

Μελέτη της Εκσκαψιμότητας των Βράχων(Μέθοδοι, Τεχνικές, Οικονομοτεχνική Θεώρηση)

Rocks Excavatability, Study (Methodology, Techniques, Economotechnical Aspects)

Σκορδάρης Αναστάσιος, Πολιτικός Μηχανικός, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία γίνεται η ανάλυση της έννοιας της εκσκαψιμότητας καθώς και η εισαγωγή κάποιων νέων ορισμών της που διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του προς εκσκαφή γεωυλικού και την επιλεγθείσα μέθοδο εκσκαφής. Στόχος της προσπάθειας αυτής, είναι η ποσοτικοποίηση της εκσκαψιμότητας δηλαδή η έκφρασή της μέσω κάποιων αριθμητικών δεικτών ή μιας κλίμακας διαβάθμισης της ευκολίας εκσκαφής. Σύμφωνα με παραπάνω θα μπορούσε να γίνεται η κοστολόγηση των εκσκαπτικών εργασιών και η εκλογή του οικονομικά αποδοτικότερου εξοπλισμού.

ABSTRACT : In this paper, the analysis of the term excavatability is undertaken and some new terms regarding excavatability are introduced , that are diversified depending on the type of the geomaterial to be excavated and the excavation method selected. The aim of this endeavour is the quantification of excavatability i.e. its expression through certain arithmetic indices or a rating scale of the ease of excavation.

Based on the above, the cost estimate of the excavation works and the selection of the economically most effective equipment could be made.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα περισσότερα έργα υποδομής δομούνται και λειτουργούν σε άμεση επαφή και αλληλεπίδραση με τις κύριες συνιστώσες του γεωλογικού περιβάλλοντος, δηλαδή το μορφολογικό ανάγλυφο, τα γεωυλικά και το νερό. Τα γεωυλικά περιγράφονται ως βραχώδη και γαιώδη (εδάφη και ημίβραχοι). Τα βραχώδη υλικά κατανέμονται από την επιφάνεια και μέχρι βάθους περίπου 30 χλμ., όπου οριοθετείται ο στερεός φλοιός της γης. Τα εδαφικά υλικά αποτελούν το τελικό προϊόν της φυσικής και χημικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων, καλύπτουν μεγάλο τμήμα της επιφάνειας της γης και ανευρίσκονται σε βάθη, που κυμαίνονται από <1 μ. έως λίγες δεκάδες μέτρα. Οι ημίβραχοι αποτελούν τη μεταβατική φυσική κατάσταση μεταξύ των δύο κύριων κατηγοριών (πετρώματα στο στάδιο μερικής αποσάθρωσης). Όλοι οι τύποι των γεωυλικών εγκλείουν νερό, είτε συγκρατούμενο μοριακά ή διακινούμενο ελεύθερα σε διάφορα βάθη.

Ο όρος "βραχώδες υλικό" συχνά εναλλάσσεται με τον όρο "πέτρωμα". Οι δύο

όροι θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του κατά δυνατόν ομοιογενούς υλικού, υπό την έννοια της απουσίας δομικών διαρρήξεων. Σε μεγαλύτερη κλίμακα θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο όρος "βραχώδης μάζα" ή

"βραχώμαζα", που αποτελεί υποτήμα ενός "γεωλογικού σχηματισμού". Στην κλίμακα της βραχώμαζας εμφανίζονται οι περισσότερες μορφές της δομής ενός γεωλογικού σχηματισμού και αντιστοιχεί στην κλίμακα άμεσου ενδιαφέροντος των τεχνικών έργων ¹¹.

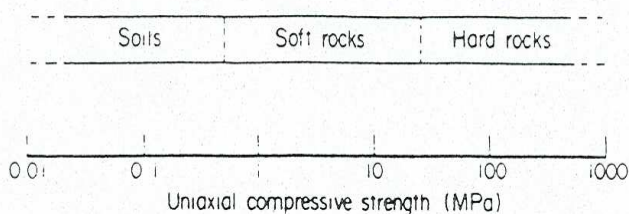
2. ΕΚΣΚΑΨΙΜΟΤΗΤΑ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ

2.1 Κατηγοριοποίηση των γεωυλικών

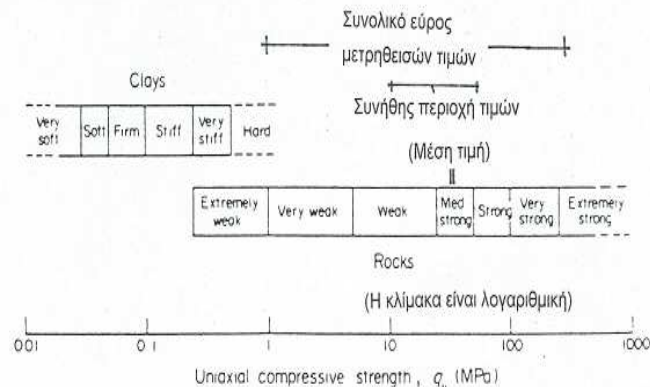
Οι δύο βασικοί όροι **γαιώδες** και **βραχώδες** είναι δόκιμοι και γνωστοί όροι της Ελληνικής γλώσσας αλλά και ειδικότερα του επιστημονικού κλάδου της Γεωτεχνικής Μηχανικής. Ενώ όμως είναι εξαιρετικά απλό και εύκολο σε οποιονδήποτε να χαρακτηρίσει ως γαία μια άμμο ή μια υδαρή άργιλο και ως βράχο έναν υγιή ασβεστόλιθο, είναι πολύ

