | βαθμιαίως 0,2-0,1 |
| Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση της πάροδο του χρόνου        | 0,05-0,1          |

## 6. Συντελεστής SRF

(α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχομάζας.

| Περίπτωση  | Τιμή του SRF |
|--|--------------|
| Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)  | 10           |
| Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας <50m)  | 5            |
| Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας >50m)  | 2,5          |
| Άφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος) | 7,5          |
| Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας <50m)   | 5            |
| Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας >50m)   | 2,5          |
| Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)                                       | 5            |

(β) Περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων

| Περίπτωση   | $\sigma_c/\sigma_1$ | $\sigma_\theta/\sigma_1$ | Τιμή του SRF |
|---|---------------------|--------------------------|--------------|
| Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ασυνέχειες      | >200                | >13                      | 2,5          |
| Μέσες τάσεις  | 200-10              | 13-0,66                  | 1,0          |
| Υψηλές τάσεις πολύ "σφιχτή δομή"                      | 10-5                | 0,66-0,33                | 0,5-2,0      |
| Μέτρια "εκτίναξη" σκληρού πετρώματος, μετά από 1 ώρα  | 5-2,5               | 0,33-0,16                | 5-10         |
| Έντονη και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος | <2,5                | <0,16                    | 10-20        |

(γ) Συνθλιβόν πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις λόγω πολύ υψηλών τάσεων.

| Περίπτωση                           | Τιμή του SRF |
|-------------------------------------|--------------|
| Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 5-10         |
| Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 10-20        |

(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού.

| Περίπτωση                           | Τιμή του SRF |
|-------------------------------------|--------------|
| Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 5-10         |
| Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης | 10-15        |

Με βάση το δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q, η βραχόμαζα μπορεί να καταταγεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

#### ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΟ Q- SYSTEM

| Q        | Κλάση  | Χαρακτηρισμός    |
|----------|--------|------------------|
| >400     | Q-Ia   | Εξαιρετικά καλή  |
| 100-400  | Q-Ib   | Πάρα πολύ καλή   |
| 40-100   | Q-II   | Πολύ καλή        |
| 10-40    | Q-IIIa | Καλή             |
| 4-10     | Q-IIIb | Μέτρια           |
| 1-4      | Q-IVa  | Πτωχή            |
| 0,0-1    | Q-IVb  | Πολύ πτωχή       |
| 0,01-0,1 | Q-Va   | Πάρα πολύ πτωχή  |
| <0,01    | Q-Vb   | Εξαιρετικά πτωχή |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντοχή ενός υλικού ορίζεται η ικανότητά του να ανθίσταται σε εξωτερικές δυνάμεις. Η αντοχή οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής των ορυκτών του πετρώματος, του συνδετικού των υλικών, καθώς και στις δυνάμεις τριβής που εμποδίζουν την ολίσθηση. Στην πράξη προσδιορίζονται πειραματικά τρεις αντοχές του πετρώματος, ήτοι η αντοχή σε θλίψη, σε εφελκυσμό και σε διάτμηση. Ένα μεγάλο ποσό πληροφόρησης σχετικά με την αντοχή των άρρηκτων πετρωμάτων έχει δημοσιευθεί τον προηγούμενο αιώνα. Στην περίπτωση των εργαστηριακών δοκιμών ο όρος αστοχία του πετρώματος ταυτίζεται τις περισσότερες φορές με το ξεπέρασμα της αντοχής του. Ένα κριτήριο αστοχίας εκφράζεται επομένως συνήθως με τη μορφή:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (1)$$

Το πρώτο κριτήριο δόθηκε αρχικά από τον Coulomb το 1773, ο οποίος διατύπωσε την άποψη ότι η αστοχία επέρχεται σε διάτμηση μιας επίπεδης επιφάνειας όταν η διατμητική τάση σε αυτή ξεπεράσει τη διατμητική της αντοχής, η οποία είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής σε αυτήν τάση. Επέκταση του κριτηρίου έγινε από τον Mohr που θεώρησε ότι τα επίπεδα διάτμησης είναι συζυγή και ότι η παραπάνω συνάρτηση δύναται να είναι μη γραμμική. Ο τελευταίος μάλιστα έδωσε τη δυνατότητα γραφικής παρουσίασης των παραπάνω κριτηρίων στο επίπεδο  $\sigma$ - $\tau$ .

Το 1921, για τη μαθηματική διερεύνηση της θραύσης των ψαθυρών υλικών, ο Griffith θεώρησε ότι αυτή αρχίζει όταν ξεπερασθεί η εφελκυστική αντοχή από τάσεις που δημιουργούνται στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών στο υλικό. Εν συνεχεία αναπτύχθηκαν πιο πολύπλοκα μη γραμμικά εμπειρικά κριτήρια. Ο Πίνακας 1 δίνει μερικά από τα σημαντικότερα σύγχρονα κριτήρια.

Πίνακας 1. Σύγχρονα κριτήρια αστοχίας των πετρωμάτων.

$$\sigma_1 = \sigma_c + \alpha \cdot \sigma_3 \text{ (Mohr- Coulomb; Bodonyi, 1970)}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8 \cdot \sigma_1 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \text{ (Griffith, 1924)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_c \cdot \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t}\right)^b \text{ (Balmer, 1952; Johnston, 1985; Sheorey et al., 1989)}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = a + b \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \text{ (Fairhurst, 1964)}$$

$$\sigma_1(+)= \sigma_c + \sigma_3 + \alpha \cdot \sigma_3^b \text{ (Bobbs, 1964)}$$

$$\sigma_1(+)= \sigma_c + \alpha \cdot \sigma_3^b \text{ (Murrel, 1965)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \alpha \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)^b \text{ (Franklin, 1971)}$$

$$\frac{\sigma_1(+)}{\sigma_c} = \alpha + b \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right) \text{ (Bieniawski, 1974)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + \sigma_c^2)^{1/2} \text{ (Hoek – Brown, 1980)}$$

$$\frac{\sigma_1(+)}{\sigma_c} = 1 + \alpha \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3}\right)^b \text{ (Ramamurthy et al., 1985)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \alpha \cdot \sigma_c \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\right)^b \text{ (Yoshida, 1990)}$$

## 2. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ MOHR – COULOMB

Πρόκειται για το γραμμικό κριτήριο Coulomb, το οποίο αναφέρεται και ως κριτήριο των Coulomb- Navier, ή Mohr – Coulomb. Είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για την



προσομοίωση της αστοχίας των γεωλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν (Σχήμα 1) η διατμητική τάση  $\tau$  σε ένα οιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης  $\sigma_n$ , στο επίπεδο αυτό.

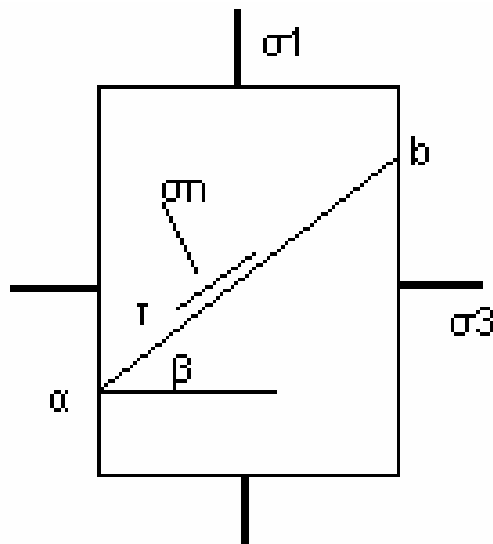
### 2.1.1 ΑΝΤΟΧΗ ΙΣΟΤΡΟΠΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Αν θεωρηθεί ότι η αντοχή είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης φόρτισης, τότε το πέτρωμα θεωρείται ισότροπο ως προς την αντοχή.

