

Εφαρμογή του Κριτηρίου Θραύσεως Hoek - Brown σε Ανισότροπο Άρρηκτο Πέτρωμα

Application of the Hoek – Brown Criterion on the Anisotropic Intact Rock

ΣΑΡΟΓΛΟΥ, Χ. Ι. Υπ. Διδάκτωρ, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
ΤΣΙΑΜΠΑΟΣ, Γ. Αναπλ. Καθηγητής Τεχνικής Γεωλογίας, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
ΜΑΡΙΝΟΣ, Π. Γ. Καθηγητής Τεχνικής Γεωλογίας, Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Οι παράμετροι του κριτηρίου θραύσης Hoek – Brown (σ_{ci} , m_i και s) επηρεάζονται σημαντικά από την ανισοτροπία της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος. Στην παρούσα εργασία δίνεται η ποσοτική εκτίμηση αυτής της επίδρασης σε μεταμορφωμένα πετρώματα (σχιστόλιθος, γνεύσιος, μάρμαρο). Προτείνεται η ενσωμάτωση της ανισοτροπίας στο κριτήριο θραύσης, με την χρήση μιας νέας παραμέτρου (k), μέσω της οποίας εκτιμάται το εύρος της ελάχιστης και μέγιστης αντοχής του ανισότροπου άρρηκτου πετρώματος κατά την φόρτιση, για διάφορους προσανατολισμούς του επιπέδου ανισοτροπίας. Ο προσδιορισμός της παραμέτρου (k) προκύπτει από την ανάλυση αποτελεσμάτων τριαξονικών δοκιμών.

ABSTRACT : The Hoek – Brown criterion parameters (σ_{ci} , m_i and s) are significantly influenced by the strength anisotropy of intact rock. The present study aims to determine this effect in metamorphic rocks in Greece (schist, gneiss, marble). The criterion was modified by incorporating a new parameter (k), to account for the effect of strength anisotropy, thus being able to determine the strength of intact anisotropic rock under loading in different orientations of the plane of anisotropy. The range of the parameter (k) for the rocks tested has been analytically investigated from triaxial tests, carried out in different orientations of the foliation plane, and suggestions for its determination are made.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κριτήριο θραύσεως Hoek – Brown (1980) προτάθηκε για την εκτίμηση της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και της βραχώμαζας για ισότροπες συνθήκες. Παρ'όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της αντοχής και ανισότροπων πετρωμάτων. Η ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος οφείλεται στην ύπαρξη:

- α) του επιπέδου φολιδώσης (foliation) σε μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως σε σχιστόλιθους, γνευσίους και μάρμαρα,
- β) της λεπτο-στρωμάτωσης σε ιζηματογενή πετρώματα, όπως σε ιλυολίθους, αργιλόλιθους κ.α.

Για την εφαρμογή του σε ανισότροπα πετρώματα, απαιτείται η προσεκτική επιλογή

των παραμέτρων που εισάγονται σε αυτό, της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci}) και της παραμέτρου m_i .

Η γνώση της μέγιστης και της ελάχιστης αντοχής είναι σημαντική στην επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού τεχνικών έργων για τα ανισότροπα πετρώματα.

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

2.1 Εμπειρικό κριτήριο θραύσης Hoek & Brown

Το εμπειρικό κριτήριο όπως αρχικά προτάθηκε από τους Hoek – Brown (1980) για το άρρηκτο πέτρωμα δίνεται από την εξίσωση (1).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \sqrt{m_i \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right) + s} \quad (1)$$

Η συμπεριφορά των ανισότροπων άρρηκτων πετρωμάτων κατά τη θραύση (όπως των αργιλικών σχιστόλιθων, σχιστόλιθων, φυλλιτών, γνευσίων και μαρμάρων) εξαρτάται από την γωνία που σχηματίζουν τα επίπεδα αδυναμίας, της φολίδωσης, σε σχέση με το πεδίο των κυρίων τάσεων. Στα πετρώματα αυτά, ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες.

