

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

2.1 Γενικά

Η εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και υποστήριξης υπογείων έργων. Η κυριότερη δυσχέρεια στην επίλυση του προβλήματος είναι ότι οι εργαστηριακές δοκιμές γίνονται σε δείγματα αραγούς βράχου (χωρίς ασυνέχειες) και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας (που περιλαμβάνει και ασυνέχειες). Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών συνήθως επιλέγονται τα υγιέστερα δείγματα βράχου (επειδή σ' αυτά είναι ευχερέστερη η μόρφωση δοκιμίων), πράγμα που επιτείνει τη μη-αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών. Τέλος, ακόμη και οι επιτόπου δοκιμές γίνονται σε περιορισμένου όγκου δείγματα και συνεπώς δεν είναι αντιπροσωπευτικές των επιτόπου συνθηκών και δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικές τιμές των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας. Ως εκ τούτου οι μηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας συνήθως εκτιμώνται με έμμεσο τρόπο επί τη βάσει εμπειρικών συσχετίσεων με δείκτες ποιότητας της βραχώμαζας που προκύπτουν από τις μεθόδους ταξινόμησης της βραχώμαζας.

2.2 Αρχική εντατική κατάσταση

Η εντατική κατάσταση της βραχώμαζας πριν από την κατασκευή υπογείων έργων συνήθως είναι η γεωστατική, δηλαδή περιγράφεται από κατακόρυφες και οριζόντιες κύριες ενεργές τάσεις (σ'_v και σ'_h αντιστοίχως) με τιμές:

$$\sigma'_v = \gamma h - u_o, \quad \sigma'_h = K_o \sigma'_v$$

όπου: h = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

γ = το ειδικό βάρος της βραχώμαζας

u_o = η υδατική πίεση πόρων

K_o = ο συντελεστής οριζόντιας πίεσης

Το ειδικό βάρος της βραχώμαζας κυμαίνεται μεταξύ 23-26 kN/m³. Στην περίπτωση υδροστατικής πίεσης πόρων: $u_o = \gamma_w d$ όπου (γ_w) είναι το ειδικό βάρος του νερού (10 kN/m³) και (d) είναι το πιεζομετρικό ύψος. Τέλος, ο συντελεστής (K_o) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4-1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχώμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις: $K_o = 0.6-1.0$. Σε αποσαθρωμένες βραχώμαζες: $K_o = 0.4-0.7$. Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής K_o μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έχουν μετρηθεί τιμές έως και 4 στην περίπτωση έντονου θλιπτικού τεκτονικού καθεστώτος) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές ($K_o = 0-0.3$ στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500 μέτρων) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισότροπη ($K_o = 1$), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100-400m) συνήθως μετρώνται τιμές του K_o αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του K_o που υπερβαίνουν τη μονάδα έχουν μετρηθεί σε χώρες που τελούν υπό έντονο θλιπτικό τεκτονικό καθεστώς (Νότιος Αφρική, Σκανδιναβικές

χώρες, Καναδάς) και δεν είναι βέβαιο ότι μπορούν να εφαρμοσθούν στην Ελλάδα (όπου οι τεκτονικές τάσεις στον παρόντα γεωλογικό χρόνο είναι εφελκυστικές). Σημειώνεται ότι η αξιόπιστη μέτρηση του συντελεστή (K_o) είναι δυσχερής και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του K_o είναι:

1. Η δοκιμή πρεσσιομέτρου ή ντιλατομέτρου.
2. Η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης.
3. Η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring).

Σε αρκετές περιπτώσεις, η αρχική εντατική κατάσταση της βραχώμαζας δεν είναι γεωστατική όπως:

1. Κοντά στην επιφάνεια εδαφικών πρανών. Στην περίπτωση αυτή οι κύριες τάσεις δεν είναι κατά τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα λόγω των διατμητικών τάσεων που οφείλονται στην κλίση της επιφάνειας του εδάφους.
2. Σε μεγάλα βάθη, εφόσον το καθεστώς των τεκτονικών τάσεων δεν ακολουθεί την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση.
3. Σε έντονα ανισότροπους σχηματισμούς (π.χ. σχηματισμούς με έντονη στρωσιγένεια) εφόσον οι κύριες διευθύνσεις της ανισοτροπίας δεν συμπίπτουν με την κατακόρυφη ή την οριζόντια.