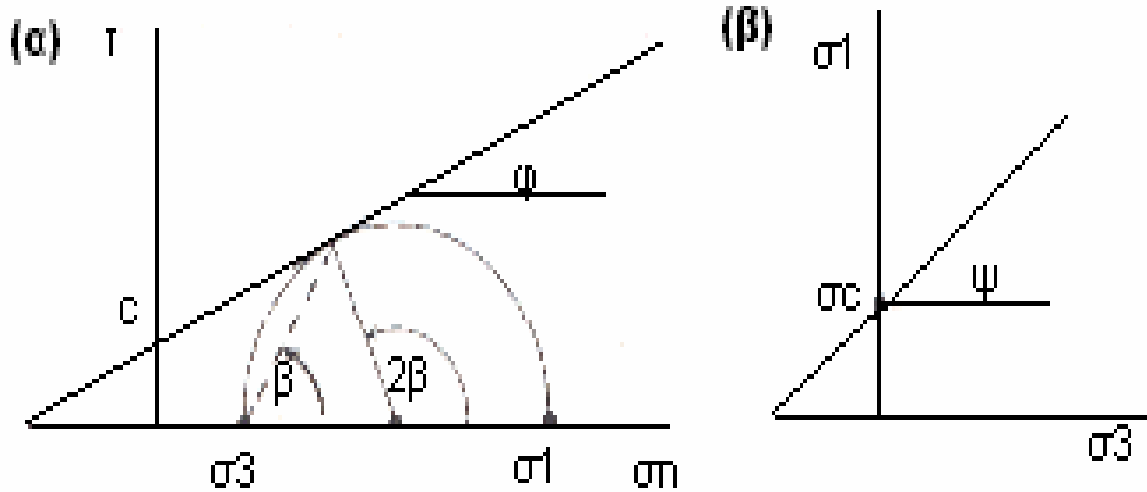
### 2.1.2 Γραμμικό κριτήριο

Λόγω της γραμμικότητας του κριτηρίου, η αντοχή καθορίζεται από δυο παραμέτρους. Αυτές, στο επίπεδο ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) είναι η κλίση  $\phi$  και η τεταγμένη επί την αρχή  $c$ . Η γωνία θραύσης δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (2)$$



Σχήμα 1. Εξαίτηση δοκιμίου.



Σχήμα 2. Περιβάλλουσα Mohr – Coulomb.

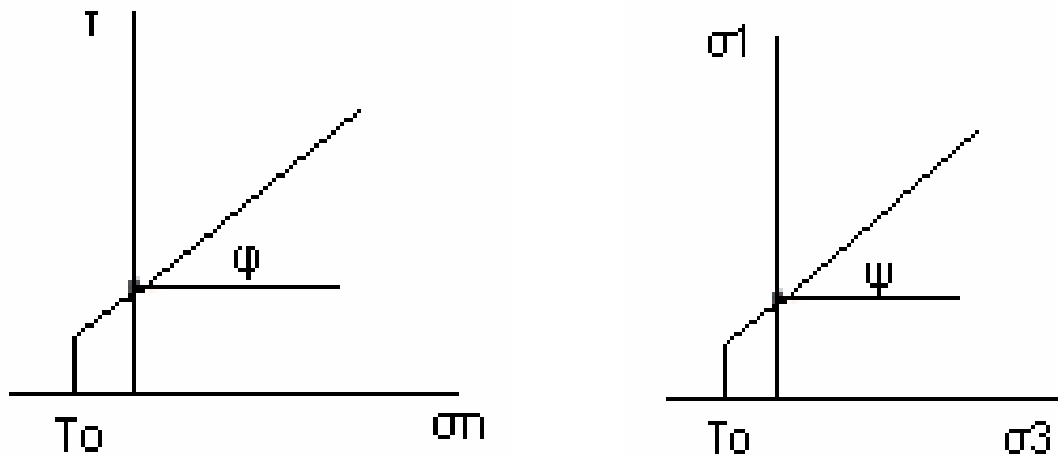
Η περιβάλλουσα του κριτηρίου (Σχήμα 2), λόγω της θεώρησής του, δίνεται συνήθως σε άξονες τ-σ<sub>n</sub>. Εν τούτοις συχνά είναι χρήσιμη η διατύπωσή του σα συνάρτηση των κυρίων τάσεων σ<sub>1</sub> και σ<sub>3</sub>, όπου σ<sub>1</sub> η μέγιστη και σ<sub>3</sub> η ελάχιστη κύρια τάση. (Σημειώνεται ότι η θλίψη έχει θετικό πρόσημο). Παρακάτω δίνεται το κριτήριο με τις δύο ισοδύναμες μορφές του.

$$\begin{aligned} \tau &= c + \sigma_n \cdot \tan \phi \\ \sigma_1 &= \sigma_c + \sigma_3 \cdot \tan \psi \end{aligned} \quad (3)$$

όπου ψ η κλίση και σ<sub>c</sub> η τεταγμένη επί την αρχή στο επίπεδο σ<sub>1</sub> - σ<sub>3</sub>. Οι κλίσεις και οι τεταγμένες στα δυο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} &= \tan \psi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = \tan^2 \beta \\ \sin \phi &= \frac{\tan \psi - 1}{\tan \psi + 1} = \tan \left( \psi - \frac{\pi}{4} \right) \\ \sigma_c &= \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}, \sigma_t = -\frac{\sigma_c}{\tan \psi} = -\frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} \\ c &= \frac{\sigma_c}{2 \sqrt{\tan \psi}} \end{aligned} \quad (4)$$

Η τετμημένη (στον άξονα των  $\sigma$ ) της περιβάλλουσας επί την αρχή, είναι θεωρητικά η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Εν τούτοις, τα πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι η εφελκυστική αντοχή είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μικρότερη από την προσδιοριζόμενη από την παραπάνω τετμημένη. Για το σκοπό αυτό γίνεται απότμηση (Σχήμα 3) της περιβάλλουσας στην τιμή της προσδιοριζόμενης εφελκυστικής αντοχής  $T_0$  του πετρώματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα εν τούτοις δείχνουν μια εγγενή καμπύλη περιβάλλουσα, της μορφής που φαίνεται στο Σχήμα 4, στην οποία δεν είναι πάντα εύκολο να προσαρμοσθεί επιτυχώς το κριτήριο Mohr – Coulomb με απότμηση. Επομένως, καθίσταται συχνά απαραίτητος ο καθορισμός μίας καμπύλης περιβάλλουσας, η οποία θα είναι αντιπροσωπευτική των πειραματικών αποτελεσμάτων στο εργαστήριο ή επιτόπου.



Σχήμα 3. Απότμηση εφελκυσμού.



Σχήμα 4. Αντοχή ισότροπων πετρωμάτων.

Τυπικοί κύκλοι πετρώματος και η 'εγγενής καμπύλη' του Jaeger.

1-Μονοαξονικός εφελκυσμός, 2-Μονοαξονική θλίψη, 3-Τριαξονική θλίψη.

