

Κεφάλαιο 9

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το λιθολογικό φάσμα των πετρωμάτων καλύπτει γεωυλικά από σκληρά πολυμεταλλικά πυριγενή και μεταμορφωμένα, όπως ο γρανίτης και ο δολερίτης, έως μαλακά απολιθωμένα αργιλικά, όπως ο πηλίτης και ο ιλύολιθος. Ο βαθμός οξειδωσης ή αποσάθρωσης έχει μία σημαντική επίδραση στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Άρρηκτα, μη αποσαθρωμένα πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα χαρακτηρίζονται γενικά από κοντινή επαφή κατά μήκος των ορίων των κρυστάλλων και περιέχουν το πολύ ασυνεχείς μακροπόρους, που έχουν μικρή μόνο σημασία στη συμπεριφορά τους. Στη μάζα τους εν τούτοις, η μηχανική συμπεριφορά κυριαρχείται από την παρουσία κατακλάσεων, ρωγμών και άλλων ατελειών. Σε μερικά μάλιστα πυριγενή πετρώματα, όπως ο βασάλτης που έχει ρεύσει μέσα σε νερό, είναι δυνατή η παρουσία φυσαλίδων που επιδρά στη συμπεριφορά τους.

Τα ψαμμιτικά και αργιλικά πετρώματα αποτελούνται από ορυκτά πρωτογενή ή δευτερογενή αργιλικά, συγκολλημένα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό στις επαφές τους, που όμως παραμένουν διαχωρισμένα από συνεχόμενους πόρους. Το νερό μέσα στους πόρους επηρεάζει τη συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος. Πολλά από αυτά τα πετρώματα δείχνουν μία μείωση της αντοχής τους με την αύξηση της υγρασίας. Μείωση της αντοχής της τάξης του 30÷100% συμβαίνει σε πολλά πετρώματα σαν αποτέλεσμα της φθοράς της συγκολλητικής ή αργιλικής κονίας. Δείγματα αφημένα να ξεραθούν για αρκετούς μήνες, μπορούν να δώσουν μία λαθεμένη εντύπωση της αντοχής του πετρώματος. Οι εργαστηριακές δοκιμές θα πρέπει να γίνονται με υγρασία του δοκιμίου κοντά στη φυσική.

Αιτία μείωσης της αντοχής του πετρώματος είναι και η πίεση που εξασκεί το νερό των πόρων στο πέτρωμα. Η αρχή των ενεργών τάσεων του Terzaghi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις περισσότερες εντατικές καταστάσεις που συναντάμε στα γεωτεχνικά έργα, όμως σημαντικές αποκλίσεις μπορεί να συμβούν για πολύ υψηλές εντατικές καταστάσεις. Σε άρρηκτα πετρώματα με πολύ μικρό πορώδες μπορεί να θεωρηθεί ότι οι πιέσεις των πόρων δεν προλαβαίνουν να εκτονωθούν κατά την εξαίτηση των δοκιμίων. Αντίθετα, η πίεση του νερού των ασυνεχειών, σε

διακλασμένη βραχομάζα, αναμένεται ότι θα διαχυθεί πιο γρήγορα από αυτή των πόρων του άρρηκτου πετρώματος. Σε κερματισμένα επομένως πετρώματα, στα οποία η αστοχία αναμένεται στις επιφάνειες των διακλάσεων, η αρχή των ενεργών τάσεων θα εφαρμόζεται για πίεση πόρων αυτή του νερού των ασυνεχειών.

Η μάζα των πετρωμάτων σπάνια είναι ομοιογενής, ισότροπη και συνεχής. Συνήθως διασχίζεται από ποικίλες επιφάνειες αδυναμίας, είναι ανομοιόμορφα καταπονημένη ή αποσαθρωμένη και η απόκριση της σε καταναγκασμούς εξαρτάται από τη διεύθυνση καταπόνησης. Επομένως η απόκριση του πετρώματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων, δηλ. των άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος και των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Η πολύπλοκη και γενικά τυχηματική κατανομή των παραπάνω ιδιοτήτων καθιστά πρακτικά αδύνατη την προσδιορισμική εκτίμηση της απόκρισης του πετρώματος στις καταπονήσεις με βάση την αλληλεπίδραση των συνιστώντων αυτό στοιχείων. Αντί αυτού, η εκτίμηση της συμπεριφοράς του πετρώματος δύναται να γίνει με τη θεώρησή του ως σύνθετο ομοιογενούς υλικού, με χαρακτηριστικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του στέρεου σώματος. Οι ιδιότητες του σύνθετου αυτού υλικού καθορίζονται από την ταξινόμηση του πετρώματος, που προκειμένου να διακρίνεται από το άρρηκτο ομοιογενές πέτρωμα, ονομάζεται βραχομάζα. Τέτοια συστήματα ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί πολλά, επικρατέστερα των οποίων είναι τα συστήματα RMR (Bieniawski, 1989), Q, και GSI. Η δομή του πετρώματος και η ποιότητα της επαφής των ασυνεχειών αποτελούν κύρια χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται η ταξινόμηση και από τα τρία συστήματα.

Η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας, που θεωρείται ένα σύνθετο υλικό, διέπεται από παραμέτρους παραμόρφωσης και παραμέτρους αστοχίας-διαρροής. Η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών μέσα στα πετρώματα αυτά επιτυγχάνεται με προσομοιώματα όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τα συνεχή μέσα.

2 ANTOXH

Κριτήρια αστοχίας βασισμένα στις κύριες τάσεις έχουν δοθεί από πολλούς ερευνητές. Παρακάτω δίνονται επιλεκτικά τέτοια κριτήρια

$$\begin{aligned}
\sigma_{1N}(+) &= 1 + a \cdot \sigma_{3N}^b \text{ (Murrel, 1965)} \\
\sigma_{1N}(+) &= 1 + \sigma_{3N} + a \cdot \sigma_{3N}^b \text{ (Hobbs, 1964)} \\
\sigma_{1N} &= 1 + a \cdot \sigma_{3N} \text{ (Bodonyi, 1970 - M/C)} \\
\sigma_{1N} &= \sigma_{3N} + a \cdot (\sigma_{1N} + \sigma_{3N})^b ; a = 1 \text{ (Franklin, 1971)} \\
\sigma_{1N}(+) &= a + b \cdot \sigma_{3N}^a ; a = 1 \text{ (Bieniawski, 1974)} \\
\sigma_{1N}(+) &= \sigma_{3N} + a \cdot \sigma_{3N}^b ; \sigma_c = \sigma_t = 0 (!); b < 1 \text{ (Ramamurthy et al., 1985)} \\
(\sigma_{1N} - \sigma_{3N})^2 &= 8 \cdot \sigma_{tN} \cdot (\sigma_{1N} + \sigma_{3N}) \text{ (Griffith, 1924)} \\
(\sigma_{1N} - \sigma_{3N})^2 &= a + b \cdot (\sigma_{1N} + \sigma_{3N}) \text{ (Fairhurst, 1964)} \\
\sigma_{1N} &= \sigma_{3N} + (m \cdot \sigma_{3N} + s)^{1/2} \text{ (H \& B, 1980)} \\
\sigma_{1N} &= \sigma_{3N} + a \cdot (\sigma_{3N} + s)^b ; s \neq 1 \text{ (Yoshida, 1990)} \\
\sigma_{1N} &= \left(1 + \frac{\sigma_{3N}}{\sigma_{tN}} \right)^b ; \sigma_t \neq 0 \text{ (Balmer, 1952, Sheorey et al. 1989)}
\end{aligned}$$

