

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ & ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ. «Σ.Κ.Υ.Ε.»)

ΜΑΘΗΜΑ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΕΞΑΜΗΝΟ: 1<sup>ο</sup>

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Β. ΜΑΡΙΝΟΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΣΚΗΣΗ: 3<sup>η</sup>

ΤΙΤΛΟΣ: *Γεωτεχνικές ταξινομήσεις – Ταξινόμηση GSI σε ετερογενείς βραχομάζες. Διατμητική αντοχή Βραχομάζας - Εκτίμηση συνοχής και γωνίας τριβής από το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.*

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ: .....

ΗΜ/ΝΙΑ: .....

Στα πλαίσια κατασκευής νέου οδικού άξονα στη βορειοδυτική Ελλάδα, πρόκειται να γίνει σχεδιασμός σημαντικών τεχνικών έργων οδοποιίας, όπως υψηλά ορύγματα και επιχώματα καθώς και δίδυμης σήραγγας, συνολικού μήκους περί τα 1,5km.

Σήμερα το έργο βρίσκεται σε στάδιο προμελέτης για να ακολουθήσει ο διαγωνισμός για την ανάδειξη αναδόχου κατασκευής του έργου. Η γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί έως και σήμερα, περιλαμβάνει επιφανειακή γεωλογική χαρτογράφηση κατά μήκος του άξονα του έργου, καθώς και εκτέλεση περιορισμένου αριθμού ερευνητικών γεωτρήσεων και κυρίως στη στενή περιοχή που προβλέπεται να κατασκευαστεί η σήραγγα. Σε επιλεγμένα δείγματα από τους πυρήνες των ερευνητικών γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές βραχομηχανικής, με σκοπό το προσδιορισμό της αντοχής των σχηματισμών.

Από τη γεωλογική χαρτογράφηση αλλά και από τα δείγματα των ερευνητικών γεωτρήσεων, προκύπτει ότι το έργο θα κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου στο σχηματισμό του Φλύσχη της Πίνδου που αποτελείται από εναλλαγές κυρίως Ιλυολίθου και Ψαμμίτη, που κατά θέσεις είναι έντονα πτυχωμένος και κερματισμένος.

Συγκεκριμένα για κάθε τεχνικό έργο κατά μήκος του οδικού άξονα, επικρατούν οι ακόλουθες γεωλογικές - γεωτεχνικές συνθήκες:

- **Περιοχές Ορυγμάτων**

Τα ορύγματα αναμένεται να εκσκαφθούν κυρίως σε εναλλαγές μέτρια διαταραγμένου Ψαμμίτη και Ιλυολίθου, σε ίσες περίπου αναλογίες. Από την επιτόπια έρευνα διαπιστώθηκε ότι οι διακλάσεις είναι λείες και μέτρια αποσαθρωμένες. Τα ορύγματα θα έχουν μέγιστο ύψος έως 25m και η εκσκαφή τους θα γίνει με την μέθοδο των ελεγχόμενων ανατινάξεων. Από τις εργαστηριακές δοκιμές η μέση αντοχή σε θλίψη (UCS) για το Ψαμμίτη προσδιορίστηκε περί τα 30 MPa και για τον Ιλυόλιθο περί τα 10 MPa, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος ( $E_i$ ) για το Ψαμμίτη προσδιορίστηκε περί τα 25 GPa και για τον Ιλυόλιθο περί τα 8 GPa, ενώ το φαινόμενο ειδικό βάρος και για τους δύο σχηματισμούς προσδιορίστηκε σε 26 kN/m<sup>3</sup>.