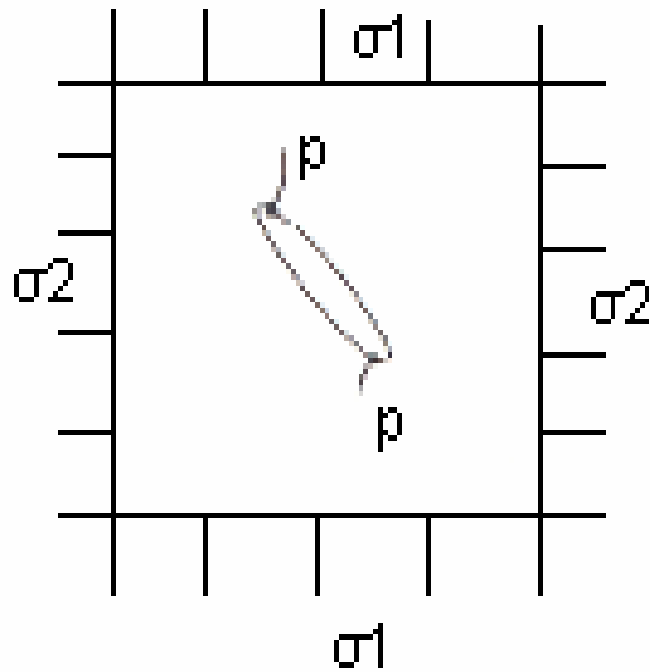
### 3. ΚΡΙΤΗΡΙΟ GRIFFITH

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα για την ανάλυση της θραύσης των πετρωμάτων πραγματοποιήθηκε από τον Murrell το 1958 που υποστήριξε ότι το κριτήριο θραύσης του Griffith του 1924 μπορούσε να εφαρμοστεί και στα πετρώματα. Η μαθηματική διερεύνηση της θραύσης των ψαθυρών υλικών, όπως το γυαλί, βασίστηκε στη θεώρηση του Griffith το 1920 ότι αυτή αρχίζει όταν ξεπεραστεί η εφελκυστική αντοχή, από τάσεις που δημιουργούνται στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών στο υλικό. Οι μικροσκοπικές αυτές ατέλειες του συμπαγούς πετρώματος μπορεί να είναι μικρές θραύσεις ή όρια των κόκκων. Τη θεωρία ο Griffith την εφάρμοσε αρχικά σε πλάκα, ομοιόμορφου πάχους, υποκείμενη σε μονοαξονική εφελκυστική τάση, που περιείχε ελλειπτική ρωγμή με άξονα κάθετο στη διεύθυνση φόρτισης. Εν συνεχεία επέκτεινε τη θεωρία του στη διάδοση της ρωγμής (Σχήμα 5) μέσα σε μια πλάκα που υπόκειται σε θλιπτικές τάσεις. Κάνοντας θεώρηση συνθηκών επίπεδης έντασης, κατέληξε στη σχέση:

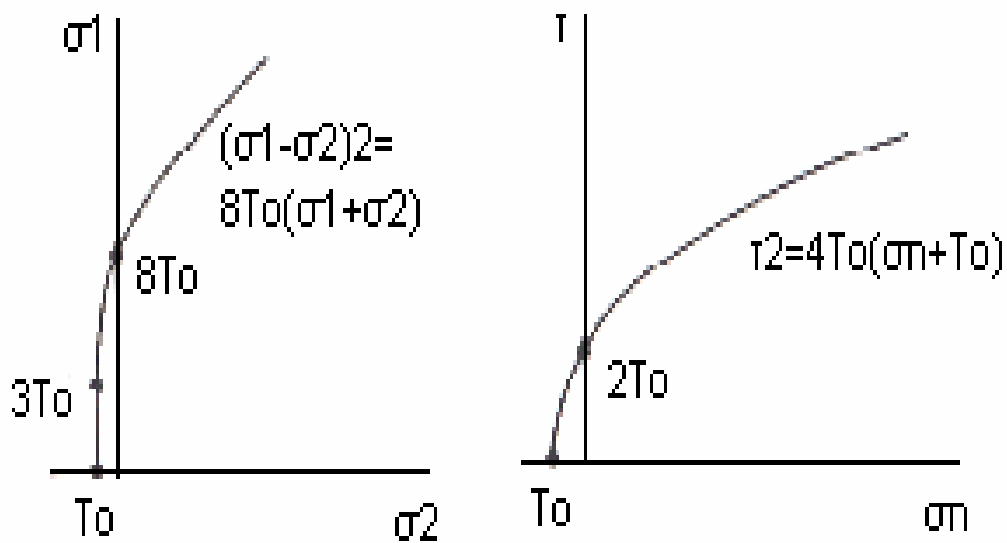
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 8 \cdot T_o \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad (5)$$

όπου  $T_o$  (θετική τιμή =  $-\sigma_{ii}$ ) η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή του άθραυστου υλικού. Στο Σχήμα 6 φαίνεται η περιβάλλουσα Griffith σε άξονες κυρίων τάσεων, καθώς και σε διατμητικών και ορθών τάσεων. Η θεωρία, όπως φαίνεται και από το σχήμα, προβλέπει τη μονοαξονική θλιπτική τάση κατά την επέκταση της ρωγμής, ίση με οκτώ φορές την εφελκυστική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Το κριτήριο εκφραζόμενο με συντεταγμένες την ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο της ρωγμής, γίνεται:

$$\tau_f^2 = 4 \cdot T_o \cdot (\sigma_n + T_o) \quad (6)$$



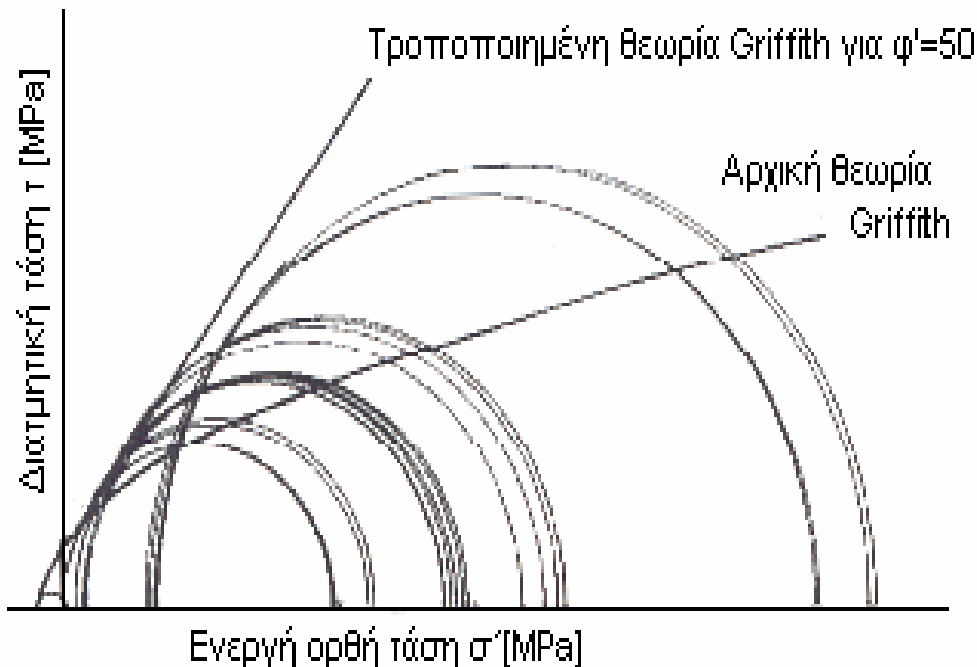
Σχήμα 5. Ιδεατή ρωγμή.