2.3 Παράμετροι παραμορφωσιμότητας

Το μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας μπορεί να εκτιμηθεί από την εμπειρική σχέση:

$$E = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot \text{alog}\left(\frac{RMR-10}{40}\right) \quad (1)$$

όπου σ_{ci} (σε MPa) είναι η μοναξονική αντοχή του πετρώματος (χωρίς ασυνέχειες), RMR είναι ο δείκτης Bieniawski (Rock Mass Rating) ή ο δείκτης GSI (Geological Strength Index) και το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει σε GPa. Η σχέση αυτή προτάθηκε προσφάτως από τον Hoek (1997) και αποτελεί τροποποίηση της εμπειρικής σχέσης των Serafim and Pereira (1983).

Ο λόγος του Poisson μπορεί να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο πίνακα:

Τύπος βραχώμαζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0.20-0.25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχώμαζα	0.25-0.30

2.4 Παράμετροι αντοχής

Η ρηγματωμένη βραχώμαζα συνήθως έχει καμπύλη περιβάλλουσα των κύκλων Mohr στην κατάσταση αστοχίας και συνεπώς η συμπεριφορά της δεν μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb (το οποίο διαθέτει ευθύγραμμη περιβάλλουσα αστοχίας). Για το λόγο αυτό οι βραχώμαζες

συνήθως προσομοιάζονται μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown το οποίο έχει καμπύλη περιβάλλουσα αστοχίας. Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (2)$$

όπου: σ_1, σ_3 = μέγιστη και ελάχιστη κύρια ενεργός τάση στην κατάσταση αστοχίας
 σ_{ci} = μοναξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος (χωρίς ασυνέχειες)
 m_b, s, α = σταθερές που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της βραχόμαζας

Η μοναξονική θλιπτική αντοχή (σ_{ci}) του πετρώματος μπορεί να εκτιμηθεί από εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια χωρίς ασυνέχειες δεδομένου ότι η επιρροή των ασυνεχειών της βραχόμαζας λαμβάνεται υπόψη μέσω άλλων παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown. Σε περίπτωση έλλειψης εργαστηριακών δοκιμών, προκαταρκτικές εκτιμήσεις της αντοχής του πετρώματος (σ_{ci}) μπορούν να γίνουν με βάση τους Πίνακες 1 και 2.

Οι σταθερές (m_b, s, α) εκφράζουν το βαθμό κερματισμού και αποσάθρωσης της βραχόμαζας και μπορούν να υπολογισθούν από τις εξής σχέσεις:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right) \quad (3\alpha)$$

Για $RMR > 25$: $s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right), \alpha = 0.50 \quad (3\beta)$

Για $RMR < 25$: $s = 0, \alpha = 0.65 - \frac{RMR}{200} \quad (3\gamma)$

Ο συντελεστής (m_i) εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και τυπικές τιμές του δίνονται στον Πίνακα 3. Στις ανωτέρω σχέσεις, ο δείκτης RMR μπορεί να αντικατασταθεί από το δείκτη GSI (ιδίως για βραχόμαζες με $RMR < 40$ όπου η χρήση του δείκτη RMR δεν είναι αξιόπιστη).

Με βάση το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown (σχέση 2) μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή της βραχόμαζας σε μοναξονική θλίψη ($\sigma_c = \sigma_1$ και $\sigma_3 = 0$) από τη σχέση:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^\alpha \quad (4)$$

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτουν οι τιμές που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

RMR ή GSI	σ_c / σ_{ci}
80	0.329
70	0.189
60	0.108
50	0.062
40	0.036
30	0.020
20	-
10	-