Οι παράμετροι του κριτηρίου Hoek – Brown για τον άρρηκτο βράχο (m_i , s) αναφέρονται σε δοκίμια στα οποία η δοκιμή μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης εκτελείται κάθετα στο επίπεδο της φολίδωσης. Η τιμή του m_i διαφέρει σημαντικά στην περίπτωση που η θραύση συμβεί πάνω σε επίπεδο αδυναμίας (Hoek E. & Brown E.T., 1997).

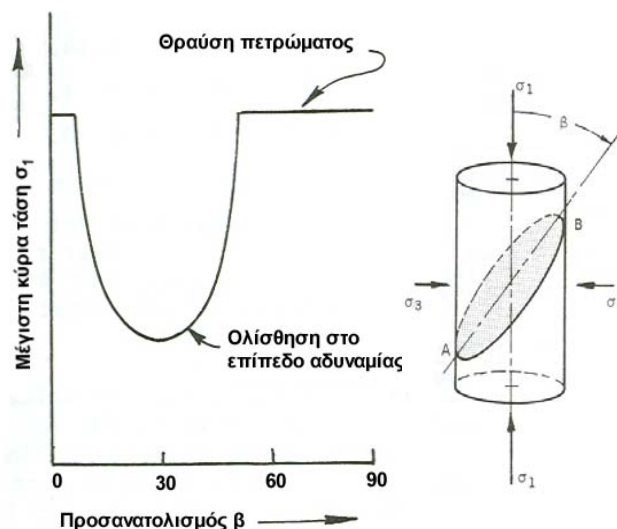
Κατά τους ίδιους, η μέγιστη τιμή σ_{ci} πρέπει να χρησιμοποιείται σε υψηλής αντοχής πετρώματα με καλό αλληλοκλείδωμα των κόκκων, ενώ η ελάχιστη τιμή για πετρώματα που έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και η βραχώμαζα είναι χαμηλής ποιότητας.

2.2 Πρόβλεψη ανισοτροπίας στο κριτήριο

Οι Hoek & Brown (1980) αναφέρουν ότι η θεωρία του “επιπέδου αδυναμίας”, όπως διατυπώθηκε από τους Jaeger & Cook (1976) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, είναι επαρκής για την περίπτωση που το άρρηκτο πέτρωμα συμπεριφέρεται ανισότροπα λόγω της ύπαρξης ενός επιπέδου αδυναμίας (επιπέδου ασυνέχειας) αλλά δεν περιγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος με «ενδογενή» ανισοτροπία που οφείλεται στη στρώση ή στην φολίδωση όπως των ιλυολίθων, σχιστολίθων, γνευσίων κτλ.

Για το λόγο αυτό προτείνουν την μεταβολή των παραμέτρων m και s του κριτηρίου τους σε σχέση με τον προσανατολισμό του επιπέδου φολίδωσης (β) ως προς τον κύριο άξονα φόρτισης.

Η μεταβολή των παραμέτρων m και s σε σχέση με τον προσανατολισμό γίνεται με τις εξισώσεις (2) και (3).



Σχήμα 1. Θεωρία του επιπέδου αδυναμίας (Jaeger & Cook, 1976).

Figure 1. Plane of weakness theory.

$$\frac{m}{m_i} = 1 - Ae^{-\left(\frac{\beta - \xi_m}{A2 + A3\beta}\right)^4} \quad (2)$$