2.1 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown

Από τα παραπάνω κριτήρια αστοχίας, το κριτήριο Hoek-Brown είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο, καθόσον δίνει οδηγίες εφαρμογής σε ποικίλες περιπτώσεις, και σύμφωνα με τους εμπνευστές προσαρμόζεται συνεχώς στα νέα δεδομένα. Για την εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας, το αρχικό κριτήριο (Hoek and Brown, 1980; Hoek, 1983) επαναδιατυπώνεται (Hoek and Brown, 1988; Hoek et al, 1992; Hoek, 1994; Hoek et al., 2002), ώστε να λάβει τη γενικότερη μορφή (Σχήμα 1) του:

$$\sigma'_{1N} = \sigma'_{3N} + (m_b \cdot \sigma'_{3N} + s)^a$$

$$\sigma'_{1N} = \frac{\sigma'_1}{\sigma_{ci}}$$

$$\sigma'_{3N} = \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}}$$

Εξίσωση 1

όπου,

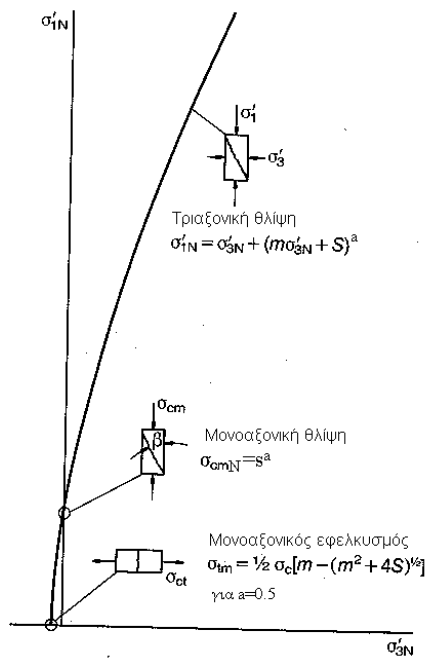
m_b : παράμετρος που χαρακτηρίζεται από το είδος του πετρώματος και τον τεκτονισμό του. Είναι ανάλογη με τη γωνία τριβής ϕ του κριτηρίου Mohr-Coulomb.

s : παράμετρος που χαρακτηρίζεται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Είναι ανάλογη με τη συνοχή του κριτηρίου Mohr-Coulomb.

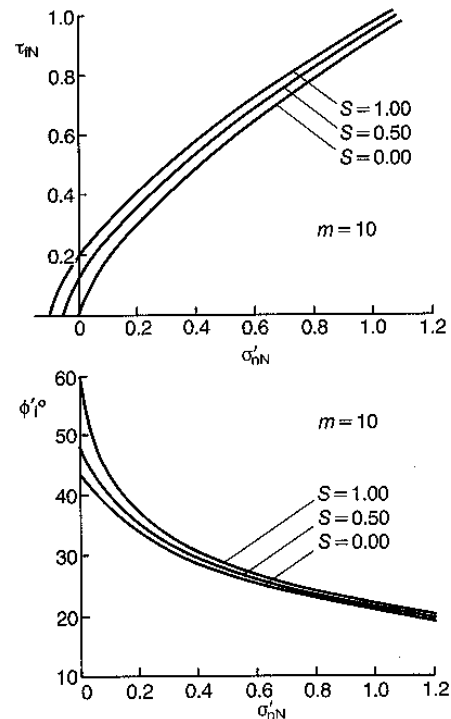
a : παράμετρος που εξαρτάται από τον τεκτονισμό του πετρώματος. Λαμβάνει τιμές από 0.5 έως 0.67,

σ_{ci} : η μονοαξονική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος που δύναται να μετρηθεί στο εργαστήριο.

Η επίδραση της παραμέτρου s είναι αντίστοιχη με αυτή της συνοχής στο κριτήριο Mohr-Coulomb. Τούτο γίνεται φανερό στο Σχήμα 2.



Σχήμα 1. Κριτήριο Hoek-Brown



Επιρροή της σταθεράς s στις περιβάλλουσες Mohr και στην ϕ'

Σχήμα 2. Επιρροή της παραμέτρου s στη διατμητική αντοχή και στη γωνία τριβής ϕ .

Παρατηρούμε ότι για $m_b=m_i$, $s=1$, $a=0.5$ το κριτήριο λαμβάνει την ειδικότερη μορφή που είχε το κριτήριο για το άρρηκτο πέτρωμα. Μηδενίζοντας την κύρια θλιπτική ή εφελκυστική τάση υπολογίζονται, η εφελκυστική και θλιπτική αντοχή του πετρώματος, σ_{tm}^{HB} και σ_{cm}^{HB} αντίστοιχα:

$$\sigma_{tmN}^{HB} = \frac{\sigma_{tm}^{HB}}{\sigma_{ci}} = \frac{1}{2} \cdot \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \approx -\frac{s}{m_b}; \text{ για } a = 0.5$$

$$\sigma_{cmN}^{HB} = \frac{\sigma_{cm}^{HB}}{\sigma_{ci}} = s^a$$

Εξίσωση 2

Η εκτίμηση των τριών παραμέτρων m_b , s , a , δίνεται από σχέσεις που, σύμφωνα με τους εμπνευστές του συστήματος, έχουν βασισθεί στην καταγεγραμμένη

συμπεριφορά πολλών μέχρι σήμερα κατασκευασθέντων έργων σε διαφόρους τύπους πετρωμάτων. Ειδικότερα, οι παράμετροι αυτές δίνονται ως συναρτήσεις της ποιότητας GSI της βραχομάζας, ενώ η παράμετρος m_b εξαρτάται και από το λιθολογικό τύπο του πετρώματος. Η μεταβολή των παραμέτρων με το GSI φαίνεται στο Σχήμα 3. Ο υπολογισμός τους δίνεται (Hoek et al., 2002) από τις επόμενες σχέσεις:

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

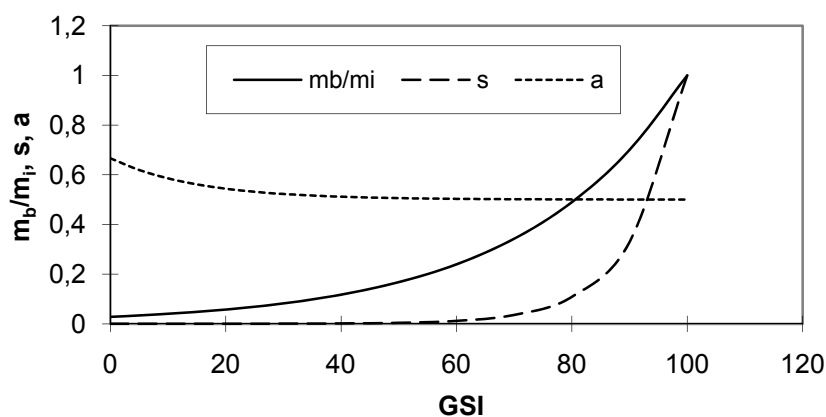
Εξίσωση 3

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$

D: μεταξύ 0 για αδιατάρακτο από την εκσκαφή πέτρωμα, μέχρι 1 για πολύ διαταραγμένο πέτρωμα.

Το κριτήριο παρατηρούμε ότι είναι πλήρως καθορισμένο εφόσον προσδιορισθούν οι τρεις παράμετροι, σ_{ci} , m_i , GSI.