Οι τιμές που προκύπτουν από την ανωτέρω σχέση είναι γενικώς μικρότερες από τις μέσες αντοχές της βραχόμαζας σε μοναξονική θλίψη. Τούτο οφείλεται στην έντονη καμπυλότητα του κριτηρίου Hoek-Brown σε πολύ μικρές τάσεις. Για το λόγο αυτό, ο Hoek (1999) έχει προτείνει την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$\sigma_c = 0.019 \sigma_{ci} \exp\left(\frac{GSI}{20}\right) \quad (4a)$$

Για παράδειγμα, η ανωτέρω σχέση δίνει $\sigma_c / \sigma_{ci} = 0.085$ για $GSI = 30$, ενώ η σχέση (4) δίνει: $\sigma_c / \sigma_{ci} = 0.02$.

Αντιστοίχως, από τη σχέση (2) μπορεί να εκτιμηθεί και η αντοχή της βραχώμαζας σε μοναξονικό εφελκυσμό ($\sigma_t = -\sigma_3$ και $\sigma_l = 0$):

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left[\sqrt{m_b^2 + 4s} - m_b \right] \quad (5)$$

Η μή-μηδενική τιμή της εφελκυστικής αντοχής της βραχώμαζας οφείλεται στην αλληλεμπλοκή των κόκκων λόγω διασταλτικότητας (η οποία δημιουργεί μια φαινόμενη συνοχή σε βραχώμαζες με $RMR > 25$).

Αρκετά προγράμματα μή-γραμμικής ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχώμαζας γύρω από υπόγειες εκσκαφές δεν περιλαμβάνουν το κριτήριο Hoek-Brown αλλά το κριτήριο Mohr-Coulomb. Στις περιπτώσεις αυτές είναι χρήσιμη η συσχέτιση μεταξύ των δυο κριτηρίων, δηλαδή ο υπολογισμός των παραμέτρων αντοχής (c, φ) του κριτηρίου Mohr-Coulomb που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του κριτηρίου Hoek-Brown. Είναι προφανές ότι λόγω της διαφορετικής μορφής της περιβάλλουσας αστοχίας (καμπύλη περιβάλλουσα στο κριτήριο Hoek-Brown και ευθύγραμμη στο κριτήριο Mohr-Coulomb) η αντιστοιχία μεταξύ των δυο κριτηρίων αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή τάσεων όπου η καμπύλη περιβάλλουσα του κριτηρίου Hoek-Brown προσεγγίζεται με μια ευθεία. Η μέθοδος υπολογισμού των ισοδύναμων παραμέτρων (c, φ) από τις παραμέτρους του κριτηρίου Hoek-Brown περιγράφεται παρακάτω (για δεδομένη τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3):

1. Από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

υπολογίζεται η τάση (σ_1).

2. Από τη σχέση:

$$k = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + \alpha m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{\alpha-1}$$

υπολογίζεται η ποσότητα $k = (\partial \sigma_1 / \partial \sigma_3)$.

3. Από τις σχέσεις:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{1+k} k \quad \text{και} \quad \tau_a = (\sigma_a - \sigma_3) \sqrt{k} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{k}}{1+k}$$

υπολογίζονται η ορθή τάση (σ_a) και η διαμητική τάση (τ_a) στο επίπεδο αστοχίας.

4. Η ισοδύναμη γωνία τριβής (φ) και συνοχή (c) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\tan \varphi = \frac{1}{\tau_a} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \sigma_a \right) \quad \text{ή} \quad \sin \varphi = \frac{k-1}{k+1}$$

$$c = \tau_a - \sigma_a \tan \varphi$$

5. Τέλος, η γωνία (α) που σχηματίζει το επίπεδο αστοχίας με το επίπεδο επί του οποίου ασκείται η τάση (σ_1) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tan \alpha = \frac{\tau_a}{\sigma_a - \sigma_3} = \sqrt{k}$$

2.5 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχόμαζας

Με την πάροδο του χρόνου, η βραχόμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με συνέπεια:

1. Την αύξηση των παραμορφώσεων της βραχόμαζας (π.χ. σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας) εφόσον οι παραμορφώσεις δεν παρεμποδίζονται από έργα υποστήριξης.
2. Την αύξηση της φόρτισης των έργων υποστήριξης στις περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις της βραχόμαζας παρεμποδίζονται (π.χ. στην περίπτωση σηράγγων μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης).