$$s = 1 - Pe^{-\left(\frac{\beta - \xi_s}{P2 + P3\beta}\right)^4} \quad (3)$$

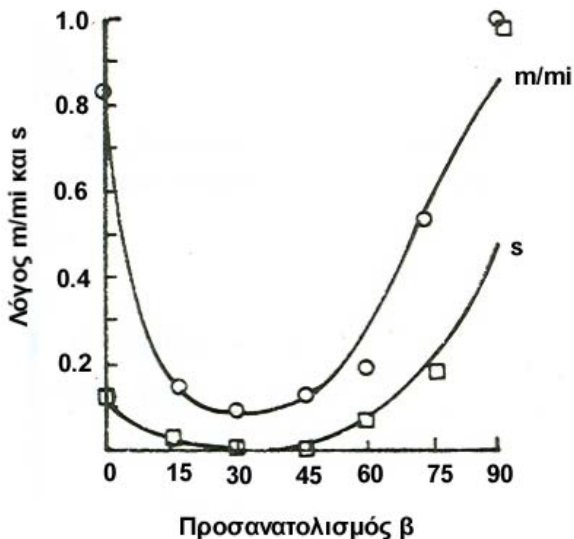
όπου ξ_m : η γωνία β όπου το m είναι ελάχιστο, ξ_s : η γωνία β όπου το s είναι ελάχιστο, A

σταθερά που είναι ίση με $A = m_i - \frac{m_{\min}}{m_i}$,

P σταθερά ίση με $P = (1 - s_{\min})$ και $A2$, $A3$, $P2$ και $P3$ σταθερές. Τα διαγράμματα μεταβολής του λόγου m/m_i και s συναρτήσει του προσανατολισμού β για τον αργιλικό σχιστόλιθο Martinsburg δίνονται στο Σχήμα 2 (από Hoek & Brown, 1980).

2.3 Αναφορές σε ανισότροπο πέτρωμα

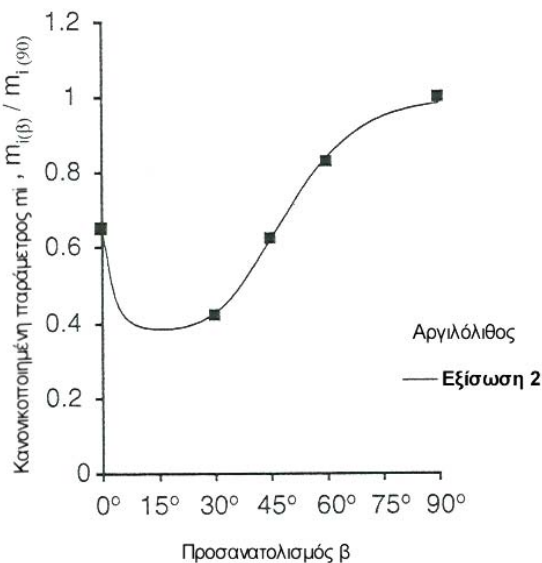
Οι Colak & Unlu (2004) εφάρμοσαν την εξίσωση (2) σε δεδομένα τριαξονικών δοκιμών σε ψαμμίτη (χαμηλού βαθμού ανισοτροπίας), ιλυόλιθο (μέσου βαθμού) και αργιλόλιθο (μέσου βαθμού) και υπολόγισαν το $m_{i(\beta)}$ για προσανατολισμούς $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° διατηρώντας την παράμετρο s του κριτηρίου Hoek & Brown αμετάβλητη ίση με τη μονάδα. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3, η παράμετρος $m_{i(\beta)}$ στην γωνία της ελάχιστης αντοχής ($\beta = 30^\circ$) είναι 0.4 του m_i για τον αργιλόλιθο (για τον ψαμμίτη είναι 0.6 του m_i και για τον ιλυόλιθο 0.3 του m_i).



Σχήμα 2. Μεταβολή του λόγου m/m_i και s με το β για τον σχιστόλιθο Martinsburg (από Hoek & Brown, 1980).

Figure 2. Variation of m/m_i and s in relation to orientation β for Martinsburg slate.

Από την έρευνα των Colak & Unlu προκύπτει ότι ο λόγος $m_{i(90)}/m_{i(\beta)}$ συμφωνεί καλά με τον δείκτη ανισοτροπίας της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (για τον αργιλόλιθο $m_{i(90)}/m_{i(\beta)}=2.5$ και $l\sigma_c=3.0$). Επίσης, παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της παραμέτρου m_i στον ιλυόλιθο και αργιλόλιθο που έχουν μέσο βαθμό ανισοτροπίας και μικρότερη στον ψαμμίτη που έχει χαμηλό βαθμό ανισοτροπίας.