Σχήμα 6. Περιβάλλουσα αστοχίας Griffith.

Μολονότι το κριτήριο Griffith δίνει μια περιβάλλουσα αντοχής της μορφής που παρατηρείται γενικά κατά την εξαίτηση δοκιμίων πετρώματος, εν τούτοις δεν προσφέρει ένα καλό ομοίωμα συμπεριφοράς. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην αγνόηση των δυνάμεων τριβής σε κλειστές ρωγμές. Τροποποιήσεις του κριτηρίου, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η τριβή τις

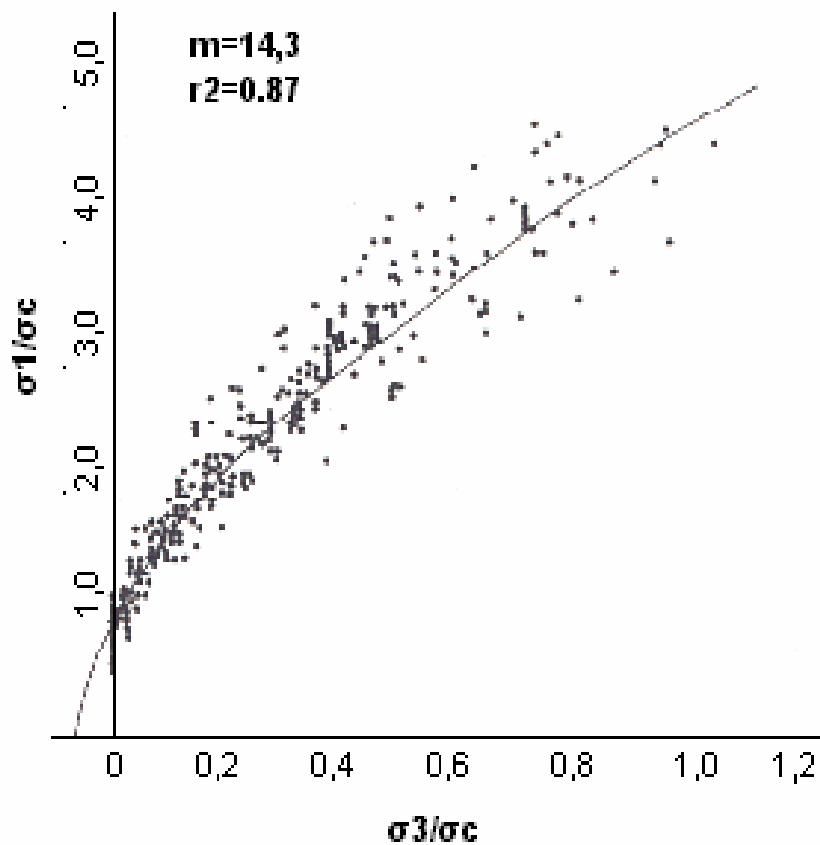
κλεισμένες ρωγμές, καθώς και η επίδραση της ενδιάμεσης πίεσης, δεν οδήγησε σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα7).



Σχήμα 7. Προσαρμογή περιβάλλουσας αρχικής και τροποποιημένης θεωρίας Griffith.

#### 4. ΚΡΙΤΗΡΙΟ HOEK – BROWN

Η αποτυχία της προσαρμογής μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών αντοχής με τις τροποποιημένες σχέσεις που βασίζονται στη θεωρία του Griffith, οδήγησε στην αναζήτηση εμπειρικών σχέσεων στις οποίες η θεωρία του Griffith αποτελεί ένα αρχικό σημείο σύλληψης μόνο. Το κριτήριο Griffith είχε μια μόνο παράμετρο προς καθορισμό, την εφελκυστική αντοχή  $T_0$ . Οι Hoek – Brown βρήκαν ότι τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής αντοχής βραχωδών γεωυλικών, όπως για παράδειγμα αυτών που φαίνονται στο Σχήμα 8, δύνανται να εκφραστούν ικανοποιητικά από την επόμενη σχέση που έχει δύο ελεύθερες μεταβλητές προς καθορισμό:



Σχήμα 8. Προσαρμογή του κριτηρίου Hoek – Brown σε αποτελέσματα δοκιμών αντοχής ψαμμιτών.

$$\begin{aligned} \sigma'_{1N} &= \sigma_{3N} + \sqrt{m_i \cdot \sigma_{3N} + 1} \\ \sigma'_{1N} &= \frac{\sigma'_1}{\sigma_{ci}} \\ \sigma'_{3N} &= \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} \end{aligned} \quad (7)$$

όπου:

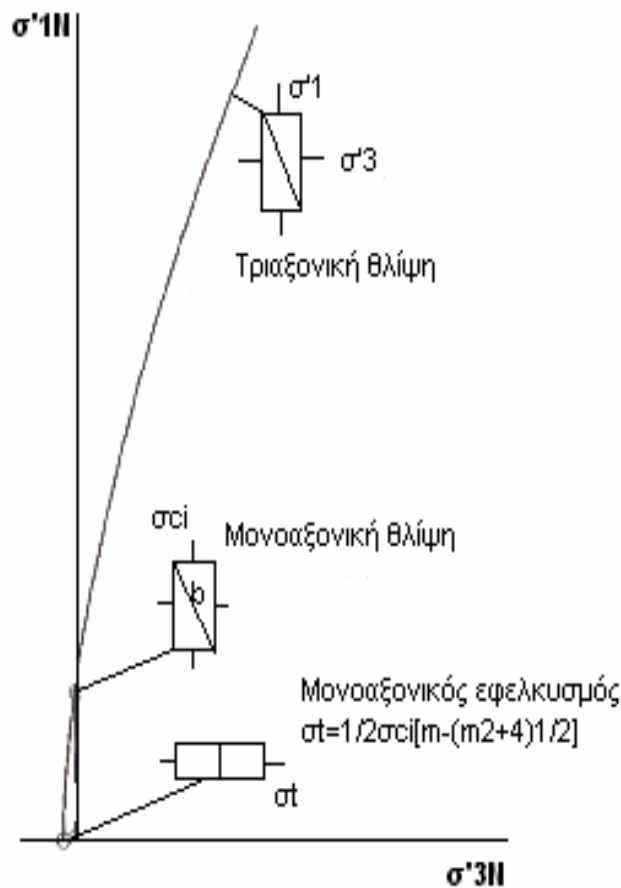
$m_i$  : παράμετρος του άρρηκτου πετρώματος που χαρακτηρίζεται από το είδος του και κυμαίνεται μεταξύ ~5 και 35, και

$\sigma_{ci}$ : η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.