Παράμετροι Hoek-Brown



Σχήμα 3. Παράμετροι του κριτηρίου Hoek-Brown

2.2 Εκτίμηση του GSI

Η εκτίμηση του GSI πραγματοποιείται συνήθως άμεσα με βάση το χαρακτηρισμό του τεκτονισμού και της κατάστασης των ασυνεχειών του πετρώματος. Για το σκοπό

αυτό χρησιμοποιείται ο Πίνακας 1. Επέκταση του πίνακα δίνεται από τους Hoek et al. (1998). Εν τούτοις η βαθμονόμηση GSI δύναται να συσχετισθεί με τις άλλες συνήθως χρησιμοποιούμενες βαθμονομήσεις RMR και Q. Για τιμή του GSI μεγαλύτερη από 25 το GSI μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με το RMR_{76} , θεωρώντας ξηρές συνθήκες και ευνοϊκή κατεύθυνση ασυνεχειών. Επομένως:

$$GSI = RMR_{76} \{ \text{Βαθμοί [(1) + (2) + (3) + (4)] + 10 \} > 25$$

Για τον υπολογισμό των επιμέρους βαθμών του RMR_{76} χρησιμοποιείται ο Πίνακας 2. Για GSI μικρότερο του 25, η τιμή του υπολογίζεται με βάση τη βαθμονόμηση Q, για ξηρές συνθήκες ($J_w=1$) και συντελεστή $SRF=1$, από τη σχέση:

$$25 > GSI = 9 \log_e Q' + 44 > 9$$

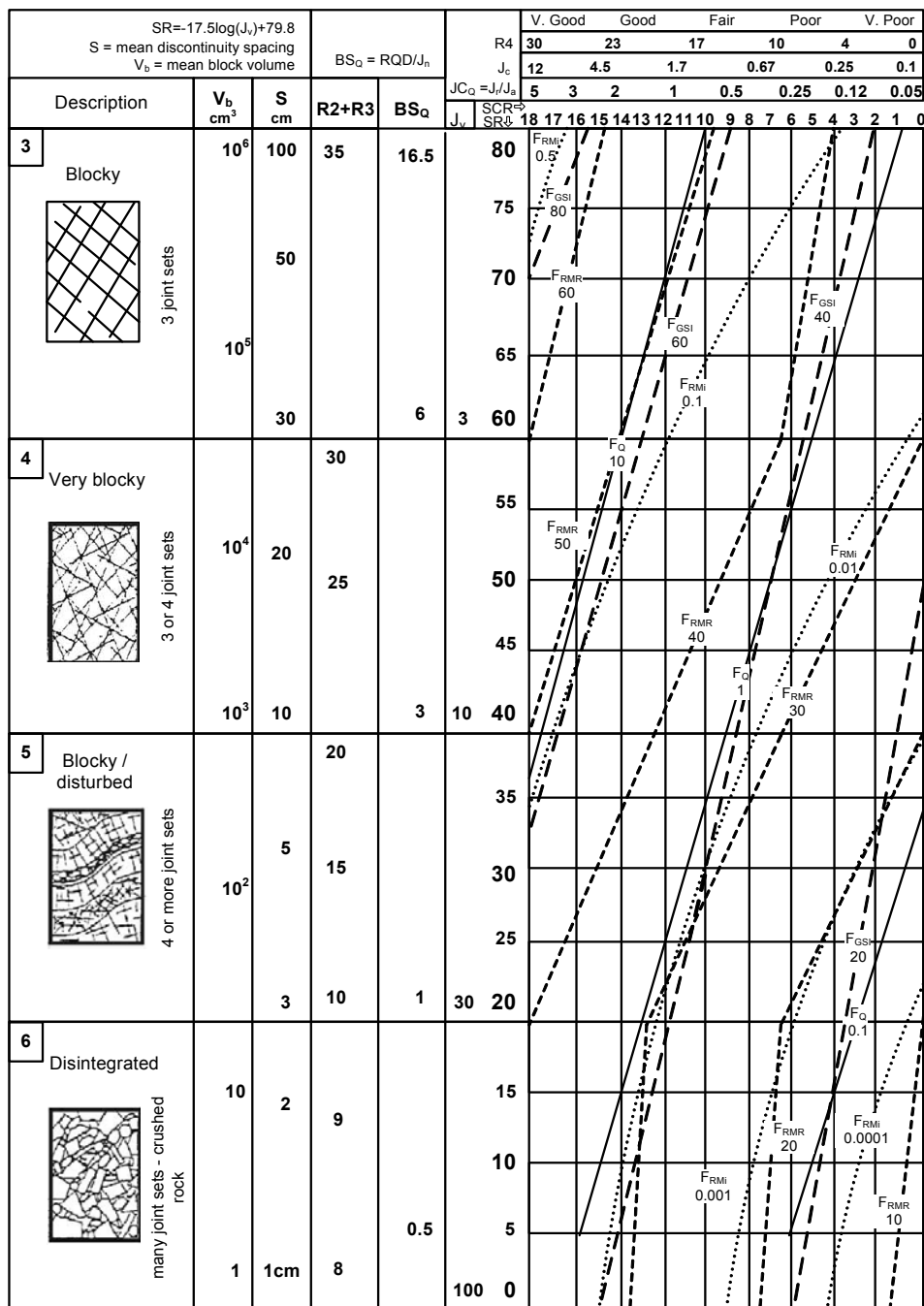
$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} > 0.0208$$

Εξίσωση 4

Οι τιμές για τις παραμέτρους του Q' δίνονται από τους αντίστοιχους πίνακες του συστήματος Q.

2.3 Δείκτες υφής

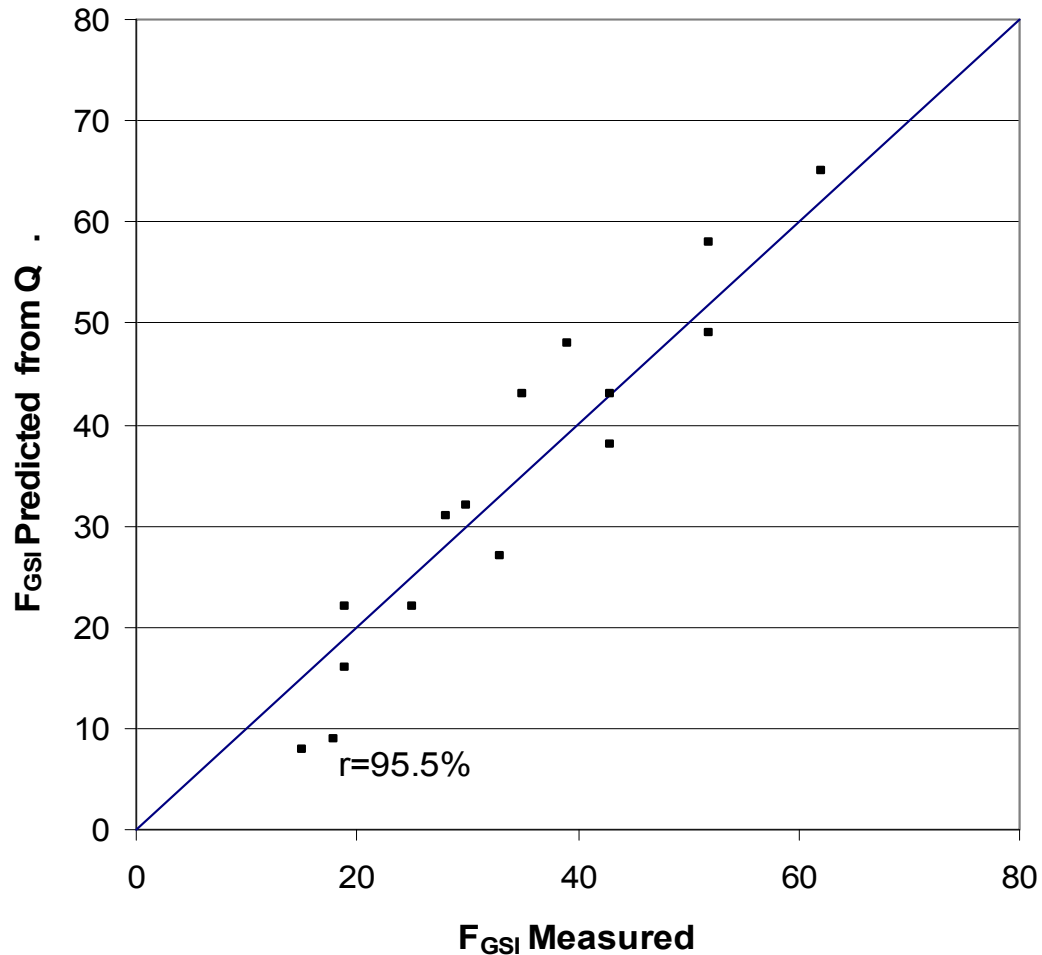
Οι δείκτες υφής F χαρακτηρίζουν τον τεκτονισμό του πετρώματος και την ποιότητα των ασυνεχειών. Ο δείκτης γεωλογικής αντοχής GSI ($=F_{GSI}$) από τη φύση του είναι ένας δείκτης υφής. Ο δείκτης Q' ($=F_Q$) είναι επίσης ένας δείκτης υφής. Το άθροισμα του δεύτερου τρίτου και τέταρτου προσθετέου ($R2+R3+R4=F_{RMR}$) της βαθμονόμησης RMR είναι επίσης ένας δείκτης υφής. Τέλος, ο δείκτης J_v ($=F_{RMI}$) του συστήματος RMi είναι επίσης ένας δείκτης υφής. Και οι τέσσερις αυτοί δείκτες υφής βασίζονται στα ίδια δεδομένα, και επομένως λογικά θα πρέπει να συσχετίζονται καλά. Στο Σχήμα 4 (Tzamos & Sofianos, 2007) φαίνεται ο συσχετισμός αυτών των δεικτών, που έχει προκύψει με βάση τη βαθμονόμηση κάθε συστήματος.