Σχήμα 3. Μεταβολή του λόγου $m_{i(\beta)}/m_{i(90)}$ για αργιλόλιθο (από Colak & Unlu, 2004).

Figure 3. Variation of $m_{i(\beta)}/m_{i(90)}$ for claystone samples.

2.4 Παρατηρήσεις

Η παραπάνω μέθοδος εκτίμησης της αντοχής του ανισότροπου άρρηκτου πετρώματος υπολογίζοντας έμμεσα την μεταβολή της παραμέτρου m και s , είναι σχετικά πολύπλοκη και απαιτεί μεγάλο αριθμό τριαξονικών δοκιμών. Ακόμα, η διαδικασία υπολογισμού της διακύμανσης των παραμέτρων m, s , χωρίς να λαμβάνεται υπόψη και η διακύμανση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci}), λόγω της ανισοτροπίας της αντοχής, δεν είναι ορθή.

Για το λόγο αυτό στην παρούσα έρευνα, ελήφθη υπόψη η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη κατά την εφαρμογή του κριτηρίου, όπως εξηγείται στην επόμενη παράγραφο.

Διαπιστώθηκε επίσης ότι η μείωση της παραμέτρου m του άρρηκτου πετρώματος, όταν η φόρτιση γίνεται υπό την γωνία ελάχιστης αντοχής, συνδέεται με τον βαθμό ανισοτροπίας της αντοχής αυτού (Rc).

Επίσης, επειδή η παράμετρος m_i είναι χαρακτηριστική για κάθε πέτρωμα, θα πρέπει να παραμένει σταθερή και να αντιστοιχεί για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας.

3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

3.1 Ενσωμάτωση της ανισοτροπίας στο κριτήριο θραύσης

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν, είναι σαφές ότι είναι προτιμότερο να προσδιορίζεται η διακύμανση της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (και επομένως και της βραχώμαζας), λόγω της ύπαρξης της «ενδογενούς» ανισοτροπίας, απευθείας από το κριτήριο θραύσης και όχι έμμεσα από την μεταβολή των παραμέτρων m και s . Για το λόγο αυτό, εισάγεται στο κριτήριο μια νέα παράμετρος, k , που αντιπροσωπεύει την ανισοτροπία και σχετίζεται με τον βαθμό ανισοτροπίας (Rc) του άρρηκτου πετρώματος

$$Rc = \frac{\sigma_{1(\perp)}}{\sigma_{1\min}} \quad (\text{για } \sigma_3=0 \text{ έως } \sigma_{ci}/2)$$

Οι προτεινόμενες μετατροπές του κριτηρίου Hoek - Brown βασίζονται στην ενσωμάτωση:

1. της μεταβολής της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος ($\sigma_{c\beta}$)

2. της παραμέτρου (k) που ορίζει το εύρος μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης αντοχής του ανισότροπου άρρηκτου πετρώματος

Η παράμετρος s διατηρείται ίση με την μονάδα δεδομένου ότι το πέτρωμα είναι άρρηκτο. Η παραμέτρος s επιδρά στην αντοχή σε εφελκυσμό του άρρηκτου πετρώματος και κυρίως σε χαμηλό πεδίο πλευρικών τάσεων (σ_3).

Έτσι, προτείνεται η ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta} \cdot \sqrt{k \cdot m_i \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} \right) + s} \quad (4)$$

όπου $\sigma_{c\beta}$ η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε γωνία β και k η παράμετρος της ανισοτροπίας.

Όταν η φόρτιση γίνεται κάθετα στα επίπεδα ανισοτροπίας του άρρηκτου πετρώματος η παράμετρος $k=1$ και το $\sigma_{c\beta}$ ισούται με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} .

Η παράμετρος k λαμβάνει ελάχιστη τιμή, $k=k_{min}$, όταν η φόρτιση γίνεται υπό γωνία φόρτισης της ελάχιστης αντοχής ($\beta=30^\circ$).