Μηδενίζοντας την κύρια θλιπτική τάση υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή του πετρώματος,  $\sigma_{ti}^{HB}$ :

$$\sigma_{tiN}^{HB} = \frac{\sigma_{ti}^{HB}}{\sigma_{ci}} = \frac{1}{2} \cdot \left( m_i - \sqrt{m_i^2 + 4} \right) \quad (4)$$

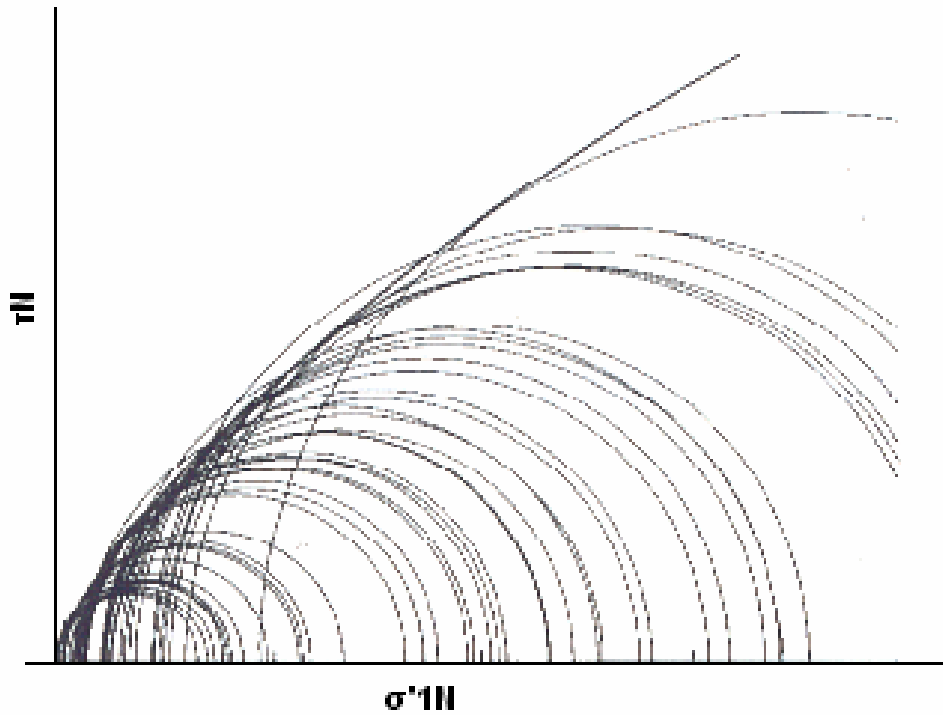
Στο Σχήμα 9 σχεδιάζεται η περιβάλλουσα του κριτηρίου. Επίσης στο Error! Reference source not found. φαίνεται η αλλαγή της κλίσης και η μετατόπιση της περιβάλλουσας για μεταβολή της παραμέτρου  $m_i$ . Από τα διαγράμματα αυτά διακρίνεται η ομοιότητα της παραμέτρου  $m_i$  με την παράμετρο  $\phi$  του κριτηρίου Mohr – Coulomb.



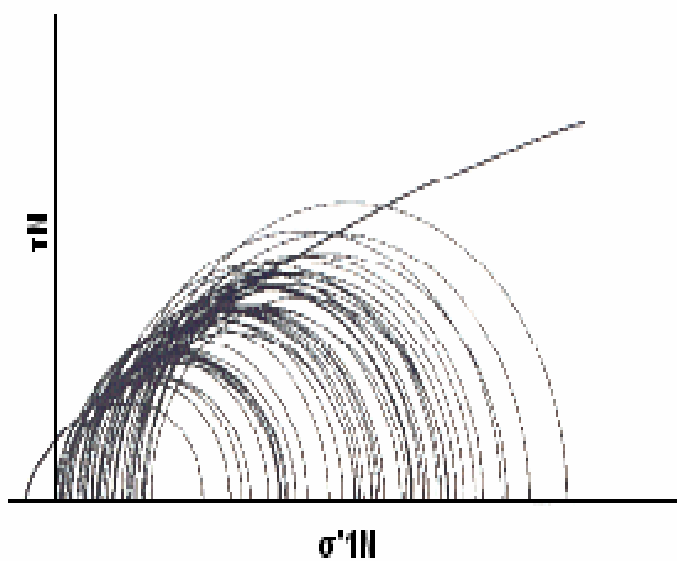
Σχήμα 9. Εμπειρικό κριτήριο αντοχής πετρώματος Hoek – Brown.



Στο Σχήμα 10 φαίνεται η πολύ καλή προσαρμογή του κριτηρίου στα αποτελέσματα δοκιμών σε 5 διαφορετικούς γρανίτες. Αντίθετα, στο Σχ. 11 φαίνεται η χειρότερη προσαρμογή του κριτηρίου σε 11 διαφορετικούς ασβεστόλιθους.

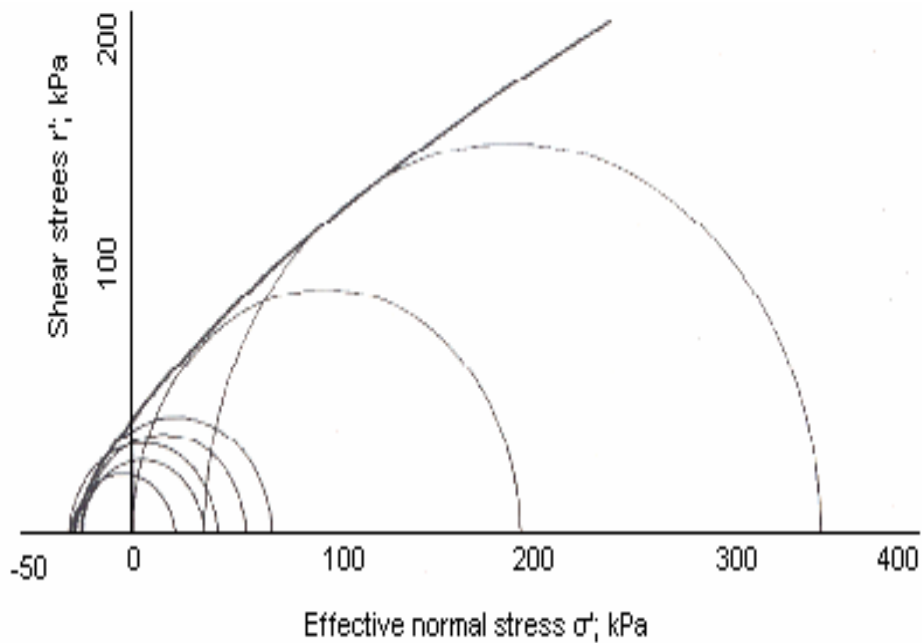


Σχήμα 10. Κύκλοι Mohr για 5 γρανίτες.