δύσκολο ακόμη και για ένα ειδικό επιστήμονα να χαρακτηρίσει ως βραχώδες ή ως γαιώδες έναν κατακερματισμένο εξαλλοιωμένο και χαμηλής αντοχής πέτρωμα, (είναι βραχώδες ;), όπως επίσης και μια στεγνή, σκληρή, προφορισμένη, (υπερστερεοποιημένη) αμμώδη άργιλο, (είναι γαιώδες ;).

Στη διεθνή σχετική επιστημονική βιβλιογραφία (Γεωτεχνική Μηχανική, Εδαφομηχανική, Βραχομηχανική) δεν χρησιμοποιείται απ' όλο γνωρίζουμε ο όρος ημίβραχος. Αντ' αυτού χρησιμοποιούνται οι δύο επόμενοι συγγενείς όροι " μαλακός βράχος " και "ασθενής βράχος ", (Soft rock - weak rock). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των όρων αυτών όπως χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία δεν περιορίζονται στην "εξσκαψιμότητα" μόνο, αλλά είναι γενικότερα και έχουν ως κύριο διακριτικό στοιχείο το μέγεθος της Μονοαξονικής θλιπτικής Αντοχής. Σύμφωνα λοιπόν με την κατά την κρίση μας έγκυρη σχετική επιστημονική αναφορά, προερχόμενη από την (International Society for Rock Mechanics), η διάκριση μεταξύ αργιλικών εδαφών και βραχωδών γεωυλικών γίνεται με κριτήριο την μονοαξονική θλιπτική αντοχή (Σχήματα 1-2). Όπως φαίνεται στα σχήματα, μεταξύ των δύο αυτών βασικών κατηγοριών γεωυλικών υπάρχει μια αρκετά ευρεία και ασαφής περιοχή αλληλοκάλυψης. Η περιοχή αυτή, διευρυμένη προς την κατεύθυνση των βράχων (περιλαμβάνουσα δηλαδή τις περιπτώσεις, εξαιρετικά ασθενών, πολύ ασθενών και ασθενών βράχων) και με Μονοαξονική Αντοχή μεταξύ 0,5 και (10-25) MPa, έχει προταθεί από Διεθνείς Σχετικές Επιστημονικές Ενώσεις και Επιτροπές ως περιοχή των "Μαλακών Βράχων", ενώ οι υψηλότερης αντοχής βράχοι χαρακτηρίζονται ως σκληροί.¹³



Σχήμα 1: Διαβάθμιση γεωυλικών με κριτήριο τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή⁵
Figure 1: The continuous geotechnical spectrum



Σχήμα 2: Ταξινόμηση γεωυλικών κατά ISRM με κριτήριο τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή⁹
Figure 2: ISRM classification for geotechnical materials

2.2 Εξσκαψιμότητα των βράχων

Η έννοια της εξσκαψιμότητας, μπορεί γενικά να οριστεί σαν την ευκολία εξσκαφής του βραχώδους υλικού. Η χρήση της απαιτεί τη θεώρηση των ιδιοτήτων του βράχου που περιλαμβάνουν τη Μονοαξονική Θλιπτική Αντοχή (Uniaxial Compressive Strength, UCS), το Δείκτη Σημειακής Φόρτισης (Point Load Index, PLI), την Ειδική Ενέργεια Εργαστηρίου (Laboratory Specific Energy) που προέρχεται από το Core Cuttability Test (Roxborough, 1987, section 3.3.9), το Voest Alpine Rock Cuttability Index (Gehring, 1980-Abb.4a) Επίσης, τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και τα συστήματα κατάταξης βραχώμαζας μπορούν να θεωρηθούν σαν επιπλέον κριτήρια επιλογής του κατάλληλου εξοπλισμού εξσκαφής της.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η εκλογή του κατάλληλου εξοπλισμού, εκτός από τα παραπάνω, έχει άμεση σχέση με τον οικονομικό στόχο της εξσκαφής, το μέγεθος της, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε μηχανήματος και το ρυθμό απόδοσής του. Παρακάτω δίδονται οι διάφοροι ορισμοί της κοπτικότητας (**Cuttability**), χαλαρωσιμότητας (**rippability**) εξσκαψιμότητας ή εξορυξιμότητας (**excavatability**), Διατρησιμότητας (**Drillability**) και χειρωνακτικής εξσκαψιμότητας (**Diggability**) του βράχου.²

Κοπτικότητα (Cuttability): Η ευκολία με την οποία μπορεί να κοπεί ο βράχος από μηχανές συνεχόμενης σημειακής κοπής (roadheader), μηχανές ολομέτωπης εξσκαφής σηράγγων (TBM) και επιφανειακούς εξσκαφείς ορυχείων.