Σχήμα 4. Συσχέτιση δεικτών υφής

Η ακρίβεια της μεθόδου ελέγχθηκε με βάση δημοσιευμένα στοιχεία ταξινόμησης της βραχομάζας με διάφορα συστήματα. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι γενικά πολύ υψηλός για τέτοια δεδομένα, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 5, όπου συσχετίζονται για διάφορα έργα οι άμεσα μετρημένοι δείκτες F_{GSI} (=GSI) με τους ίδιους δείκτες έμμεσα εκτιμημένους από άμεσες μετρήσεις του συστήματος Q. Εφόσον μπορεί να εκτιμηθεί ο δείκτης υφής από ένα σύστημα, τότε μπορεί με σχετικά καλή ακρίβεια να εκτιμηθεί για ένα άλλο σύστημα π.χ. από το Σχήμα 4. Στη

συνέχεια μπορούν να προστεθούν οι ελλείποντες όροι, προκειμένου να βαθμονομηθεί η βραχομάζα με το ζητούμενο γεωτεχνικό σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας.







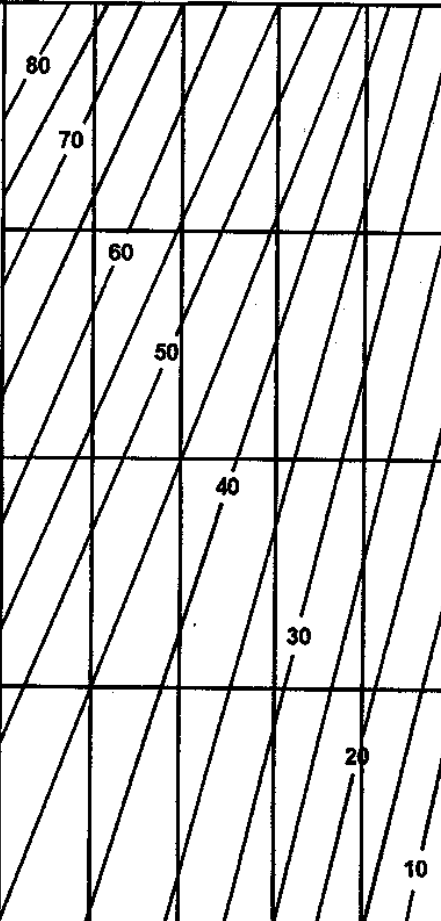
Σχήμα 5. Συσχέτιση δεικτών σε πραγματικά έργα

2.4 Εφαρμογή 1.

Δίνονται, $GSI=40$, $\sigma_{ci}=50\text{MPa}$, $m_i=10$.

- α. Υπολογίστε τη μονοαξονική εφελκυστική και θλιπτική αντοχή της βραχομάζας.
- β. Σχεδιάστε την καμπύλη του κριτηρίου (0 μέχρι $0.25\sigma_{ci}$).
- γ. Μειώστε ξεχωριστά κάθε μία από τις τρεις παραπάνω παραμέτρους κατά 20%, και υπολογίστε τη μείωση της μονοαξονικής εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχή της βραχομάζας.
- δ. Σχεδιάστε τις τρεις νέες καμπύλες που προκύπτουν.

Πίνακας 1. Εκτίμηση του GSI με βάση τον τεκτονισμό και την ποιότητα των ασυνεχειών της βραχομάζας (Hoek et al., 1995).

<p style="text-align: center;">GSI</p> <p style="text-align: center;">ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ</p> <p>Εκτιμήστε τη μέση τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής από τις ισარიθμητικές. Μην προσπαθείτε να είστε πολύ ακριβής. Παράθεση ενός εύρους τιμών του GSI από 36 έως 42 είναι πιο πραγμαστική από τον καθορισμό μίας τιμής GSI=38.</p>		<p style="text-align: center;">ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</p> <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, πρόσφατες μη αποσπασθωμένες επιφάνειες</p> <p>ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθωμένες, σκληρο-όξειδωμένες επιφάνειες</p> <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μερική αποσπασθωμένες ή εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p> <p>ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές, πολύ αποσπασθωμένες επιφάνειες, με πυκνές επικαλύψεις ή γοιώσεις από γωνιώδη θραύσματα</p> <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Ολισθηρές, πολύ αποσπασθωμένες επιφάνειες με μαλακές αργιλικές επικαλύψεις ή γοιώσεις</p>	
<p>Δομή του πετρώματος</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p>ΟΓΚΟΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΟ - Πολύ καλά αλληλοεμπλεκόμενη βραχομάζα, αποτελούμενη από κυβικά τεμάχια, σχηματιζόμενα από τρία, ορθογωνικά τεμνόμενα, συστήματα ασυνεχειών</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΟ - Αλληλοεμπλεκόμενη, μερικά διαταραγμένη βραχομάζα, αποτελούμενη από γωνιώδη τεμάχια, πολλαπλών επιφανειών, σχηματιζόμενα από τέσσερα ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών</p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;">  <p>ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΟ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΟ - Πτυχωμένο και/ή ρηγματωμένο πέτρωμα αποτελούμενο από γωνιώδη τεμάχια σχηματιζόμενα από πολλά τεμνόμενα συστήματα ασυνεχειών</p> </div> <div>  <p>ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΕΝΟ - Πτωχά αλληλοεμπλεκόμενη, κατακερματισμένη βραχομάζα, αποτελούμενη από ένα μίγμα γωνιωδών και στρογγυλεμένων βραχωδών τεμαχίων</p> </div> </div>	<p style="text-align: center;">Μειούμενη ποιότητα της επιφάνειας</p> 		

Πίνακας 2. Υπολογισμός του GSI με βάση με τον πίνακα του Bieniawski (1976)

Παράμετρος		Τιμές και βαθμοί						
1	Δείκτης αντοχής σημειακής φόρτισης	>8	4-8	2-4	1-2	Στις χαμηλές αυτές τιμές προτιμάται η τιμή της μονοαξονικής αντοχής		
	Αντοχή άρρηκτου πετρώματος [[MPa]	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή	>200	100-200	50-100	25-50	10-25	3-10
	Βαθμοί (1)	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD [%]	90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Βαθμοί (2)	20	17	13	8	3		
3	Απόσταση ασυνεχειών [m]	>3	1-3	0.3-1	50-300	<50		
	Βαθμοί (3)	30	25	20	10	5		
4	Κατάσταση διακλάσεων	Πολύ τραχείες Μη συνεχείς Χωρίς διαχωρισμό Σκληρά τοιχώματα	Λίγο τραχείες Διαχωρισμός <1mm Σκληρή επαφή τοιχωμάτων	Λίγο τραχείες Διαχωρισμός <1mm Μαλακή επαφή τοιχωμάτων	Ολισθαίνουσες ή υλικό ρηγμάτων <5mm ή ανοικτές διακλάσεις 1-5mm Συνεχείς διακλάσεις	Μαλακό υλικό ρηγμάτων πάχους >5mm ή ανοικτές διακλάσεις >5mm Συνεχείς διακλάσεις		
	Βαθμοί (4)	25	20	12	6	0		