- **Περιοχές Επιχώματων**

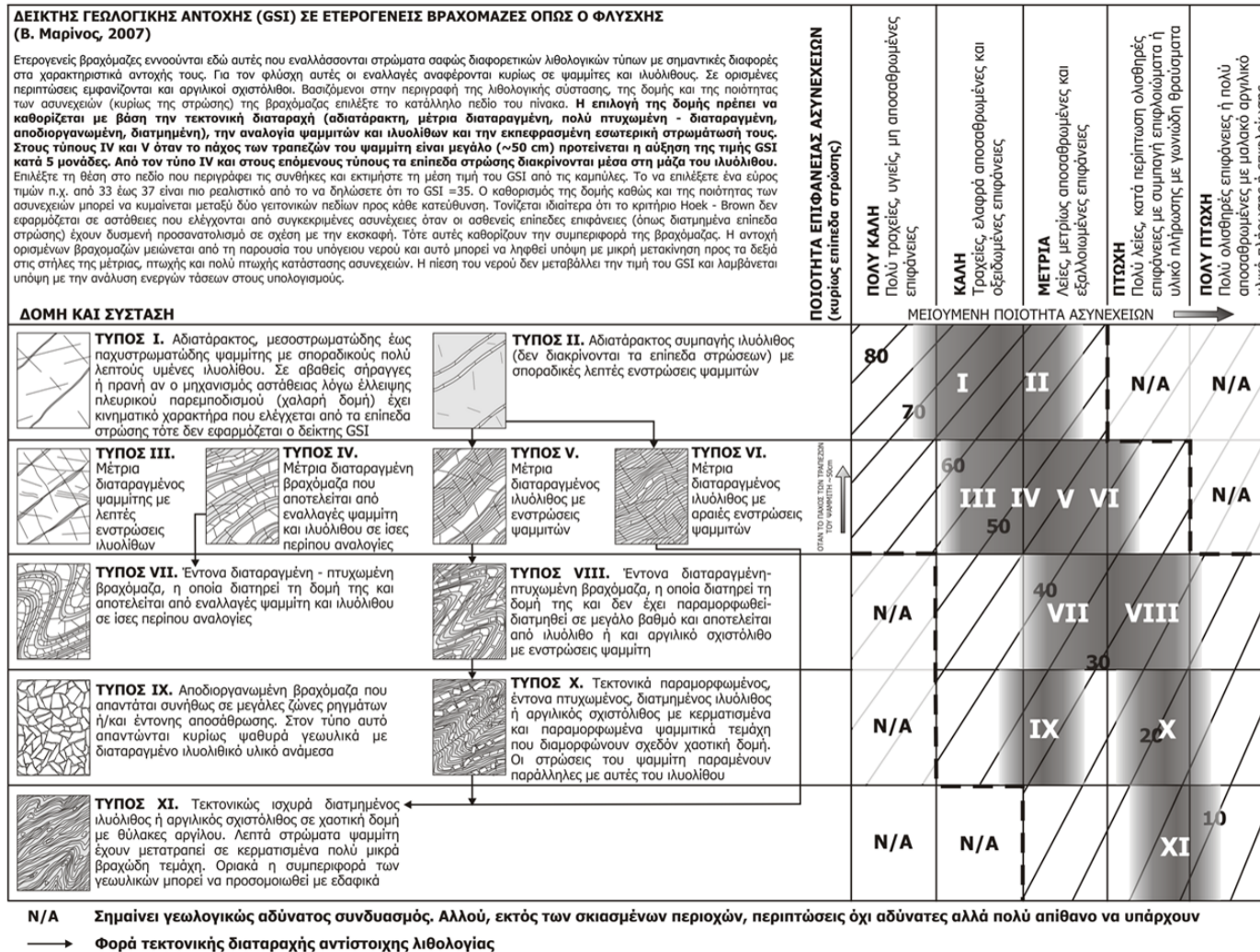
Τα επιχώματα αναμένεται να εδραστούν κυρίως σε έντονα διαταραγμένη βραχώμαζα Ιλυολίθου με ενστρώσεις Ψαμμίτη, όπου το ποσοστό Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη, εκτιμήθηκε σε 90% - 10%. Οι διακλάσεις είναι από λείες και κατά θέσεις έχουν υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα. Τα επιχώματα θα έχουν μέγιστο ύψος έως 20m και θα κατασκευαστούν κυρίως οπλισμένα. Από τις εργαστηριακές δοκιμές η μέση αντοχή σε θλίψη (UCS) για το Ψαμμίτη προσδιορίστηκε περί τα 25 MPa και για τον Ιλυόλιθο περί τα 6 MPa, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος ( $E_i$ ) για το Ψαμμίτη προσδιορίστηκε περί τα 18 GPa και για τον Ιλυόλιθο περί τα 6 GPa, ενώ το φαινόμενο ειδικό βάρος και για τους δύο σχηματισμούς προσδιορίστηκε σε 26 kN/m<sup>3</sup>.