3.2 Ανισοτροπία αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, που εισάγεται στο κριτήριο θραύσης που δίνεται στην εμπειρική σχέση (4), περιγράφεται ικανοποιητικά από την εξίσωση:

$$\sigma_{c\beta} = A - D[\cos 2(\beta_m - \beta)], \quad (5)$$

όπως είχε αρχικά προταθεί από τον Jaeger (1960) και αργότερα τροποποιηθεί από τον Donath (1961), όπου β_m είναι η γωνία της ελάχιστης αντοχής σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (συνήθως ίση με 30°), A και D σταθερές. Οι τιμές των σταθερών A και D προσδιορίζονται εφόσον είναι γνωστή η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε γωνία $\beta=0^\circ$, $\beta=30^\circ$ και $\beta=90^\circ$.

Η πλήρης καμπύλη μεταβολής της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη μπορεί να προβλεφθεί με βάση τις δοκιμές που εκτελούνται σε τρεις προσανατολισμούς του επιπέδου φολίδωσης, στις 0° , 30° και 90° . Η σταθερά D σχετίζεται με τον βαθμό ανισοτροπίας του άρρηκτου πετρώματος, και μειώνεται με τη μείωση του βαθμού αυτού.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΟ ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ

4.1 Γενικά

Η εξίσωση (4) εφαρμόστηκε στα δεδομένα τριαξονικής θλίψης του σχιστολίθου Penhryn (Attewell & Sandford, 1974) και στα δεδομένα της παρούσας έρευνας σε δείγματα γνευσίου και μαρμάρου.

Δοκιμές εκτελέστηκαν ακόμα σε δείγματα Αθηναϊκού Σχιστολίθου (Saroglou et al., 2004), που όμως δεν αναλύονται εδώ. Οι δοκιμές μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης εκτελέστηκαν σε δοκίμια με προσανατολισμό 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° και 90° που ελήφθησαν με προσανατολισμένη διάτρηση σε βραχώδη τεμάχια. Τα δοκίμια είχαν διάμετρο 54 mm (NX) και λόγο ύψους προς διάμετρο 2.0 έως 2.5 προς 1. Το εύρος της πλευρικής τάσης στο οποίο εκτελέστηκαν οι τριαξονικές δοκιμές ήταν: $0 < \sigma_3 < \sigma_{ci}$.

4.2. Μεθοδολογία εφαρμογής

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της μεταβολής της παραμέτρου k είναι η ακόλουθη:

1. Αρχικά προσαρμόζεται η εξίσωση (4) στα δεδομένα από δοκιμές κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας, από όπου προσδιορίζεται η τιμή της παραμέτρου m_i για δείκτη $k=1$.
2. Έπειτα, γίνεται προσαρμογή της εξίσωσης στα δεδομένα δοκιμών σε διάφορους προσανατολισμούς (β) και προσδιορισμός της παραμέτρου k , διατηρώντας σταθερή την παράμετρο m_i .
3. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για κάθε προσανατολισμό (β), ($\sigma_{c\beta}$), όταν δεν είναι γνωστή από δοκιμές, μπορεί να προσδιοριστεί έμμεσα από την Εξίσωση (5). Στην παρούσα έρευνα δεν απαιτήθηκε ο έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής $\sigma_{c\beta}$, δεδομένου ότι υπήρχαν στοιχεία από τις δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη για διαφορετικούς προσανατολισμούς (β).
4. Το εύρος της πλευρικής τάσης στο οποίο γίνεται η προσαρμογή της προτεινόμενης εξίσωσης επηρεάζει σημαντικά τις παραμέτρους m_i και k . Παρά το γεγονός ότι εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές σε πλευρική τάση μεγαλύτερη από το ήμισυ της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, για την εφαρμογή της εξίσωσης (4) χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για

πλευρική τάση μεταξύ $0 < \sigma_3 < 0.5 \sigma_{ci}$ για να είναι εφικτή η σύγκριση με την μεθοδολογία των Hoek & Brown (1980). Η παράμετρος s ελήφθη ίση με τη μονάδα.