3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

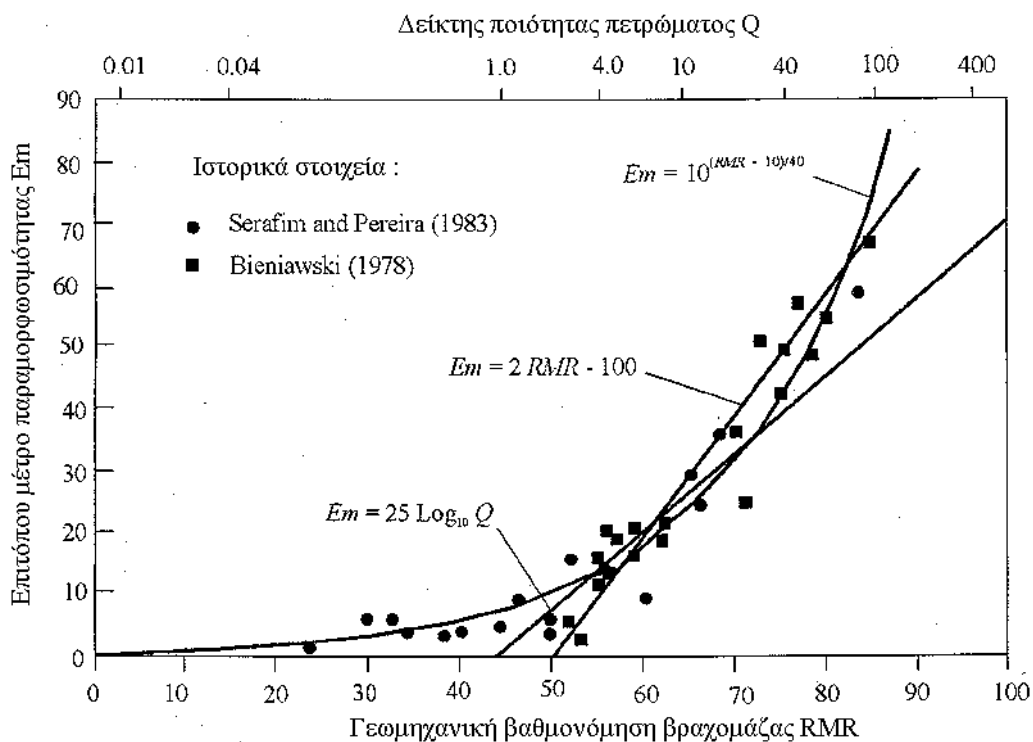
3.1 Μέτρο παραμορφωσιμότητας

Η παραμορφωσιμότητα του πετρώματος, πριν από τη διαρροή του, χαρακτηρίζεται από το μέτρο παραμορφωσιμότητας E_m . Τούτο δίνεται από τους Serafim and Pereira (1983) (Σχήμα 6) και Hoek and Brown (1997) αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$\sigma_{ci} \geq 100 \text{ MPa} \Rightarrow E_m [\text{GPa}] = 10^{((GSI-10)/40)}$$

$$\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa} \Rightarrow E_m [\text{GPa}] = \sqrt{\frac{\sigma_{ci} [\text{MPa}]}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

Εξίσωση 5



Σχήμα 6. Μέτρο παραμορφωσιμότητας με βάση την ποιότητα της βραχομάζας.

Η τιμή του λόγου του Poisson για καλής ποιότητας πετρώματα δύναται να ληφθεί ως 0.2, για μέτριας ποιότητας ως 0.25 και για πτωχής ποιότητας ως 0.3.

3.2 Εφαρμογή 2.

Δίνονται, $GSI=40$, $\sigma_{ci}=50\text{MPa}$, $m_i=10$.

α. Υπολογίστε το μέτρο παραμορφωσιμότητας E της βραχομάζας.

β. Μειώστε κάθε μία από τις τρεις παραπάνω παραμέτρους κατά 20%, και υπολογίστε τη μείωση του μέτρου παραμορφωσιμότητας.

4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Η αντοχή του πετρώματος χαρακτηρίζεται συνήθως με το μη γραμμικό κριτήριο Hoek-Brown. Συχνά όμως, κατά την ανάλυση των κατασκευών, απαιτείται η χρήση του γραμμικού κριτηρίου Mohr-Coulomb. Επομένως τίθεται η ανάγκη βέλτιστης μετατροπής των παραμέτρων του πρώτου κριτηρίου σε αυτές του δεύτερου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν σταδιακά διάφορες μέθοδοι.

4.1 Ακριβής απεικόνιση του κριτηρίου HB στο χώρο τ - σ_n

Για κάθε σημείο της περιβάλλουσας HB στο επίπεδο σ_1 - σ_3 , που χαρακτηρίζεται από τις κύριες τάσεις και την κλίση της περιβάλλουσας στο σημείο αυτό, αντιστοιχεί ένα ζεύγος τιμών σ_n , τ που ορίζει το αντίστοιχο σημείο στο επίπεδο σ - τ . Η αντιστοιχία δίνεται από τις σχέσεις (Balmer, 1952):

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\partial\sigma_1 / \partial\sigma_3 + 1}$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \cdot \sqrt{\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \partial\sigma_1 / \partial\sigma_3} \cdot \sqrt{\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3}}$$

$$\tan \beta = \frac{\tau}{\sigma_n - \sigma_3} = \sqrt{\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3}}$$

Εξίσωση 6

Η κλίση της περιβάλλουσας Hoek-Brown σε κάθε σημείο της υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial\sigma_1}{\partial\sigma_3} = 1 + \frac{a \cdot m_b}{(m_b \sigma_{3N} + s)^{1-a}}$$

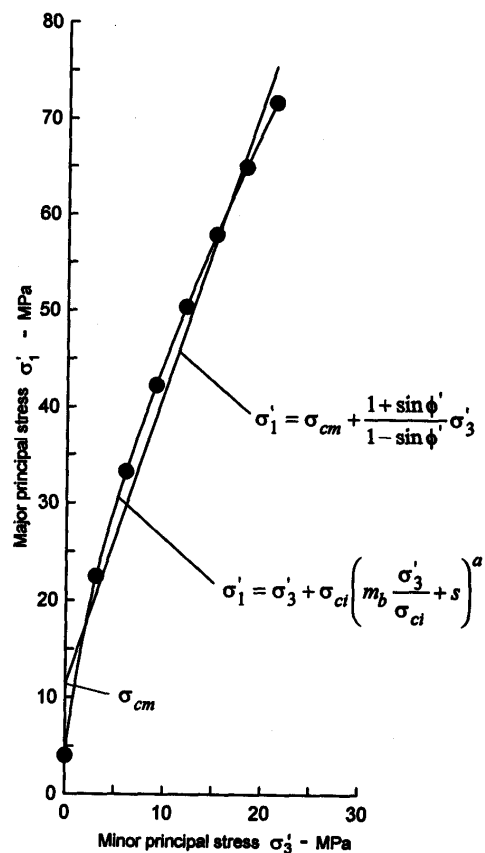
Εξίσωση 7

Για τιμή του $a=0.5$, οι σχέσεις του Bray (Σχήμα 8), που δίνονται στο κεφάλαιο 6, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τη σχεδίαση της περιβάλλουσας από το χώρο σ_1 - σ_3 στο χώρο τ - σ_n .