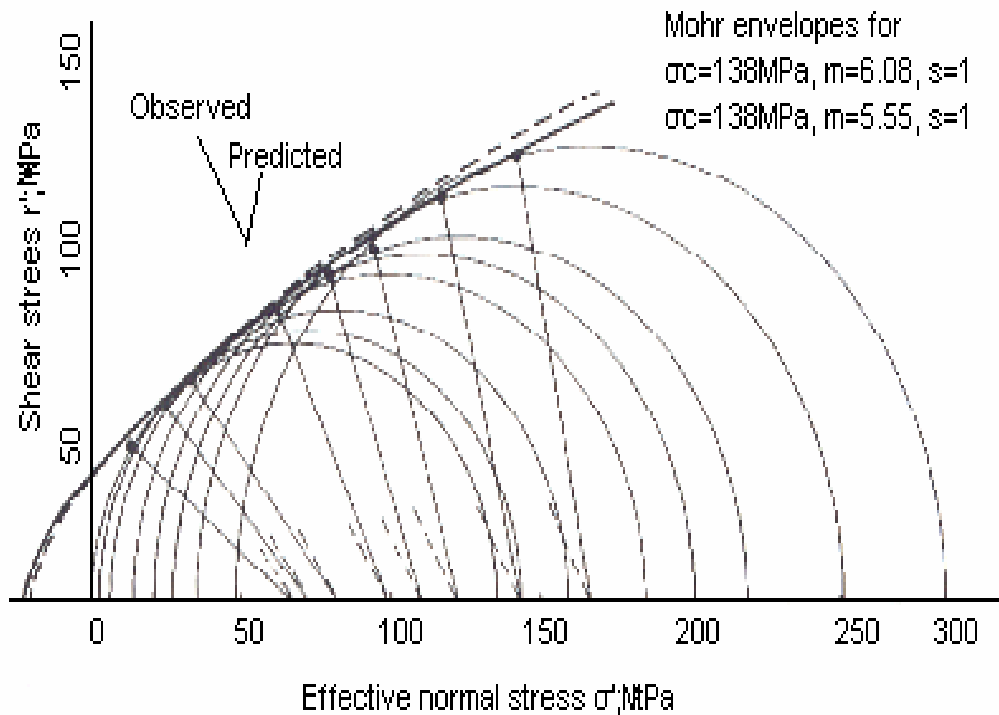


Σχήμα 11. Κύκλοι Mohr για 11 ασβεστόλιθους.

Στο Σχήμα 12 φαίνεται η καλή προσαρμογή του κριτηρίου στα αποτελέσματα δοκιμών σε άργιλο του Λονδίνου. Στο Σχ. 13 παρατηρούμε ότι αν σχεδιάσουμε την περιβάλλουσα που εφάπτεται στους κύκλους Mohr που προκύπτουν από δοκιμές σε μάρμαρο του Tennessee, τα επίπεδα θραύσης που προκύπτουν από το διάγραμμα δεν ταυτίζονται με αυτά που παρατηρήθηκαν στο πείραμα. Επομένως, είναι δυνατό να σχεδιαστεί μια άλλη περιβάλλουσα με κριτήριο την διέλευση της περιβάλλουσας από τα επίπεδα αυτά. Παρατηρούμε μια μικρή διαφορά μεταξύ των δυο περιβαλλουσών.



Σχήμα 12. Κύκλοι Mohr για την άργιλο του Λονδίνου.



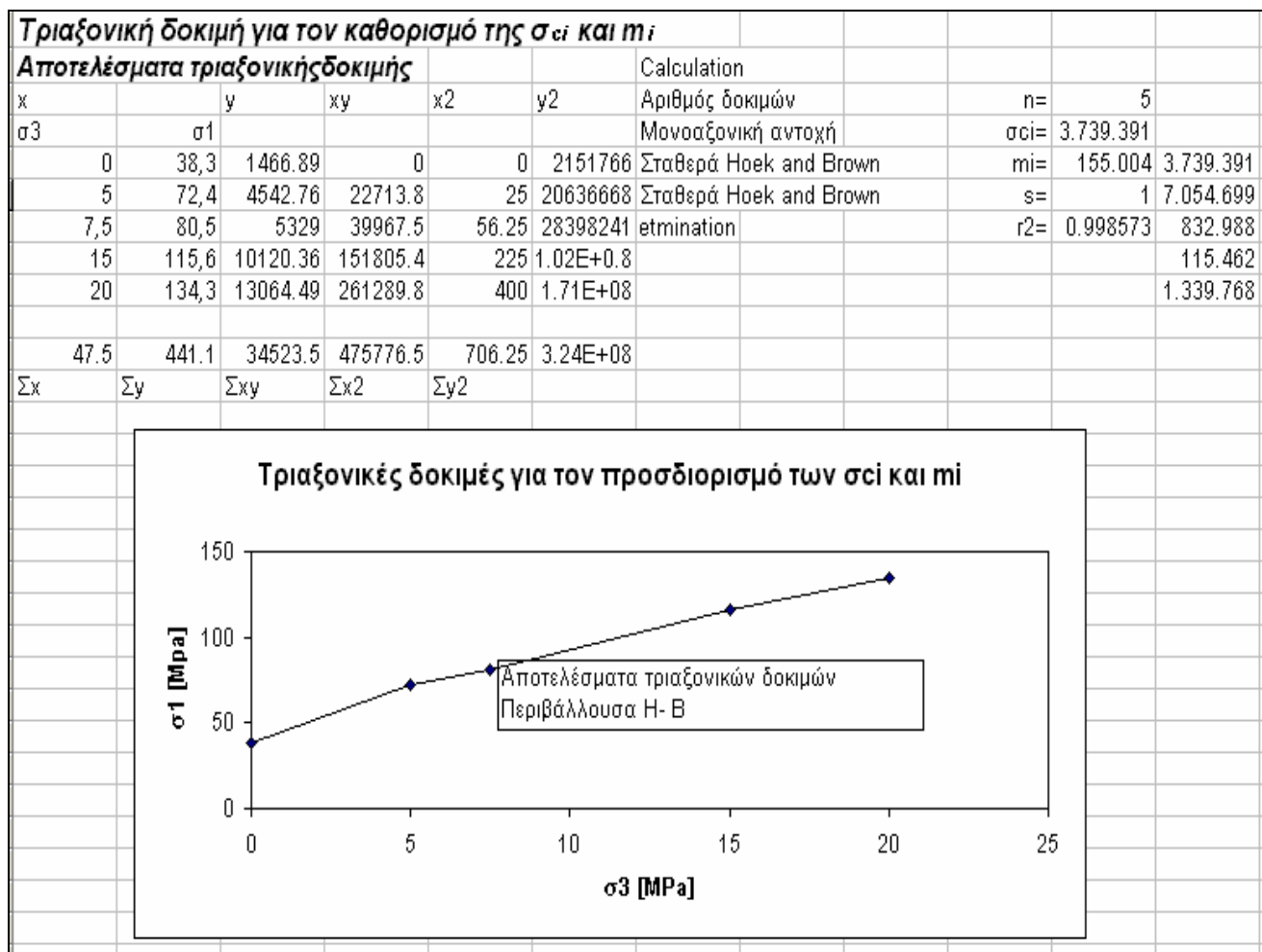
Σχήμα 13. Σχεδίαση περιβαλλουσών με κριτήριο την εφαπτόμενη ή τη διεύθυνση του επίπεδου θραύσης.

Εφόσον δεν υπάρχουν εργαστηριακά δεδομένα, η εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής  $\sigma_{ci}$  μπορεί να γίνει με βάση την επιτόπου εκτίμηση της αντοχής (Πίνακας 2), του δε  $m_i$  με βάση την υφή και τον τύπο του πετρώματος (Πίνακας 3).

Εφόσον υπάρχουν εργαστηριακά δεδομένα, τότε η εκτίμηση γίνεται με βέλτιστη προσαρμογή του κριτηρίου σε αυτά. Στην περίπτωση αυτή το κριτήριο ξαναγράφεται με τη μορφή:

$$(\sigma'_1 + \sigma'_3 = y = (m \cdot \sigma_{ci})) \cdot x + \sigma_{ci}^2; x = \sigma'_3 \quad (9)$$

Ο υπολογισμός των  $\chi$  και  $\nu$  γίνεται με γραμμική παλινδρόμηση (βλέπε Σχήμα 14).