- **Περιοχή Σήραγγας**

Η σήραγγα θα είναι δίδυμη (ένας κλάδος ανά κατεύθυνση) με ισοδύναμη διάμετρο  $D= 12m$ . Τα μέγιστα υπερκείμενα της σήραγγας (H), είναι 280m. Η σήραγγα αναμένεται να διανοιχθεί κυρίως σε βραχώμαζα μέτρια διαταραγμένου Ιλυολίθου με αραιές ενστρώσεις Ψαμμίτη, όπου το ποσοστό Ιλυόλιθου – Ψαμμίτη, εκτιμήθηκε σε 90% - 10%, ενώ κατά μήκος της σήραγγας θα συναντηθεί και κανονικό ρήγμα που έχει κερματίσει σημαντικά τη βραχώμαζα. Οι διακλάσεις της Ιλυολιθικής βραχώμαζας είναι από λείες έως πολύ λείες και κατά θέσεις έχουν υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα. Από τις εργαστηριακές δοκιμές η μέση αντοχή σε θλίψη (UCS) για το Ψαμμίτη προσδιορίστηκε περί τα 25 MPa και για τον Ιλυόλιθο εκτός της περιοχής του ρήγματος περί τα 8 MPa ενώ στη περιοχή του ρήγματος περί τα 5 MPa, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος ( $E_i$ ) για το Ψαμμίτη προσδιορίστηκε περί τα 20 GPa και για τον Ιλυόλιθο εκτός της περιοχής του ρήγματος περί τα 10 GPa ενώ στη περιοχή του ρήγματος περί τα 6 GPa, ενώ το φαινόμενο ειδικό βάρος και για τους δύο σχηματισμούς προσδιορίστηκε σε 26 kN/m<sup>3</sup>. Η εκσκαφή της σήραγγας αναμένεται να γίνει με εκσκαφέα υπογείων έργων (μηχανικά μέσα).

## Ζητούμενα

1. Να ταξινομηθεί η βραχώμαζα για κάθε τεχνικό έργο με βάση το δείκτη γεωλογικής αντοχής (GSI) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο Φλύσχης (*B. Μαρίνος, 2007*).
2. Για κάθε τεχνικό έργο να προσδιοριστούν οι ισοδύναμες παράμετροι αντοχής για άρρηκτο πέτρωμα ( $\sigma_{ci}$ ,  $E_i$ ) και η παράμετρος  $m_i$ . Για τον προσδιορισμό τους να ληφθεί υπόψιν ο πίνακας με τις υποδείξεις για τη «ζυγισμένη» τιμή.
3. Για κάθε τεχνικό έργο να προσδιοριστούν οι ακόλουθες παράμετροι αντοχής και διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας, χρησιμοποιώντας το λογισμικό RSdata της εταιρείας Rocscience:
  - ✓ Ισοδύναμη αντοχή βραχώμαζας ( $\sigma_{cm}$ )
  - ✓ Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας βραχώμαζας ( $E_m$ )
  - ✓ Ισοδύναμη συνοχή ( $c$ )
  - ✓ Ισοδύναμη γωνία τριβής ( $\phi$ )
4. Για την περιοχή της σήραγγας να εκτιμηθούν οι ισοδύναμες συγκλίσεις ανά περιοχή και να προταθούν τα αντίστοιχα μέτρα υποστήριξης σύμφωνα με το σχετικό νομόγραμμα (*E. Hoek, P. Marinos, 2000*).
5. Εφαρμόζοντας το λογισμικό Rocsupport της εταιρείας Rocscience, να προταθούν κατάλληλα μέτρα υποστήριξης για κάθε περιοχή της σήραγγας ώστε η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας μετά την εφαρμογή της υποστήριξης να μην ξεπερνάει τα 2cm. Το βήμα προχώρησης της εκσκαφής να μην υπερβεί το 1,5m. Η υποστήριξη προτείνεται να αποτελείται από συνδυασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατηγορίας C30/37, μεταλλικών πλαισίων HEB 140 (ανά βήμα προχώρησης) και αγκυρίων πλήρους πάκτωσης  $\varnothing$  25, S500. Ποια είναι η τελική σύγκλιση της σήραγγας και το μέγιστο εύρος της πλαστικής ζώνης, μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης.  
Για τους υπολογισμούς να γίνει εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης κατά *Carranza – Torres (2004)*.