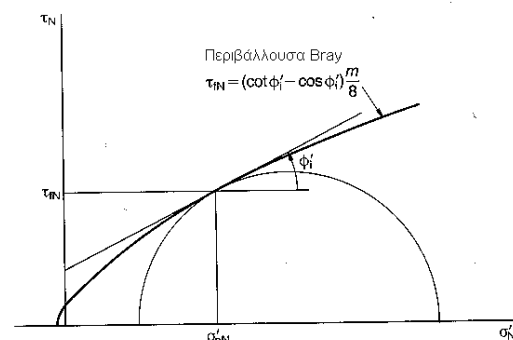
4.2 Γραμμικές παράμετροι για δεδομένο εύρος

4.2.1 Μέθοδος εκτίμησης

Ο υπολογισμός μέσω των τιμών των παραμέτρων του κριτηρίου Mohr-Coulomb επιτυγχάνεται ως εξής: Λαμβάνονται 8 ζεύγη τιμών σ_1, σ_3 (Σχήμα 7) της γνωστής περιβάλλουσας H-B, στο διάστημα $[0, 0.25\sigma_{ci}]$, με γραμμική παλινδρόμηση μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των σ_c^{MC} , $\tan\psi$. Από τις παραμέτρους αυτές υπολογίζουμε τις παραμέτρους ϕ και c .



Σχήμα 7. Ζεύγη τιμών για γραμμική παλινδρόμηση.



Σχήμα 8. Στιγμαία συνοχή και γωνία τριβής

4.2.2 Παράδειγμα εκτίμησης παραμέτρων MC από τις παραμέτρους HB

Στο Σχήμα 9 δίνεται φύλλο εργασίας για τον υπολογισμό των ισούναμων παραμέτρων με την προτεινόμενη από τους Hoek and Brown (1997) μέθοδο. Στο Σχήμα 10 σχεδιάζονται η περιβάλλουσα H-B του παραδείγματος και μια προσεγγιστική περιβάλλουσα M-C στο επίπεδο σ_1 - σ_3 .

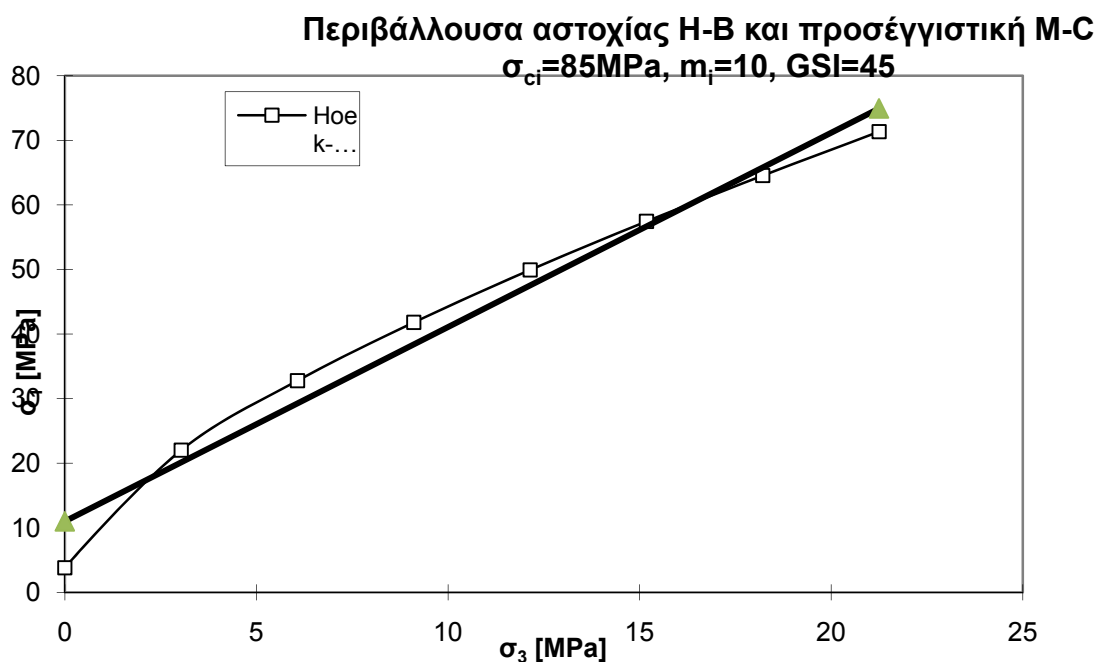
Hoek-Brown και ισοδύναμο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Εισαγωγή	sigci=	85 MPa	mi=	10	GSI=	45	D=	0
Εξοδος	mb=	1,40256	s=	0,002218	a=	0,508086		
	sigtm=	-0,13427 MPa						
	k=	3,008729	phi=	30,07206 μοίρες	coh=	3,165637 MPa		
	sigcm=	10,98203 MPa	E=	6913,683 MPa				
Line:	0	21,25						
	10,98203	74,91752						

Υπολογισμοί

sig3	-0,13427	1,00E-10	3,035714	6,071429	9,107143	12,14286	15,17857	18,21429	21,25
sig1	0	3,810204	22,01798	32,77495	41,79895	49,91005	57,43274	64,53523	71,31809

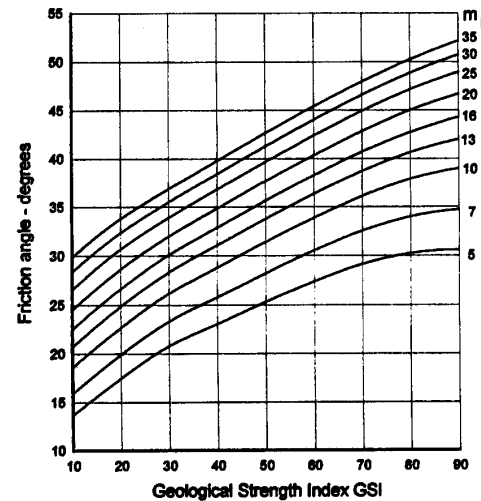
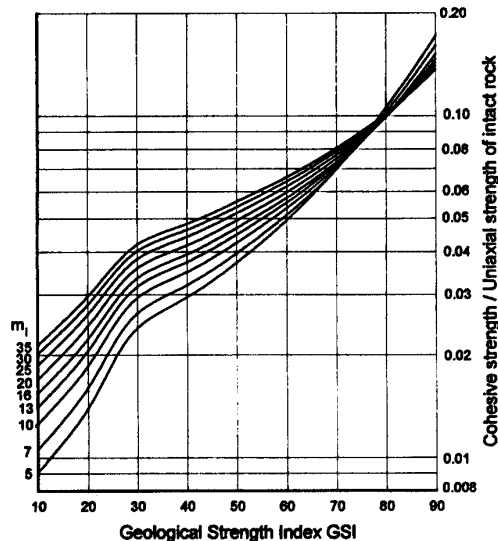
Σχήμα 9. Φύλλο εργασίας παραδείγματος



Σχήμα 10. Περιβάλλουσα αστοχίας H-B και προσεγγιστική M-C

4.2.3 Διαγράμματα εκτίμησης των παραμέτρων του κριτηρίου Mohr-Coulomb

Παρατηρούμε ότι η κάθε περιβάλλουσα στο χώρο $\sigma'_{1N}, \sigma'_{3N}$ εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους GSI και m_i . Επομένως για κάθε ζεύγος τιμών GSI και m_i , με εφαρμογή της προηγούμενης τυποποιημένης διαδικασίας της παραγράφου 4.2.1, υπολογίζεται μονοσήμαντα το ζεύγος τιμών c/σ_{ci} και ϕ . Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι Hoek-Brown, κατασκεύασαν διαγράμματα άμεσης εκτίμησης των παραμέτρων c/σ_{ci} και ϕ , από τις γνωστές παραμέτρους GSI και m_i . Στο Σχήμα 11 δίνεται το διάγραμμα εκτίμησης της συνοχής και στο Σχήμα 12 το διάγραμμα εκτίμησης της γωνίας τριβής, που αντιστοιχούν σε μία μέση προσαρμοσμένη ευθύγραμμη περιβάλλουσα στην καμπύλη περιβάλλουσα Hoek-Brown.