Χαλαρωσιμότητα (Rippability): Η ευκολία με την οποία βράχος μπορεί να αποσυνδεθεί και να σπαστεί από μηχανικό άροτρο ή αναμοχλευτήρα (ripper)

Εκσκαψιμότητα ή Εξορυξιμότητα (Excavatability): Η ευκολία με την οποία το μέτριας έως μεγάλης σκληρότητας πέτρωμα μπορεί να εκσκαφθεί με χρήση μηχανικών μέσων (από υδραυλικούς εκσκαφείς έως μεγάλους επιφανειακούς εκσκαφείς ορυχείων) ή με χρήση εκρηκτικών υλών.

Διατρησιμότητας (Drillability) Η ευκολία διάτρησης τους βράχου από διατρητικό συγκρότημα (drilling jumbo-wagon drill)

Χειρωνακτική Εκσκαψιμότητα (Diggability) Η ευκολία εκσκαφής με χειρωνακτικά μέσα του πολύ ασθενούς έως ασθενούς βράχου.(Ο όρος αυτός αναφέρεται και στην εκσκαφή των εδαφικών γεωυλικών)

(Σκορδάρης Αναστάσιος, Μελέτη της εκσκαψιμότητας των Βράχων (2005), σ.29)

2.3. Ποιοτικοί χαρακτηρισμοί εκσκαψιμότητας του βράχου

Από απόψεως εκσκαψιμότητας (excavatability) του πετρώματος τέσσερις φυσικές ιδιότητες παρουσιάζουν ενδιαφέρον:

α. Σκληρότητα, όπως αυτή εκφράζεται με μία από τις γνωστές κλίμακες σκληρότητας, Π.χ. Shore- Mosh

β. Συνεκτικότητα (toughness), που παρέχει το μέτρο της ικανότητας του πετρώματος να ανθίσταται στη διάδοση μιας ρωγμής.

γ. Ευθραυστότητα (crushability), που εκφράζει τη συνοχή του πετρώματος ως προς το θρυμματισμό του και

δ. Πλαστικότητα, όπως αυτή καταγράφεται σε μία απλή δοκιμή τάσεως βραχύνσεως.

Τα πετρώματα στη φύση παρουσιάζουν ευρύτατες διακυμάνσεις ως προς τις ανωτέρω ιδιότητες και κατά συνέπεια συναντώνται σε μία μεγάλη ποικιλία όσον αφορά στην συμπεριφορά τους από πλευράς εξορύξεως. Το γεγονός αυτό καθιστά δυσχερή την μεταξύ τους σύγκριση και τον χαρακτηρισμό τους από πλευράς εκσκαψιμότητας, η οποία εκφράζει πόσο εύκολα ή δύσκολα εξορύσσεται ένα πέτρωμα με δεδομένα μέσα εκσκαφής (εκρηκτικές ύλες ή μηχανικά μέσα).

Στην πράξη έχει επικρατήσει η διάκριση των βράχων από πλευράς εκσκαψιμότητας σε σκληρούς (hard), ημίσκληρους ή ενδιάμεσους (medium) και μαλακούς βράχους (soft rocks) να γίνεται με κριτήριο την απαίτηση ή όχι εκρηκτικών υλών για την εξορύξή τους. Τα σκληρά πετρώματα απαιτούν κατά κανόνα

χρήση εκρηκτικών υλών για την εξορύξή τους, τα μαλακά δεν απαιτούν, ενώ τα ημίσκληρα μπορεί να εξορυχθούν ανάλογα με τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους με μηχανικό εξοπλισμό κατάλληλης ισχύος ή να απαιτούν κάποια προχαλάρωση με εκρηκτικές ύλες.

Στον πίνακα 1 δίνεται μια τέτοια κατάταξη των πετρωμάτων με βάση τις τρεις προηγούμενες διακρίσεις τους.

Πίνακας 1: Κατάταξη πετρωμάτων με κριτήριο των τρόπων εκσκαφής τους¹⁴

Table 1: Classification of rocks with criterion their way of excavation

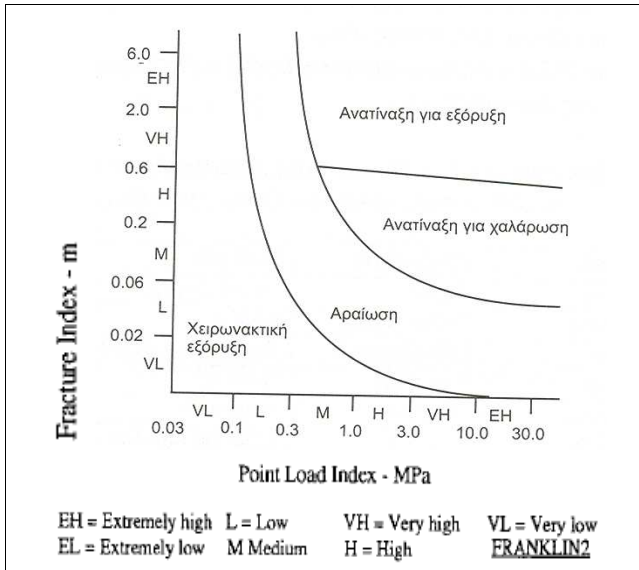
Σκληρά	Ημίσκληρα	Μαλακά
Γρανίτης	Τόφφοι	Σερπεντινίτης
Βασάλτης	Ασβεστόλιθοι	Γύψος
Γνεύσιος	Κροκαλοπαγή	Ορισμένοι σχιστόλιθοι
Πορφυρίτης	Ανδεσίτης	Λιγνίτης
Χαλαζίτης	Τραχείτης	Μάρμα
Δολομίτης	Φλύσχης	Διάφορα εξαλλοιωμένα πετρώματα
Ασβεστόλιθος	Ασβεστόλιθος	Φλύσχης
Ψαμμίτης	Ψαμμίτης	Λιθάνθρακας
Μάρμαρα		
Διαβάσης		
Κερατόλιθος		