- Επίσης, τυχόν αποτελέσματα έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη γιατί διαφοροποιούνται σημαντικά οι παράμετροι του κριτηρίου.

4.3 Σχιστόλιθος Penhryn

Οι περιβάλλουσες θραύσης του σχιστολίθου Penhryn, όπως προκύπτουν από την βέλτιστη προσαρμογή στα δεδομένα τριαξονικών δοκιμών για διάφορους προσανατολισμούς (β), δίνονται στο Σχήμα 4. Η διακύμανση της παραμέτρου k , δίνεται στον Πίνακα 1. Η ελάχιστη τιμή της παραμέτρου k ($k=0.25$) παρουσιάζεται όταν η φόρτιση γίνεται υπό γωνία $\beta=30^\circ$ ως προς τα επίπεδα φολίδωσης και η μέγιστη ($k=1$) όταν η φόρτιση γίνεται κάθετα σε αυτά. Ο λόγος k_{90}/k_{30} είναι ίσος με 4

και συμφωνεί με τον μέσο βαθμό ανισοτροπίας της αντοχής (R_c) του σχιστολίθου για το εύρος της πλευρικής πίεσης που εξετάστηκε ($0 < \sigma_3 < 68.9$ MPa), ο οποίος είναι ίσος με $R_c=3.3$.

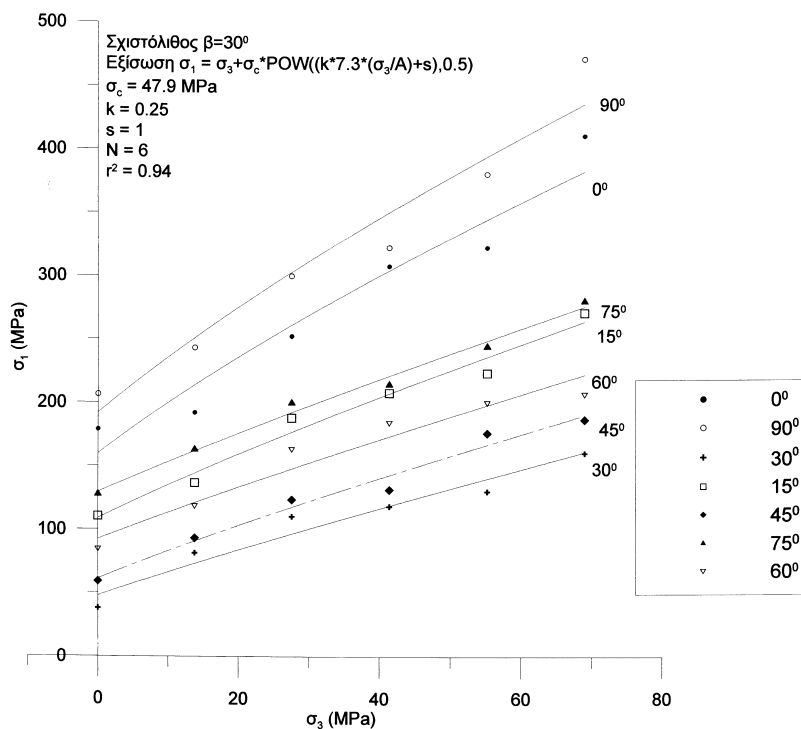
4.4 Γνεύσιος

Ο γνεύσιος, προέρχεται από την περιοχή της Βέροιας, όπου κατασκευάστηκαν οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού και χαρακτηρίζεται ως μοσχοβιτικός γνεύσιος με λεπτο-κρυσταλλική υφή (λόγω της επιμήκυνσης των κρυστάλλων μαρμαρυγία). Αποτελείται από πολύ λεπτές ζώνες μαρμαρυγιών και χαλαζιαστριούχων ορυκτών, το πάχος των οποίων κυμαίνεται από 0.2 έως 0.5 mm προσδίδοντας στο πέτρωμα πολύ καλά ανεπτυγμένη ζώνωση. Η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του γνευσίου δίνεται στο Σχήμα 5, όπου παρατηρείται ότι η ελάχιστη αντοχή εμφανίζεται, όπως είναι αναμενόμενο, όταν η φόρτιση γίνεται υπό γωνία $\beta=30^\circ$.