Σχήμα 14. Επεξεργασία αποτελεσμάτων τριαξονικής δοκιμής για τον καθορισμό των  $\sigma_{ci}$  και  $m_i$ .

Πίνακας 2. Επιτόπου εκτίμηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής  $\sigma_{ci}$ .

| Β<br>α<br>θ<br>μ<br>ό<br>ς | Πέτρωμα    | Μονοαξονική<br>θλιπτική<br>αντοχή<br>[MPa] | Δείκτης<br>σημειακής<br>φόρτισης<br>[MPa] | Επιτόπου<br>εκτίμηση της<br>αντοχής με<br>βάση το<br>αποτέλεσμα<br>χτυπήματος με<br>γεωλογικό<br>σφυρί | Παραδείγματα |
|----------------------------|------------|--|---|--|--------------|
| R6                         | Εξαιρετικά | >250                                       | >10                                       | Το πέτρωμα   | Υγής         |

|    |                  |         |      |   |   |
|----|------------------|---------|------|---|---|
|    | ισχυρό           |         |      | αντηχεί.<br>Μικρά<br>θραύσματα.   | βασάλτης,<br>κερατόλιθος,<br>διαβάσης,<br>γενύσιοας,<br>γρανίτης,<br>χαλαζίτης.   |
| R5 | Πολύ ισχυρό      | 100-250 | 4-10 | Απαιτούνται<br>πολλαπλά<br>χτυπήματα του<br>δοκιμίου για<br>να θραυσθεί<br>το άρρηκτο<br>πέτρωμα.   | Αμφιβολίτης,<br>ψαμμίτης,<br>βασάλτης,<br>γάββρος,<br>γενύσιος,<br>γρανοδιορίτης,<br>ασβεστόλιθος,<br>μάρμαρο,<br>ρυόλιθος,<br>τόφος. |
| R4 | Ισχυρό           | 50-100  | 2-4  | Θραύεται το<br>δοκίμιο από<br>ένα δυνατό<br>χτύπημα.  | Ασβεστόλιθος,<br>μάρμαρο,<br>φυλλίτης,<br>ψαμμίτης,<br>σχιστόλιθος.   |
| R3 | Μέτρια<br>ισχυρό | 25-50   | 1-2  | Ισχυρό<br>χτύπημα με το<br>οξύ άκρο<br>δημιουργεί<br>εγκοπή 5mm.<br>Χαράζεται<br>από το<br>μαχαίρι. | Πηλίτης,<br>άνθρακας,<br>σκυρόδεσμα,<br>σχιστόλιθος,<br>ιλυόλιθος.  |
| R2 | Ασθενές          | 5-25    | -    | Κόβεται από<br>το μαχαίρι,<br>αλλά πολύ<br>σκληρό για να  | Κιμωλία,<br>ορυκτό, αλάτι,<br>ποτάσα.   |

|    |                    |        |   |   |   |
|----|--------------------|--------|---|---|---|
|    |                    |        |   | διαμορφωθούν τριαξονικά δοκίμια.  |   |
| R1 | Πολύ ασθενές       | 1-5    | - | Θρυμματίζεται από δυνατά χτυπήματα με το οξύ άκρο του γεωλογικού σφυριού<br>Μορφώνεται με το μαχαίρι. | Ισχυρά αποσαθρωμένο ή εξαλλοιωμένο πέτρωμα. |
| R0 | Εξαιρετικά ασθενές | 0.25-1 | - | Χαράζεται με το νύχι.   | Στιφρή άργιλος μέσα σε ρήγματα.             |

Πίνακας 3. Τιμές της σταθεράς  $m_i$  για άρρηκτο πέτρωμα, ανά ομάδα πετρώματος.

Τιμές σε παρενθέσεις είναι εκτιμήσεις.

| Τύπος πετρώματος                | Κατηγορία   | Ομάδα    | Υφή                                      |               |             |               |
|---------------------------------|-------------|----------|--|---------------|-------------|---------------|
|                                 |             |          | Αδρή                                     | Μέτρια        | Λεπτή       | Πολύ λεπτή    |
| I<br>Z<br>H<br>M<br>A<br>T<br>O | Κλαστικό    |          | Κροκα-λοπαγές (22)<br>Γραουβάκης (18)    | Ψαμμίτης (19) | Ιλυόλιθος 9 | Αργιλόλιθος 4 |
|                                 | Μη κλαστικό | Οργανικό | Κιμωλία (Κρητίς)<br>7<br>Άνθρακας (8-21) |               |             |               |

|   |                             |           |  |  |  |                        |
|---|-----------------------------|-----------|--|--|--|------------------------|
| Γ<br>Ν<br>Ε<br>Σ                          |                             | Ανθρακικό | Τεκτονικό<br>λατυπο-παγές<br><br>(20)  | Σπαριτι-κός<br>ασβεστό-<br>λιθος<br><br>(10) | Μοκριτι-<br>κός<br>ασβεστό-<br>λιθος<br><br>8  |                        |
|   |                             | Χημικό    |  | Γυψίτης<br><br>16                            | Ανυδρί-<br>της<br><br>13   |                        |
| ΜΕΤΑ<br>ΜΟΡ<br>ΦΩΜΕ<br>ΝΟ                 | Χωρίς φύλλωση               |           | Μάρμαρο<br><br>9   | Κερατίτης<br><br>(19)                        | Χαλα-<br>ζίτης<br><br>24   |                        |
|   | Με ελαφρά φύλλωση           |           | Μιγματίτης<br><br>(30)   | Αμβιβολήτης<br><br>25-31                     | Μυλο-<br>νίτης<br><br>(6)  |                        |
|   | Με φύλλωση                  |           | Γνεύσιος<br><br>33   | Σχιστόλιθος<br><br>4-8                       | Φυλλίτης<br><br>(10)   | Σχιστόλιθος<br><br>9   |
| Π<br>Υ<br>Ρ<br>Ι<br>Γ<br>Ε<br>Ν<br>Ε<br>Σ | Ανοικτό                     |           | Γρανίτης<br><br>33<br>Γρανο-<br>διορίτης<br><br>(30)<br>Διορίτης<br><br>(28)<br>Γάρββρος<br><br>27 |  | Ρυόλιθος<br><br>(16)<br>Δακίτης<br><br>(17)<br>Ανδεσί-<br>της<br><br>(19)<br>Βασά-<br>λτης<br><br>(17) | Οψι-διανός<br><br>(19) |
|   | Σκούρο                      |           | Νορίτης<br><br>22  | Διολερί-της<br><br>(19)                      |  |                        |
|   | Ηφαιστειακά<br>Πυροκλαστικά |           | Ηφαιστιακό<br>κροκαλοπαγές<br><br>(20)   | Ηφαιστιακό<br>λατοποπαγές<br><br>(18)        | Τόφος<br><br>(15)  |                        |

## 5. ΚΡΙΤΗΡΙΟ JOHNSTON

Παρόμοιο κριτήριο με το προηγούμενο των Hoek – Brown, είναι και αυτό που προτάθηκε από τον Johnston (1985). Οι ενεργές κύριες τάσεις στο κριτήριο αυτό συσχετίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\sigma'_{1N} &= \left( \frac{M}{B} \cdot \sigma'_{3N} + 1 \right)^B \\ \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{ti}} &= -\frac{M}{B}\end{aligned}\tag{10}$$

Η εφελκυστική αντοχή  $\sigma_{ti}$  προκύπτει με αντικατάσταση στο κριτήριο της  $\sigma'_{1N}=0$ ,  $\sigma'_{3N}=\sigma_{ti}$ . Οι παράμετροι  $M$  και  $B$  είναι οι σταθερές του πετρώματος, εκ των οποίων η πρώτη αυξάνεται με τη διατμητική αντοχή, ενώ η δεύτερη μειώνεται. Η παράμετρος  $M$  εξαρτάται και από τον τύπο του πετρώματος. Πλεονεκτήματα της παραπάνω σχέσης είναι ότι μπορεί να προσαρμοσθεί σε ευρύ πεδίο καμπυλών περιβαλλουσών αντοχής με αλλαγή του εκθέτη  $B$ . Εφόσον τεθεί  $B=1$ , η περιβάλλουσα γίνεται ευθεία γραμμή.