Η αναζήτηση σαφέστερου χαρακτηρισμού του πετρώματος από πλευράς εκσκαψιμότητας ο οποίος να μην καθορίζεται υποκειμενικά ή να μην προσδιορίζεται χαλαρά με πολύ γενικά κριτήρια, αλλά να βασίζεται σε αριθμητικούς προσδιορισμούς και κατά συνέπεια αντικειμενικά κριτήρια, οδήγησε σε διάφορες προτάσεις ποιοτικού χαρακτηρισμού του πετρώματος από πλευράς εξορυξιμότητας. Άλλες από τις προτάσεις αυτές αναφέρονται γενικά και άλλες σε συγκεκριμένο τρόπο εξορύξεως.

Διευκρινίζεται επί του προκειμένου ότι μέχρι σήμερα καμία από τις αναφερόμενες στη συνέχεια μεθόδους ποιοτικού χαρακτηρισμού του πετρώματος από πλευράς εκσκαψιμότητας είναι διεθνώς αποδεκτή.

Με το σκεπτικό ότι η μάζα του πετρώματος διαφοροποιείται ως προς το άρρηκτο πέτρωμα ανάλογα με το βαθμό ρωγματώσεως της οι Franklin et al (1971) θεώρησαν ότι δύο ιδιότητες του πετρώματος μπορούν να προσδιορίσουν την εκσκαψιμότητά του. Η μία αναφέρεται στην αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε σημειακή φόρτιση I_s (Point load strength index) και η άλλη στην πυκνότητα των ασυνεχειών, η οποία εκφράζεται με το μέσο μέγεθος πυρήνα, που ανακτάται κατά την δειγματοληπτική διάτρηση,

ή την μέση απόσταση l_f μεταξύ των ασυνεχειών σε μία γραμμή σαρώσεως του πετρώματος (fracture spacing index). Το σχετικό διάγραμμα δίνεται στο Σχ.3



Σχήμα 3: Ταξινόμηση πετρωμάτων από πλευράς εκσκαψιμότητας με βάση το Δείκτη σημειακής φόρτισης και την πυκνότητα ασυνεχειών
Figure 3: Discontinuity strength classification

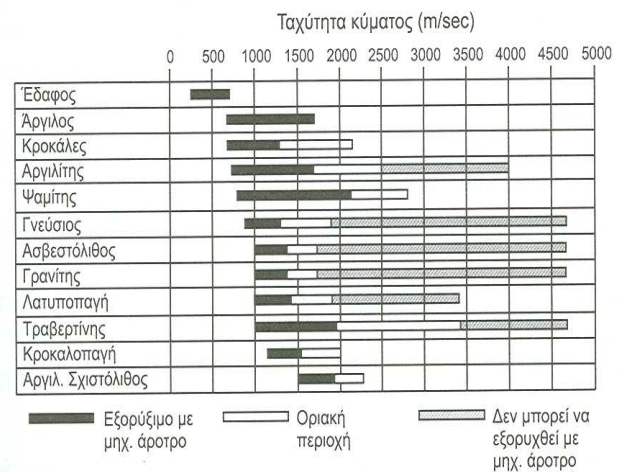
Το διάγραμμα αυτό καθορίζει τις περιοχές, στις οποίες το πέτρωμα ανάλογα με τις αριθμητικές τιμές των δύο δεικτών του, μπορεί να εκσκαφθεί με διάφορους τρόπους που δίνονται σε αυτό.

Κατά τον Atkinson (1970), ο οποίος βασίστηκε σε στοιχεία του οίκου Caterpillar Co, η εκσκαψιμότητα του πετρώματος με μηχανικό άροτρο (ripper) παρέχεται ικανοποιητικά με βάση την ταχύτητα διαδόσεως του διαμήκους ηχητικού κύματος εντός του πετρώματος, που προκύπτει από επί τόπου μετρήσεις. Από το σχετικό διάγραμμα, που δίνεται στο Σχ. 4, είναι δυνατόν να προσδιορισθεί εάν το υπόψη πέτρωμα εξορύσσεται ή όχι με το συγκεκριμένο εκσκαπτικό μηχανήμα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ένα μηχανικό άροτρο συρόμενο από ερπυστριοφόρο ελκυστήρα Caterpillar τύπου D-9.

Για την γενικότερη περίπτωση της εκσκαφής του βράχου με άλλα μηχανικά μέσα πλην του μηχανικού αρότρου ο Atkinson (1971) παρέχει το διάγραμμα του Σχ.4. όπου πάλι ταυτίζει την εξορυξιμότητα του πετρώματος με την ταχύτητα διαδόσεως του διαμήκους ηχητικού κύματος σε αυτό. Κατά τον Atkinson η εκσκαφή του πετρώματος με μηχανικά μέσα φθάνει μέχρι ταχύτητα περίπου 1800 m/s.