Πίνακας 1. Διακύμανση παραμέτρου k για τον σχιστόλιθο Penhryn

Table 1. Variation of k for Penhryn slate

β ($^\circ$)	0	15	30	45	60	75	90
k	0.89	0.47	0.25	0.35	0.31	0.39	1
σ_{ci} (MPa) από εξ. (4)	159.7	108.8	47.9	61.3	92.4	129.4	191.9
r^2	0.94	0.97	0.94	0.97	0.94	0.99	0.94



Σχήμα 4. Περιβάλλουσες θραύσης του σχιστολίθου Penhryn
Figure 4. Failure envelopes of Penhryn slate.

Ο βαθμός ανισοτροπίας της αντοχής είναι ίσος με $R_c=2.1$. Η προσαρμογή της Εξίσωσης (4) στα δεδομένα τριαξονικής θλίψης του γνευσίου δίνεται στο Σχήμα 6.

Η παράμετρος m_i είναι ίση με 24.6 και συμφωνεί με αυτή που προτείνεται από τους Hoek & Marinos (2000).

Η μεταβολή της παραμέτρου k με τον προσανατολισμό (β), δίνεται στον Πίνακα 2.

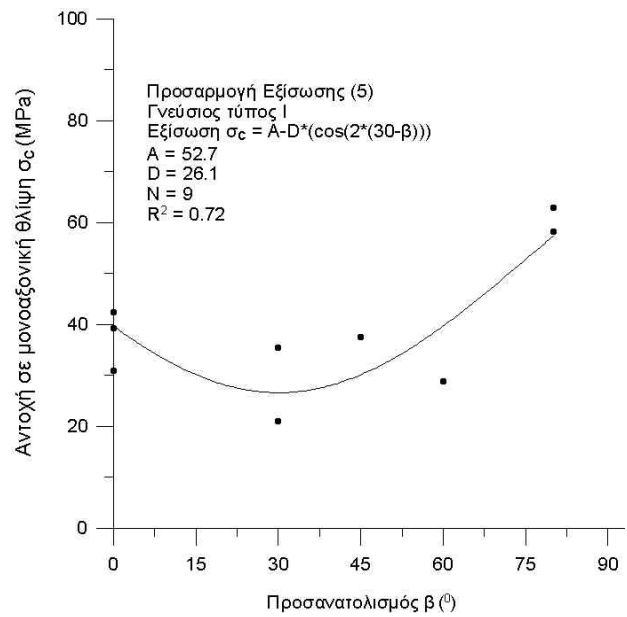
Πίνακας 2. Διακύμανση παραμέτρου k για τον γνεύσιο

β ($^\circ$)	0	30	45	90
k	1.79	0.42	0.38	1
σ_{ci} (MPa)	39.4	35.5	46.7	66.5
r^2	0.98	0.79	0.97	0.97

4.5 Μάρμαρο Πεντέλης

Το μάρμαρο, στο οποίο εκτελέστηκαν οι τριαξονικές δοκιμές προέρχεται από το Πεντελικό όρος, είναι ασβεστιτικό με χαμηλή περιεκτικότητα σε δολομίτη (3%) και έχει μικρο-κρυσταλλική υφή. Είναι ελαφρά ανισοκοκκώδες και έχει ταινιωτή υφή λόγω της ύπαρξης παράλληλων ασυνεχών ταινιών δολομίτη.