Σχήμα 11. Διάγραμμα εκτίμησης της αντίστοιχης συνοχής

Σχήμα 12. Διάγραμμα εκτίμησης της αντίστοιχης γωνίας τριβής

4.3 Γραμμικές παράμετροι για μεταβαλλόμενο εύρος

Ο υπολογισμός των ισοδυνάμων παραμέτρων μέσα σε σταθερό εύρος τιμών, ανεξάρτητο του εντατικού πεδίου, μολονότι είχε το πλεονέκτημα της δημιουργίας διαγραμμάτων γενικής χρήσης, εν τούτοις δεν ήταν σε θέση να αντιμετωπίσει την ανάλυση πραγματικών προβλημάτων, όπου ήταν φανερό ότι οι ισοδύναμες παράμετροι θα αναφέρονταν στο πραγματικό εύρος φόρτισης του πετρώματος. Το εύρος αυτό φόρτισης είναι το εύρος φόρτισης της ζώνης του διαρρέοντος πετρώματος (Sofianos & Halakatevakis, 2002), δηλαδή από p_i έως p_e , όπου p_i η πίεση αντιστήριξης του πετρώματος, και p_e η πίεση στη διεπιφάνεια μεταξύ ζώνης διαρροής και ελαστικού πετρώματος. Η πρώτη θα πρέπει να εκτιμηθεί και η δεύτερη να υπολογιστεί.

4.3.1 Αρχικό κριτήριο H-B

Το αρχικό κριτήριο H-B είναι παραβολή 2^{ου} βαθμού, και ως εκ τούτου η πίεση p_e στη διεπιφάνεια ελαστικής πλαστικής ζώνης μπορεί να υπολογιστεί από κλειστή λύση (Sofianos & Halakatevakis, 2002).

$$p_{e(HB)} = p_o - M \cdot \sigma_{ci} \Leftrightarrow p_{eN(HB)} = p_{oN} - M \quad (8)$$

$$M = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m_b}{4}\right)^2 + m_b \cdot p_{oN} + s} - \frac{m_b}{8} \quad (9)$$

Επομένως, εφόσον απαιτείται μία ακριβέστερη εκτίμηση των ισοδύναμων παραμέτρων αντοχής, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το παρακάτω φύλο υπολογισμού.

Πίνακας 1. Φύλο για τον υπολογισμό των ισοδύναμων παραμέτρων αντοχής Mohr-Coulomb από τις αντίστοιχες Hoek-Brown, με εφαρμογή διαδικασίας προσαρμογής σε μεταβαλλόμενο εύρος τιμών (Sofianos and Halakatevakis, 2002).

Input	sig _{ci} (MPa)=	20	m _i =	10	GSI=	25		
	p _o (MPa)=	10	p _i (MPa)=	0.2				
Output	m _b =	0.69	s=	0.00024	a=	0.5		
	tan ψ	2.24	φ(degrees)=	22.5	coh(MPa)=	0.77		
	sig _{cm} (MPa)=	2.30	E(MPa)=	1061	p _{oN} =	0.5		
	M=	0.22	p _{eN} =	0.280	p _e [MPa]=	5.609		
					Δσ ₃ =	0.773		
sig ₃	2.00E-01	9.73E-01	1.75E+00	2.52E+00	3.29E+00	4.06E+00	4.84E+00	5.61E+00
sig ₁	1.8864	6.640669	6.651061	8.406828	10.02049	11.54016	12.99171	14.39093

Τύποι

$$m_b = m_i \cdot \text{EXP}((\text{GSI}-100)/28)$$

$$s = \text{EXP}((\text{GSI}-100)/9)$$

$$a = 0.5$$

$$\tan \psi = \text{LINEST}(B10:I10; B9:I9)$$

$$\phi = \text{ASIN}((\tan \psi - 1)/(\tan \psi + 1)) \cdot 180/\text{PI}()$$

$$\text{coh} = \text{sig}_{cm} / (2 \cdot \text{SQRT}(\tan \psi))$$

$$\text{sig}_{cm} = \text{INDEX}(\text{LINEST}(B10:I10; B9:I9); 2)$$

$$E = \text{IF}(\text{sig}_{ci} > 100, 1000 \cdot 10^{((\text{GSI}-10)/40)}, \text{SQRT}(\text{sig}_{ci}/100) \cdot 1000 \cdot 10^{((\text{GSI}-10)/40)})$$

$$M = 0.5 \cdot \text{SQRT}((m_b/4)^2 + m_b \cdot p_{oN} + s) - m_b/8$$

$$p_{oN} = p_o / \text{sig}_{ci}$$

$$p_{eN} = p_{oN} - M$$

$$p_e = p_{eN} \cdot \text{sig}_{ci}$$

$$\Delta \sigma_3 = (p_e - p_i) / 7$$

$$\text{sig}_3 = \text{start at } p_i \text{ and increment in 6 steps of } \Delta \sigma_3 \text{ to } p_e$$

$$\text{sig}_1 = \text{sig}_3 + \text{sig}_{ci} \cdot (((m_b \cdot \text{sig}_3) / \text{sig}_{ci}) + s)^a$$

Note: B10:I10 is the range of sig₁, and B9:I9 is the range of sig₃.

4.3.2 Γενικευμένο Κριτήριο H-B

Για το γενικευμένο κριτήριο η ακτινική τάση στο όριο ελαστικής πλαστικής ζώνης δίνεται (Sofianos AI, 2003) από την παρακάτω σχέση:

$$p_{eN} = p_{eoN} - \frac{p_{eoN} + \frac{1}{2}(m_b p_{eoN} + s)^a - p_{oN}}{1 + \frac{a}{2} m_b (m_b p_{eoN} + s)^{a-1}} \quad (10)$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία όπως και προηγουμένως μπορούν να υπολογιστούν οι ισοδύναμες παράμετροι. Αντίθετα, οι Hoek et al. (2002) με στατιστική επεξεργασία αριθμητικών επιλύσεων αξιsymμετρικών διατάξεων σιηράγγων, προτείνουν ένα ιδεατό εύρος για τον υπολογισμό των ισοδύναμων παραμέτρων, με κάτω όριο την σ_t και άνω όριο $\sigma_{3\max}$, που δίνονται από τις επόμενες σχέσεις:

$$\sigma_{tN} = -\frac{s}{m_b} \quad (11)$$

$$\sigma_{3\max N} = 0.47 \cdot p_{oN} \cdot \left(\frac{\sigma_{cmN}}{p_{oN}} \right)^{0.06} \quad (12)$$

$$\sigma_{cmN} = \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left[\left(\frac{m_b}{4} \right) + s \right]^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (13)$$

Με χρήση αυτών των σχέσεων, από το πρόγραμμα ROCLAB στον ιστοτόπο της <http://www.roscience.com>, υπολογίζονται οι ισοδύναμες παράμετροι.

4.3.3 Ψαθυρή συμπεριφορά πετρώματος

Τα πετρώματα στη ζώνη διαρροής της σήραγγας εν τούτοις συνήθως δεν μπορεί να θεωρηθούν ότι διατηρούν την αρχική αντοχή τους. Επομένως, στις αναλύσεις η κορυφαία αντοχή θα πρέπει να μειωθεί στην πλαστική ζώνη ώστε να αντανακλά την πραγματικότητα. Οι Sofianos & Nomikos (2006) κάνοντας χρήση της σχέσης (10) για τον υπολογισμό της πίεσης στη διεπιφάνεια ελαστικής – πλαστικής ζώνης, δίνουν τις κλειστές λύσεις για την εκτίμηση των ισοδύναμων παραμέτρων τόσο στην ελαστική όσο και στην πλαστική ζώνη, με δύο διαφορετικές μεθοδολογίες, οι οποίες βρίσκονται στον ιστοτόπο <http://www.tunlab.metal.ntua.gr>. Η πρώτη, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις υπολογίζει τις παραμέτρους για μια βέλτιστη προσαρμογή της περιβάλλουσας MC στην περιβάλλουσα HB, ενώ η δεύτερη απαιτεί βέλτιστη σύμπτωση στα αποτελέσματα.