Ο βαθμός ερπυσμού της βραχόμαζας ποικίλει μεταξύ πρακτικώς μηδέν (για βραχόμαζες με μεγάλες τιμές του δείκτη RMR) και αρκετά υψηλών τιμών (για βραχόμαζες με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και εδαφικούς σχηματισμούς). Τυπικά, ο βαθμός ερπυσμού μπορεί να περιγραφεί μέσω του ερπυστικού συντελεστή (k) ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό της ερπυστικής παραμόρφωσης της βραχόμαζας υπό μοναξονική θλίψη. Μια σχετικώς υψηλή τιμή του ερπυστικού συντελεστή (που αφορά κυρίως στιφρές-σκληρές αργίλους) είναι $k = 0.10$, δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο του χρόνου είναι ίση με το 10% της ελαστικής (αρχικής) παραμόρφωσης. Έτσι, για παράδειγμα, εάν η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση είναι 2%, η παραμόρφωση θα γίνει 2.2% σε ένα έτος, 2.4% εντός δέκα ετών και 2.6% εντός εκατό ετών. Στην περίπτωση παρεμπόδισης ανάπτυξης της ανωτέρω παραμόρφωσης, είναι προφανές ότι θα αυξηθεί η φόρτιση στην επένδυση της σήραγγας.

Το παραπάνω μοντέλο ερπυσμού της βραχόμαζας μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\varepsilon^t = k\varepsilon^e \log(t/t_0) \Rightarrow \varepsilon \equiv \varepsilon^e + \varepsilon^t = \varepsilon^e [1 + k \log(t/t_0)]$$

όπου k είναι ο ερπυστικός συντελεστής, ε^t είναι η ερπυστική παραμόρφωση τη χρονική στιγμή (t), ε^e είναι η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση, ε είναι η συνολική παραμόρφωση και (t_0) είναι ο χρόνος έναρξης των ερπυστικών παραμορφώσεων.

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι εάν ε_1 και ε_2 είναι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές t_1 και t_2 όπου $t_2 = 10xt_1$, τότε: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = k\varepsilon^e$, δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο χρόνου είναι ένα ποσοστό (k) της ελαστικής παραμόρφωσης.

Εναλλακτικά, η ανάπτυξη ερπυστικών παραμορφώσεων μπορεί να προσομοιωθεί μέσω απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας σε σχέση με τη βραχυχρόνια τιμή του (βλέπε σχέση 1). Στην περίπτωση αυτή, εάν $E_0 \equiv \sigma/\varepsilon^e$ είναι η βραχυχρόνια τιμή του μέτρου ελαστικότητας (τη χρονική στιγμή t_0) και $E \equiv \sigma/\varepsilon$ είναι η μειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας τη χρονική στιγμή (t), τότε:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + k \log(t/t_0)}$$

Ειδικότερα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μετά από n -χρονικούς κύκλους ($t = 10^n \cdot t_0$), θεωρώντας ότι $t_0 = 1.2$ μήνες ($n = 1$ για 1 έτος, $n = 2$ για 10 έτη και $n = 3$ για 100 έτη) θα είναι:

$$E = E_o \frac{1}{1 + nk}$$

Τυπικές τιμές εφαρμογής της ανωτέρω σχέσης φαίνονται στο ακόλουθο πίνακα:

ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ E/E_o

Ερπυστικός συντελεστής k	Χρονική περίοδος		
	1 έτος	10 έτη	100 έτη
0.02	0.980	0.961	0.943
0.05	0.952	0.909	0.870
0.10	0.909	0.833	0.769
0.15	0.870	0.769	0.690

Από τον ανωτέρω πίνακα φαίνεται ότι η απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού μπορεί να φθάσει και το 30% στην περίπτωση εδαφών με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.

Βιβλιογραφία

Hoek E. (1999) "*Support for very weak rock associated with faults and shear zones*" Proc. Intern. Symp. on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia, March 1999.