Η αξία του διαγράμματος του Σχ. 4 έγκειται στο γεγονός ότι, η ταχύτητα διαδόσεως του διαμήκους ηχητικού κύματος C_p , που παρέχεται στη γενικότερη περίπτωση για ομοιογενές ισότροπο και ελαστικό μέσο από την παρακάτω σχέση, είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας του πετρώματος E , της πυκνότητάς του P και του λόγου του Poisson ν , που εξαρτώνται με τη σειρά τους μεταξύ των άλλων από την αντοχή του πετρώματος, την πυκνότητα και προσανατολισμό των ασυνεχειών της μάζας του πετρώματος.

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$



Σχήμα 4: Διάγραμμα εκσκαψιμότητας των πετρωμάτων με μηχανικό άροτρο συρόμενο από ερπυστριοφόρο εκσκαφέα D9 (Caterpillar, 1984)
Figure 4: D9 Single Shank Impact Ripper performance related to estimated wave velocity

Για τον χαρακτηρισμό του πετρώματος από πλευράς εκσκαψιμότητας με μηχανικά μέσα, οι Scoble et al. (1984) προτείνουν την κατάταξη του πίνακα 2 όπου ο δείκτης W-S-J-B αναφέρεται στις κάτωθι παραμέτρους του πετρώματος:

W = έκταση εξαλλοιώσεως ή αποσαθρώσεως της μάζας του πετρώματος

S = αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος

J = απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

B = απόσταση μεταξύ των διαστρώσεων της μάζας του πετρώματος

Το άθροισμα των τιμών των παραμέτρων αυτών, που προκύπτει από τον πίνακα 2, μεταφέρεται στην στήλη- 3 του πίνακα 3, από τον οποίο συνάγεται ο χαρακτηρισμός του πετρώματος από πλευράς εκσκαψιμότητας.¹⁴

Πίνακας 2 Δείκτες βαθμονόμησης των διαφόρων πετρωμάτων για τον προσδιορισμό της εκσκαψιμότητάς τους

Table 2: Rock characteristics indicators for the determination of its excavatability

Παράμετροι	Κλάση				
	1	2	3	4	5
Αποσάθρωση Βαθμός (W)	Πλήρης <0	Μεγάλη 5	Μέση 15	Μικρή 20	Καθόλου 25
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ή Δείκτης σημειακής φορτίσεως (MPa)	<20	20-60	40-60	60-100	>100
Βαθμός (S)	<0,5	0,5-1,5	1,5-2,0	2-3,5	>3,2
Απόσταση ασυνεχειών (m)	0	10	15	20	25
Βαθμός (J)	<0,3	0,3-0,6	0,6-1,5	1,5-2,0	>2
Βαθμός (J)	5	15	30	45	50
Απόσταση διαστρώσεων (m)	<0,1	0,1-0,3	0,3-0,6	0,6-1,5	>1,5
Βαθμός (B)	0	5	10	20	30

Πίνακας 3: Ταξινόμηση πετρωμάτων ανάλογα με την εκσκαψιμότητά τους (Scoble et al., 1984)¹⁰

Table 3: Rocks classification & machine selection based on excavatability

Κλάση	Εξορυξι-μότητα	Δείκτης (W-S-J-B)	Μέθοδος εξορύξεως	Τρόπος εξορύξεως (χωρίς χρήση εκρ. υλών με παραδείγματα μηχανημάτων)
I	Πολύ εύκολο	<40	1. Μηχ. άρωση 2. Εκσκαφέας συρόμενου κάδου 3. Μηχ. πτύο	A. Μηχανικό άροτρο Cat. D8 B. Εκσκαφέας συρόμενου κάδου >5m Lima 2400 C. Μηχανικό πτύο με συρματόσχοινα >3m ³ Ruston Bucyrus 71RB
				A. Μηχανικό άροτρο Cat. D9 B. Εκσκαφέας συρόμενου κάδου >8m Marion 195 C. Μηχανικό πτύο με συρματόσχοινα >5m ³ Ruston Bucyrus 150RB
II	Εύκολο	40-50	1. Μηχ. άρωση 2. Μηχ. πτύο	A. Μηχ. άροτρο-Μηχ. πτύο Cat D9 B. Υδραυλικό πτύο >3m ³ Cat 245
III	Ενδιάμεσο	50-60	1. Μηχ. άρωση 2. Μηχ. πτύο	A. Μηχ. άροτρο-Μηχ. πτύο Cat D10 B. Υδραυλικό πτύο >3m ³ C245 or O&K RH40
IV	Δύσκολο	60-70	1. Μηχ. άρωση 2. Μηχ. πτύο	A. Μηχ. άροτρο-Μηχ. πτύο Cat D10 B. Υδραυλικό πτύο >3m ³ C245 or O&K RH40
V	Πολύ δύσκολο	70-95	Υδραυλικό ή μηχανικό πτύο	Υδραυλικό πτύο >3m ³ C245 O&K RH40
VI	Πάρα πολύ δύσκολο	95-100	Υδραυλικό ή μηχανικό πτύο	Demag H111 Proclain 1000CK P&H 1200 RH 75 Υδραυλικά πτύα >7m ³
VII	Οριακό για εξορύξη χωρίς εκρ. ύλες	>100	Υδραυλικό ή μηχανικό πτύο	Demag H185 H241 O&K RH300 Υδραυλικά πτύα >10m ³