5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ

5.1 Ψαθυρή έως όλκιμη συμπεριφορά

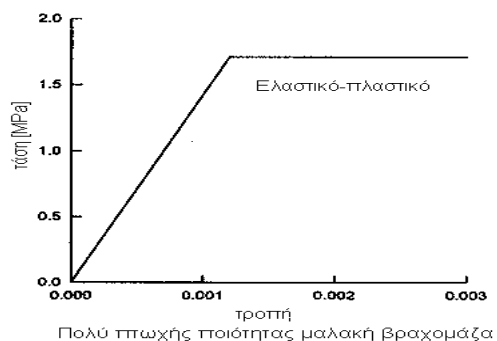
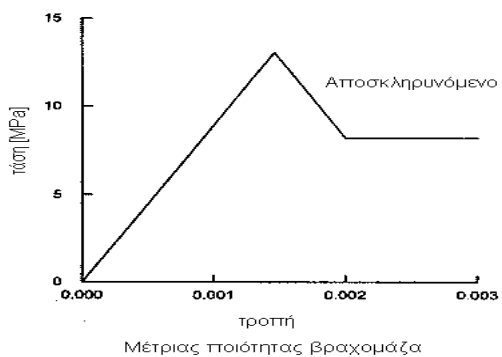
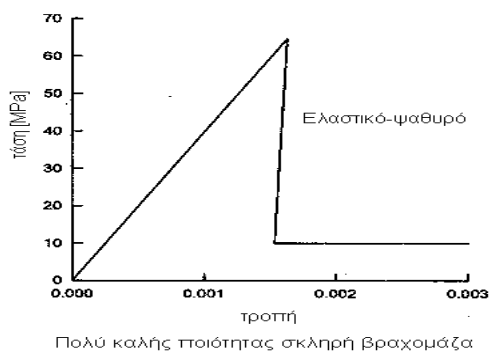
Η συμπεριφορά του πετρώματος μετά τη θραύση εξαρτάται πολύ σημαντικά από την ψαθυρότητά του. Πολύ καλής ποιότητας πετρώματα μετά τη θραύση τους χάνουν μεγάλο μέρος της αντοχής τους. Αντίθετα, μαλακά πετρώματα αναμένεται να έχουν μία πλάστιμη μάλλον συμπεριφορά.

5.2 Παραδείγματα

Παραδείγματα δίνονται από τους Hoek and Brown (1997), για:

- α. Ψαθυρή συμπεριφορά, $\nu=0.2$, $\alpha(\text{διόγκωση})=\varphi'/4=46^\circ/4$, $\varphi'/\varphi_f=46^\circ/38^\circ$, $c_f'=0$, $E_m/E_{fm}=42\text{GPa}/10\text{GPa}$. Χαλαρούμενο πέτρωμα, $\nu=0.25$, $\alpha(\text{διόγκωση})=\varphi'/8=33^\circ/8$, $\sigma_{cm}/\sigma_{fcm}=13/8$, $E_m/E_{fm}=9\text{GPa}/5\text{GPa}$. Ελαστοπλαστικό πέτρωμα, $\nu=0.3$, $\alpha(\text{διόγκωση})=0^\circ$, $\sigma_{cm}/\sigma_{fcm}=1.7/1.7$, $E_m/E_{fm}=1.4\text{GPa}/1.4\text{GPa}$

Στο Σχήμα 13 φαίνεται η αναμενόμενη συμπεριφορά πετρωμάτων διαφόρων ποιοτήτων κατά την εξάιτησή τους σε δοκιμή θλίψης με ελεγχόμενη παραμόρφωση.



Σχήμα 13. Συμπεριφορά των πετρωμάτων μετά τη θραύση

6 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΞΑΣΚΗΣΗΣ

6.1 Συμπαγές ασθενές πέτρωμα

Συνεκτικό λατυποπαγές με ελάχιστες ασυνέχειες.

$$\sigma_{ci}=51\text{MPa}$$

$$m_i=16.3$$

$$\text{GSI}=75$$

Υπολογίστε τα γενικά c και ϕ .

6.2 Συμπαγές ισχυρό πέτρωμα

Συμπαγής γενεύσιος με πολύ λίγες διακλάσεις

$$\sigma_{ci}=110\text{MPa}$$

$$m_i=17.7$$

$$\text{GSI}=75$$

Υπολογίστε τα γενικά c και ϕ .

6.3 Μέτριας ποιότητας βραχομάζα

Μαρμαρυγιακός χαλαζιακός σχιστόλιθος, διακλασμένος

$$\sigma_{ci}=30\text{MPa}$$

$$m_i=15.6$$

$$\text{GSI}=65$$

Υπολογίστε τα γενικά c και ϕ .

6.4 Πτωχής ποιότητας βραχομάζα σε μικρό βάθος

Αποσαθρωμένος αθηναϊκός σχιστόλιθος

$$\sigma_{ci}=5\text{MPa}$$

$$m_i=9.6$$

$$\text{GSI}=20$$

Υπολογίστε τα γενικά c και ϕ .

6.5 Πτωχής ποιότητας βραχομάζα σε υψηλό εντατικό πεδίο

Γραφιτικοί φυλλίτες

$$\sigma_{ci}=15\text{MPa}$$

$$m_i=10$$

GSI= 24

Υπολογίστε τα γενικά c και ϕ .

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Balmer G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. *Am. Soc. Test. Mat.* 52., 1269-1271.
- Bieniawski Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. Proc. of the *Symp. on Exploration for rock Engineering*, 97-106. Balkema, Cape Town.
- Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering rock mass classification*, p251, Wiley, N.Y.
- Hoek E. and Brown E.T. (1980). *Underground excavations in Rock*, p.527. London, I.M.M.
- Hoek E. (1983). Strength of jointed rock masses, 1983 Rankine lecture, *Geotechnique* 33(3), 187-223.
- Hoek E. and Brown E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update. In rock Engineering for Underground excavations, Proc. *15th Canadian Rock Mech. Symp.* (Ed. Curran J.C.), 31-38. Dept. Civil Eng., University of Toronto, Toronto.
- Hoek E., Wood D. and Shah S. (1992). A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Proc. *Rock Characterization, EUROCK'92* (Ed. Hudson J.A.), pp209-214, B.G.S.
- Hoek E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal* 2(2), 4-16.
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, p.215. Balkema, Rotterdam.
- Hoek E. and Brown E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.
- Hoek E., Marinos P. and Benissi M. (1998). "Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation", *Bull. Eng. Geol. Env.* 57:151-160, Springer Verlag.
- Hoek E, Carranza -Torres C and Corkum B (2002). "Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition", Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 1, 267-273.
- Serafim J.L. and Pereira J.P. (1983). Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski. Proc. Int. Symp. on *Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon 1(II), 33-44.
- Sofianos A.I. and Halakatevakis N. (2002). "Equivalent tunnelling Mohr-Coulomb strength parameters for given Hoek-Brown ones", Intern. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences, in Press.
- Sofianos, A.I. 2003. Tunnelling Mohr-Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the generalized Hoek-Brown failure criterion. *Int J Rock Mech Min Sci.* 40: 435–440.
- Sofianos, A.I., Nomikos P.P. 2006. Equivalent Mohr–Coulomb and generalized Hoek–Brown strength parameters for supported axisymmetric tunnels in plastic or brittle rock. *Int J Rock Mech Min Sci.* 43: 683-704.

Tzamos S and Sofianos AI (2007). “A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices”, *International Journal of Rock Mech. & Mining Sciences*, 44, 477-495.