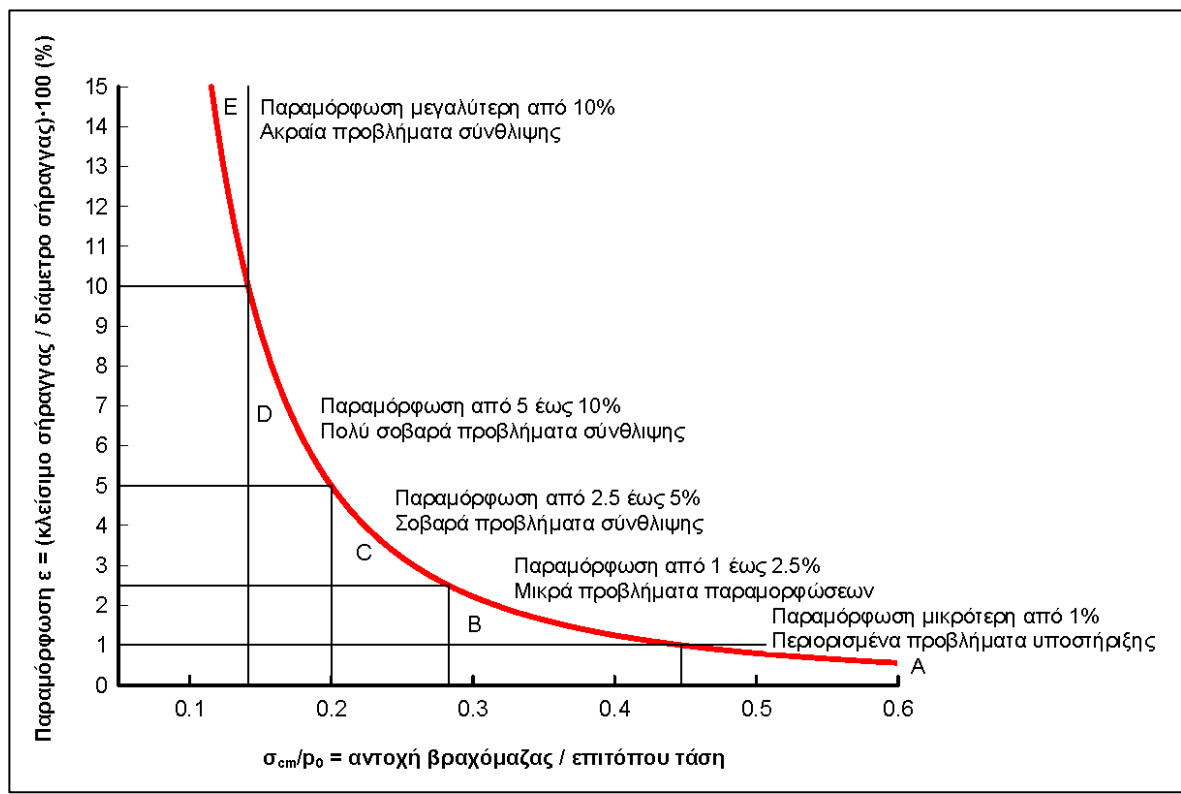


Σχήμα 1. Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής – GSI (Geological Strength Index) για ετερογενείς βραχώμαζες όπως ο φλύσχος (Μαρίνος Β. 2007).

**Πίνακας 1. Αναλογίες των  $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$  και  $E_i$  των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της “ζυγισμένης” τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του “άρρηκτου” φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχώμαζας (Μαρίνος Β., 2007).**

Τύπος Φλύσχη	Αναλογίες των $\sigma_{ci}$ , $m_i$ και $E_i$ των λιθολογικών μελών για την εκτίμηση της “ζυγισμένης” τιμής των αντίστοιχων παραμέτρων του «άρρηκτου» φλύσχη ανάλογα με τον τύπο της βραχώμαζας.
I, III	Χρησιμοποιείτε τις τιμές για τους ψαμμιτικούς πάγκους
II, VI	Χρησιμοποιείτε τις τιμές για τους ιλυολιθικούς πάγκους
IV	<i>Λεπτά στρώματα:</i> Μειώστε την τιμή του ψαμμίτη κατά 10% και χρησιμοποιείτε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου <i>Παχιά στρώματα:</i> Χρησιμοποιείτε ισοδύναμα τις τιμές του ψαμμιτικού και ιλυολιθικού πάγκου
V, VII, VIII	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 20% και χρησιμοποιείτε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
IX	Χρησιμοποιείτε τις πλήρες τιμές των εμπλεκόμενων γεωυλικών
X	Μειώστε τις ψαμμιτικές τιμές κατά 30% και χρησιμοποιείτε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου
XI	Χρησιμοποιείτε την πλήρη τιμή του ιλυολίθου ή αργιλικού σχιστολίθου

*Σημείωση: Η τελική “ζυγισμένη” τιμή πρέπει να λαμβάνει προφανώς υπ’ όψη και τα ποσοστά συμμετοχής των δύο μελών στη σύσταση της βραχώμαζας και όχι να προκύπτει από τον μέσο όρο. Σε περίπτωση που η υπολογιζόμενη τιμή βρεθεί χαμηλότερη από αυτή του ασθενέστερου υλικού, χρησιμοποιείτε την τελευταία.*



**Σχήμα 2. Εκτίμηση της παραμόρφωσης της εκσκαφής, βάσει του λόγου αντοχής βραχώμαζας επιτόπου τάση (E. Hoek, P. Marinos, 2000).**