(Για τιμές δείκτη >110 ενδείκνυται η χρήση εκρηκτικών)

Το NRCS (National Rock Classification System of USA) χρησιμοποιεί την ταξινόμηση του βραχώδους υλικού πεδίου (Rock Material

Field Classification, RMFC) για να κατατάξει τους βράχους και για να ταξινομήσει την συμπεριφορά της βραχώμαζας για τις διάφορες απαιτήσεις στα έργα των Μηχανικών.

Παρακάτω δίδονται συνοπτικά ο πίνακας 4 κατάταξης ως προς την εκσκαψιμότητα, η χρήση του εκσκαπτικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες χαρακτηρισμού της βραχώμαζας.¹⁰

Πίνακας 4: Ταξινόμηση πετρωμάτων ανάλογα με την εκσκαψιμότητά τους (Scoble et al., 1984)⁵

Table 4: Correlation of various indicators of earth material excavatability

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΕΚΣΚΑΨΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ					
Σκληρότητα	Περιγραφή εκσκαφής	Δείκτης εκσκαφής ¹	Ταχύτητα σεισμικού κύματος ² (m/s)	Απαιτούμενος εκσκαπτικός εξοπλισμός (hp)	Σύστημα κατάταξης κατά RMFC
Γεωυλικό	Κοινά χειρωνακτικά εργαλεία	k ₁			
Πολύ μαλακό συνεκτικό υλικό μέσης πυκνότητας διαπερατό		<0.10	<660	-	-
Στιφρό συνεκτικό έδαφος ή πυκνό ασίνδετο έδαφος έως πολύ ασθενής	Κοινά μηχανικά μέσα	0.10-1.0	660-1650	≥100	-
Μαλακός έως μέτρια μαλακός	Εύκολα εκσκάψιμος	1.0-10	1650-2300	≥150	III
Μέτρια σκληρός έως σκληρός	Δύσκολα εκσκάψιμος	10-100	2300-2650	≥250	II
Πολύ σκληρός βράχος	Πολύ δύσκολα εκσκάψιμος	100-1000	2650-2970	≥350	I
Εξαιρετικά πολύ σκληρός βράχος	Εξαιρετικά πολύ δύσκολα εκσκάψιμος διάτρηση και έκρηξη	1000-10000 >1000	2970-3300 >3300	≥500 -	I

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία της εκσκαφής και ειδικότερα η εκσκαφή σε βραχώδη γεωυλικά, είναι σχετικά μία πολυδιάστατη και ποικιλόμορφη διεργασία αλλά συνάμα πολύ σημαντική για την περαιτέρω συνέχιση της κατασκευής ενός έργου. Η πολυπλοκότητά της μπορεί να αναζητηθεί και να τεκμηριωθεί σε δύο επίπεδα.

Το πρώτο, αναφέρεται στην ίδια τη φύση του βράχου. Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους εδαφομηχανικής που στηρίζονται στην παραδοχή ότι το έδαφος είναι ένα συνεχές, ομοιογενές και ισότροπο μέσο, η μελέτη και η ανάλυση της γεωτεχνικής συμπεριφοράς των κατασκευών που θεμελιώνονται σε βράχο είναι πολύ διαφορετική. Ο βράχος στη φυσική του θέση εμφανίζεται συνήθως με ασυνέχειες και

κερματισμένος (διακλάσεις, επίπεδα στρώσης, επιφάνειες σχιστότητας) και σπάνια συμπαγής. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η δυσκολία στον υπολογισμό των αρχικών εισαγόμενων τάσεων, της διεύθυνσής τους (π.χ. λοξός προσανατολισμός κυρίων τάσεων, ενδεχόμενη μεγαλύτερη οριζόντια συνιστώσα της κύριας τάσης), τοπικές υπερβάσεις αντοχής σε ασθενείς ζώνες λόγω της παρουσίας ασυνεχειών, η άρρηκτη σχέση του μηχανισμού θραύσης με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών κλπ.

Το δεύτερο επίπεδο πολυπλοκότητας μιας εκσκαφής σε βραχώδες υπόβαθρο, έχει να κάνει με όλους τους υπόλοιπους παράγοντες που είναι αλληλένδετοι μεταξύ τους και αναφέρονται στον οικονομικό στόχο του έργου. Αυτόματα υπεισέρχεται και η υποκειμενικότητα της ανθρώπινης επιλογής. Το μέγεθος του έργου (σαν φυσικό αλλά και σαν οικονομικό μέγεθος) είναι το πρωταρχικό στοιχείο για την επιλογή της εκσκαπτικής μεθόδου και συνακόλουθα του εκσκαπτικού εξοπλισμού. Σε αυτήν την επιλογή πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του διατιθέμενου εκσκαπτικού συγκροτήματος, οι επιδιωκόμενες και οικονομικά στοχεύουσες θεωρητικές αποδόσεις και η ταυτόχρονη δυνατότητα (ή μη) επιλογή αγοράς καινούργιου εξοπλισμού.