Στην περίπτωση αυτή, για:

$$\begin{aligned}M &= \frac{1 + \sin \phi''}{1 - \sin \phi'} \\ \sigma_c &= \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}\end{aligned}\tag{11}$$

το κριτήριο γίνεται Mohr – Coulomb, με συνοχή  $c$  και γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi'$ .

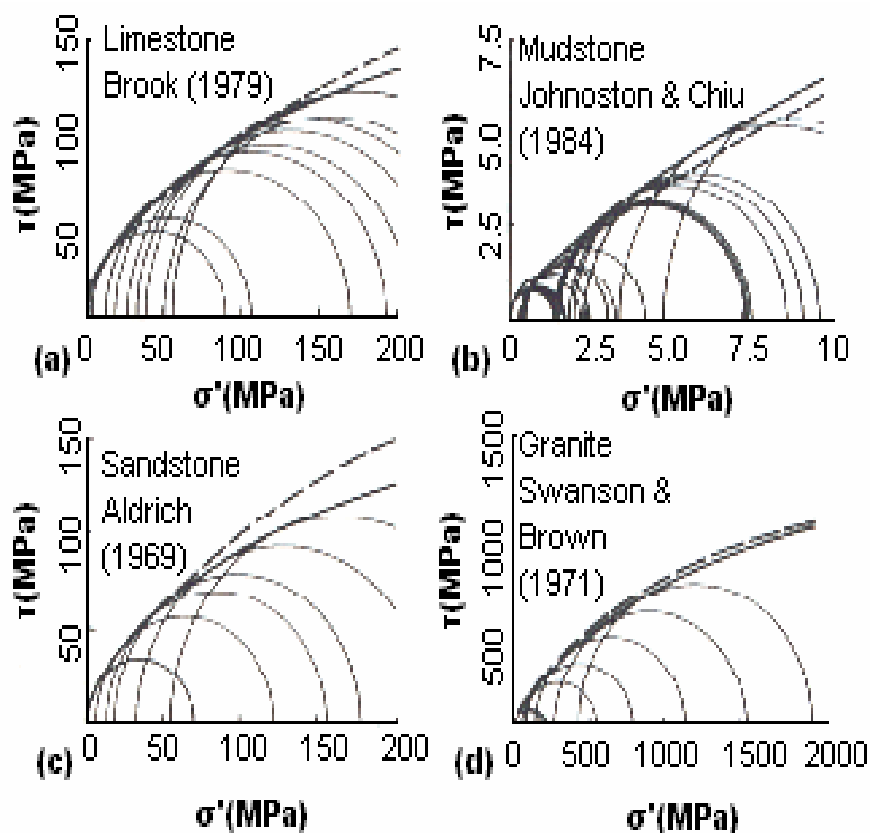
Προσαρμόζοντας, στο κριτήριο ο Johnston (1985), πληθώρα πειραματικών αποτελεσμάτων μέτρησης της μέγιστης αντοχής, σε ενεργές τάσεις, σε αργιλικά εδάφη και πετρώματα, κατέληξε στις παρακάτω αντιπροσωπευτικές παραμέτρους:

$$\begin{aligned}B &= 1 - 0.0172 \cdot (\log \sigma_{ci} [kPa])^2 \\ M &= 2.065 + A \cdot \log \sigma_{ci} [kPa])^2\end{aligned}\tag{12}$$



Παρατηρούμε, ότι όταν  $\sigma_{ci}$  τείνει στο 1kPa ( $\approx 0$ ), τότε  $B$  τείνει στην τιμή 1, και  $M$  στην 2.065, που υπονοεί μια γραμμική περιβάλλουσα με  $\phi'=20$ , που ανήκει σε μαλακή ομαλή στερεοποιημένη άργιλο. Για στιφρές ισχυρά υπερστερεοποιημένες αργίλους τυπική τιμή του  $\sigma_c=200$ kPa, οπότε  $B=0.9$  που προκαλεί ελαφρά καμπύλωση στην περιβάλλουσα, ενώ σε σκληρά πετρώματα τυπική τιμή είναι  $\sigma_c=250$ MPa, οπότε  $B=0.5$ , που αντιστοιχεί στη συνήθη παραβολικού σχήματος περιβάλλουσα.

Γενικευμένες τιμές της παραμέτρου  $A$  εκτιμήθηκαν από τον Johnston (1958), με βάση τη βέλτιστη προσαρμογή μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων από δοκιμές αντοχής, για τις ίδιες κατηγορίες με αυτές του Hoek, ότι είναι: 0.170 για ασβεστόλιθους, 0.231 για πηλίτες, 0.270 για ψαμμίτες και 0.659 για γρανίτες. Πρότεινε επίσης μια γενική μέση τιμή του  $A=0.276$ . Στο Σχήμα 15 φαίνονται οι κύκλοι αστοχίας για τις τέσσερις ομαδοποιημένες κατηγορίες πετρωμάτων και οι περιβάλλουσές τους για βέλτιστη προσαρμογή στα συγκεκριμένα πειράματα (συνεχής γραμμή), καθώς και για τις γενικευμένες τιμές των  $B$  και  $M$  (διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 15. Προσαρμογή περιβάλλουσας αστοχίας Johnston για διάφορους λιθολογικούς τύπους πετρωμάτων.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Balmer G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. *Am. Soc. Test. Mat.* 52., 1269-1271.
- Barton N.R., Lien R. and Lunde J. (1974). Engineering classification of rock masses of the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol 6, No 4, pp 189-239.
- Bieniawski Z.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proc. 4<sup>th</sup> Congress Int. Soc. Of Rock Mechanics*, Montreux, Vol 2, pp 41-48.
- Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley, New York.
- ISRM Suggested Methods (1981). *Rock characterisation, testing and monitoring*, E.T. Brown (Editor), Peergamon Press, Oxford.
- Hoek E. and Brown E.T. (1980). *Underground excavations in Rock*, p.527. London, I.M.M..
- Hoek E., Marinos P. and Benisis M. 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses – The case of the Athens Schist formation. *Bulletin of the Engineering Geology and the Environment*. Vol 57, 151-160.
- Hoek E. (1983). Strength of jointed rock masses, 1983 Rankine lecture, *Geotechnique* 33(3), 187-223.
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, p.215. Balkema, Rotterdam,.
- Parry R.H.G. (1995). *Mohr circles, stress paths and geotechnics*. E & FN SPON
- Sheorey P.R. (1997). *Empirical Rock failure criteria*. A.A. Balkema
- Τσουτρέλης Χ. (1985). *Στοιχεί μηχανικής των πετρωμάτων*, Μέρος Ι., Ε.Μ.Π.