**Πίνακας 2. Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης εκσκαφής βάσει του τύπου βραχώμαζας (E. Hoek, P. Marinos, 2000).**

	Παραμόρφωση (%)	Γεωτεχνική θεώρηση	Τύπος υποστήριξης
A	Λιγότερο από 1	Λίγα προβλήματα αστάθειας. Απλές μέθοδοι σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Τα συνιστώμενα μέτρα προστασίας μπορεί να εκτιμηθούν ικανοποιητικά από τις ταξινομήσεις βραχώμαζας	Απλές συνθήκες. Η χρήση αγκυρίων ή/και εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συνήθης πρακτική.
B	1 έως 2,5	Μέθοδοι σύγκλισης αποτόνωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του σχηματισμού της «πλαστικής» ζώνης στην βραχώμαζα που περιβάλλει την σήραγγα και για την αλληλεπίδραση μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης.	Μικρά προβλήματα που συνήθως αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές φορές προστίθενται και ελαφρά πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια (lattice girders) για πρόσθετη ασφάλεια.
C	2,5 έως 5	Συνήθως χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενσωματώνοντας τα στοιχεία της υποστήριξης και την διαδοχή των φάσεων κατασκευής. Η αστάθεια στο μέτωπο συνήθως δεν είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα.	Σοβαρά προβλήματα συγκλίσεων που απαιτούν γρήγορη τοποθέτηση της υποστήριξης και επιμελημένη εκτέλεση των εργασιών. Γενικός επιβάλλεται η χρήση βαριών πλαισίων ενσωματωμένων στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
D	5 έως 10	Ο σχεδιασμός της σήραγγας ελέγχεται από την αστάθεια του μετώπου και, αν και γενικώς χρησιμοποιείται διδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται κάποια εκτίμηση της δράσης των δοκών προπορείας και της ενίσχυσης του μετώπου.	Πολύ σοβαρές συγκλίσεις και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου. Συνήθως απαιτούνται δοκοί προπορείας (forepoling) ενίσχυση του μετώπου και πλαίσια ενσωματωμένα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
E	Μεγαλύτερη του 10	Σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του μετώπου και μεγάλες συγκλίσεις στην σήραγγα δημιουργούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα τριών διαστάσεων για το οποίο δεν διατίθεται ακόμη αποτελεσματική μέθοδος σχεδιασμού. Τις περισσότερες φορές οι λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Εξαιρετικά προβλήματα συγκλίσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκοί προπορείας και ενίσχυση του μετώπου. Ολισθαίνοντα (yielding) πλαίσια ενδεχομένως να απαιτούνται σε ακραίες καταστάσεις έναντι των κλασικών πλαισίων.

Πίνακας 3. Τιμή  $m_i$  ανά λιθολογικό τύπο πετρώματος (E. Hoek, P. Marinos, 2000).

Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγή *	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2	Αργιλόλιθοι 4 ± 2	
		Λατυποπαγή *		Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργ.σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάργες (7 ± 2)	
	Μη κλαστικό	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρτικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2	
	Οργανικά				Κρητίν 7 ± 2	
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα	Μάρμαρο 9 ± 3	Κερατόλιθοι (19 ± 4) Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Χαλαζίτες 20 ± 3		
	Ελαφρά πτυχωμένα	Μιγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιμοι 28 ± 5		
	Πτυχωμένα**		Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4	
Τύπος	Ομάδα	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ				
		Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή	
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοικτό- χρωμα	Γρανίτης 32 ± 3	Διορίτης 25 ± 5		
		Σκοτεινό- χρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)		
	Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοτίτης (25 ± 5)	
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 25 ± 5	Δακίτης (25 ± 3) Βασάλτης (25 ± 5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ.Λατυποπαγή (19 ± 5)	Τόφφοι (13 ± 5)	

**Βιβλιογραφία:**

- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek - Brown failure criterion - 2002 edition. In: Bawden H.R.W., Curran, J., Telesnicki, M. (eds). Proceedings of NARMS-TAC 2002, Toronto, pp. 267-273.
- Hoek, E. and Marinos, P. 2007. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks, No. 2., November 2007.
- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. "The geological Strength index: applications and limitations". Bull. Eng. Geol. Environ. 64, 55-65 (2005).
- Marinos, P and Hoek, E. 2000 GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442
- Μαρίνος Β., (2007), «Γεωτεχνική ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωυλικών κατά τη διάνοιξη σηράγγων», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής, Ε.Μ.Π.