Ο συγκερασμός των φυσικών χαρακτηριστικών του υπό εκσκαφή βράχου αλλά και των οικονομικών επιδιώξεων της εκσκαφής, καθιστά δυσχερή την δυνατότητα κατηγοριοποίησης των βραχωδών γεωυλικών ως προς την εκσκαψιμότητά τους, πάντα σε συνάρτηση με την επιλογή ενός οικονομικά αποδοτικού εξοπλισμού. Όπως άλλωστε αναφέρθηκε και πριν, **στη διεθνή βιβλιογραφία, δεν έχει γίνει αποδεκτή πλήρως καμία πρόταση ποιοτικού χαρακτηρισμού και ταξινόμησης των πετρωμάτων από πλευράς εκσκαψιμότητας.** Η αναζήτηση των ποιοτικών δεικτών κατηγοριοποίησης ως προς την εκσκαψιμότητα, η επιλογή του κατάλληλου εκσκαπτικού μηχανισμού ανά κατηγορία πετρώματος είναι προϊόν ενδελεχούς έρευνας, διεθνούς συνεργασίας της επιστημονικής κοινότητας και εφαρμογής στην πράξη σε παγκόσμια κλίμακα σε πολλών ειδών τεχνικά έργα.

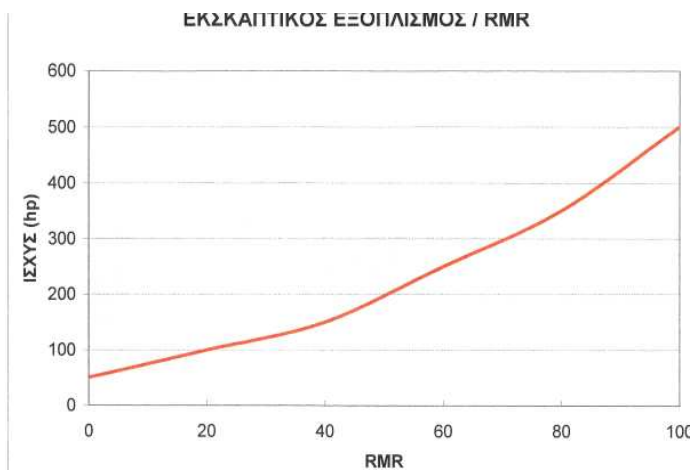
Σε αυτό το σημείο, μπορεί ν' αναφερθεί ότι ο αριθμητικός προσδιορισμός δεικτών και η ποσοτικοποίηση της εκσκαψιμότητας, θα μπορούσε να επιφέρει και κάποιες αλλαγές στο νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τις εκσκαφές σήμερα. Η επιλογή του εκσκαπτικού

εξοπλισμού να μη στηρίζεται μόνο στο είδος του υπάρχοντος διαθέσιμου εξοπλισμού μιας εταιρείας αλλά στις οικονομικές ανάγκες του έργου σε συνδυασμό πάντα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Εκτεταμένες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, εργαστηριακές δοκιμές και αναλύσεις οδηγούν στον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων με προσομοίωση της τασικής κατάστασης κατά την εκσκαφή. Έτσι, ο μηχανικός μπορεί να οδηγηθεί σε λύσεις διαφορετικές ανά περιοχή εκσκαφής με παρόμοια χαρακτηριστικά και με κριτήριο το εάν η διαφοροποίηση του εκσκαπτικού εξοπλισμού είναι αποδοτικότερη και οικονομικά συμφέρουσα.

Με βάση την έρευνα που έγινε και στα πλαίσια που ορίζουν τις δυνατότητες εκπόνησής της παρούσης εργασίας (χρονικά περιθώρια, επιστημονική έρευνα), προέκυψαν οι παραπάνω σκέψεις. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται μία απόπειρα συγκεκριμενοποίησης των παραπάνω στοιχείων και η παρουσίαση ενός **πολύ συνοπτικού και γενικού πίνακα.** Το περιεχόμενό του είναι η εκλογή εκσκαπτικού μηχανικού εξοπλισμού εκφρασμένου σε ισχύ (hp) ανάλογα με την περιγραφική ανάλυση και κατηγοριοποίηση των γεωυλικών με κριτήριο ταξινόμησης το RMR και την κλιμακωτή διαβάθμισή τους ως προς την εκσκαψιμότητα⁷

Πίνακας 5: Επιλογή εκσκαπτικού εξοπλισμού ως προς την εκσκαψιμότητα των γεωυλικών ¹²
Table 5: Machine excavating selection due to geomaterial excavatability

ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΚΣΚΑΠΤΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΨΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ				
	Σκληρότητα Γεωυλικού	Κατηγορία εκσκαψιμότητας Περιγραφή εκσκαφής	RMR	Απαιτούμενος εκσκαπτικός εξοπλισμός
ΕΛΛΑΦΗ	Πολύ μαλακό συνεκτικό υλικό μέσης πυκνότητας	Κοινά χειρωνακτικά εργαλεία / μικροί εκσκαφείς	-	<100
	Στιφρό συνεκτικό έδαφος ή πυκνό ασύνδετο	Υδραυλικοί εκσκαφείς	-	≥100
ΒΡΑΧΟΙ	Πολύ ασθενής βράχος	Πολύ εύκολα εκσκάψιμος	0-20	≥100
	Μαλακός έως μέτρια μαλακός	Εύκολα εκσκάψιμος	21-40	≥150
	Μέτρια σκληρός έως	Δύσκολα εκσκάψιμος	41-60	≥250
	Πολύ σκληρός βράχος	Πολύ δύσκολα εκσκάψιμος-Ενδεχόμενη προηγήματα με έκρηξη	61-80	≥350
	Εξαιρετικά πολύ σκληρός βράχος	Εξαιρετικά πολύ δύσκολα εκσκάψιμος διάτρηση και έκρηξη	81-100	≥500



Σχήμα 5: Συσχέτιση ισχύος εκσκαπτικού εξοπλισμού με το RMR της βραχόμαζας¹²
Figure 5 : Correlation of excavating machine power with RMR

Η επιλογή των κατηγοριών του πίνακα έγινε με κριτήρια καθαρά βιβλιογραφικά. Εκλέχθηκε η παράμετρος του RMR αφού είναι απαραίτητη, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχόμαζας σε κατηγορίες κατά τη φάση της κατασκευής, ακολούθησε μια προσεγγιστική αντιστοίχιση του εύρους τιμών του RMR με περιγραφική ταξινόμηση των γεωυλικών ανά σκληρότητα (N.R.C.S.) και τέλος η πρόταση του απαιτούμενου εκσκαπτικού μηχανισμού (N.R.C.S.).

Τονίζεται και πάλι πως η σχέση των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών με τον απαιτούμενο εξοπλισμό, δεν είναι μονοσήμαντη αλλά συμπεριλαμβάνει πλήθος ποιοτικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας (είδος και προσανατολισμός ασυνεχειών, αποστάσεις ασυνεχειών και υλικό πλήρωσής των, αλληλεμπλοκή βραχοτεμαχίων κλπ) και στοιχείων οικονομοτεχνικής ανάλυσης του έργου.

Εν κατακλείδι, μπορεί να ειπωθεί ότι η ενασχόληση με το θέμα αυτό ίσως αποτελέσει το εφαλτήριο για μια πιο συστηματική και σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου επιστημονική έρευνα, με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση του υπάρχοντος νομικού πλαισίου που διέπει το καθεστώς του τρόπου κοστολόγησης και πληρωμής των εκσκαφών. Απαραίτητη προϋπόθεση, η συντονισμένη συνεργασία της επιστημονικής κοινότητας και η μετουσίωση των τυχών συμπερασμάτων σε πράξη.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdullatif, O. M . & Crunden, D . M., 1983. The relationship between rock mass quality and ease of excavation, Bull. Int. Assoc. Eng. Geology, No 28,pp 184
2. Atkinson, T. 1971, Selection of open-pit excavating and loading equipment. Trans. Int. Mining & Metallurgy, pp A101-A129
3. Fowell, R.J. & Johnson , S.T. 1982, Rock Classification and assessment for rapid excavation. Proc. Symp. Strata Mechanic. Ed. I.W. Farmer, Elsevier, New-York, pp. 241-244
4. Franklin. J. A. , Broch , E.& Walton, G. 1971, Logging the mechanical character of rock, Trans .Inst. Mining & Metallurgy, Sec. A, pp 1-9
5. Johnston W. Ian, “Soft Rock Engineering”, Melbourne Australia, p 367-377
6. Kirsten, H.A.D., 1982, A classification system for excavation in natural material, Civil Eng. S. Africa, July, pp 293-307
7. Kramadibrata Suseno, PhD, “The influence of rock mass and intact rock properties on the design of surface mines with particular reference to the excavatability of rock”, School of Engineering, Curtin University of Technology, Australia,p.100-101
8. Caterpillar Performance Handbook,1984
9. ISRM Suggested methods (1981), “Rock characterization testing and monitoring”, ET Brown (editor), Pergamon Press, Oxford
10. Geology National Engineering Handbook, chapter 12, *Rock Material Field Classification System*, US department of Agriculture, Natural Resousces Conservative Service
11. Μπαντής Κ.,” Τεχνική Γεωλογία”, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2001, σ.2-2
12. Σκορδάρης Αναστάσιος, “Μελέτη της εκσκαψιμότητας των βράχων (μέθοδοι, τεχνικές, οικονομοτεχνική θεώρηση)”, Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2005,σ.136-140
13. Τσότσος Στέφανος, “Έκθεση πραγματογνωμοσύνης με αντικείμενο το χαρακτηρισμό του εδάφους εκσκαφών για το έργο «Συγκρότημα πολιτιστικού κέντρου- Δημαρχείου Δήμου Πανοράματος»”, Θεσσαλονίκη 2004
14. Τσουτρέλης Χ., “Εκρηκτικές Ύλες και Τεχνική των Ανατινάξεων”, Τόμος 2^{ος} Τεχνική των Ανατινάξεων, Ε.Μ.Π. , Αθήναι, 1997