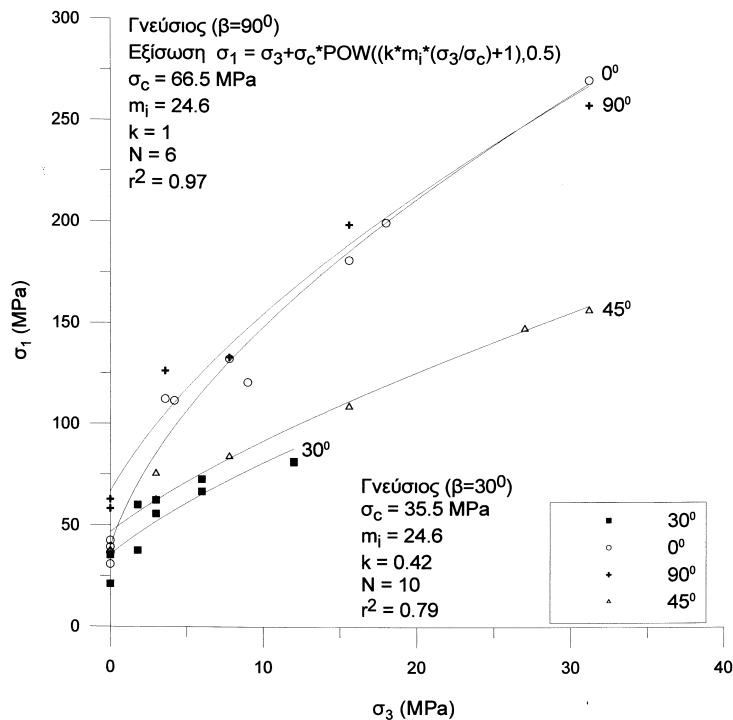
Γενικά έχει προτιμητέο προσανατολισμό ορυκτών και χαρακτηρίζεται ως χαμηλής ανισοτροπίας.



Σχήμα 5. Ανισοτροπία της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του γνευσίου.

Figure 5. Strength anisotropy of gneiss in uniaxial compression.

Η διακύμανση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη είναι μικρή, ενώ η ελάχιστη τιμή σημειώνεται όταν η φόρτιση γίνεται μεταξύ $\beta=20^\circ$ και 30° σε σχέση με τα επίπεδα της ταινίωσης. Η αντοχή σε θλίψη κάθετα στα επίπεδα είναι περίπου ίση με αυτή όταν η φόρτιση γίνεται παράλληλα σε αυτά.

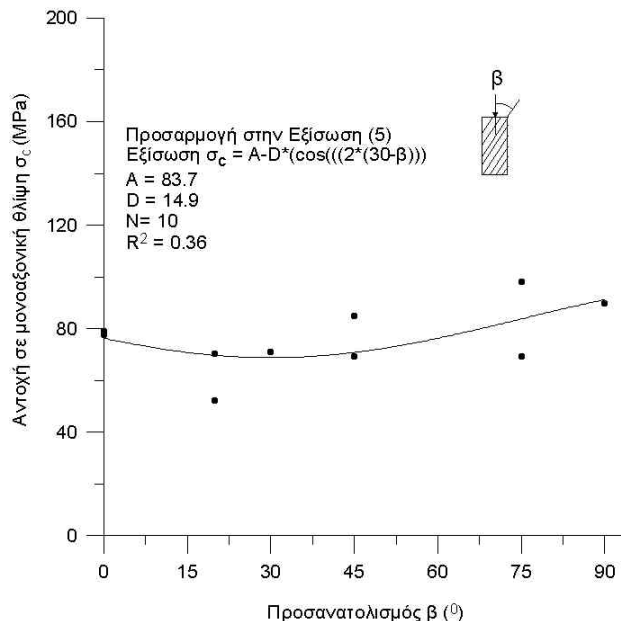


Σχήμα 6. Περιβάλλουσες θραύσης για διάφορους προσανατολισμούς (β) για τον γνεύσιο.

Figure 6. Failure envelopes of gneiss at different loading angles.

Ο βαθμός ανισοτροπίας της αντοχής είναι χαμηλός και βρέθηκε ίσος με $R_c=1.14$.

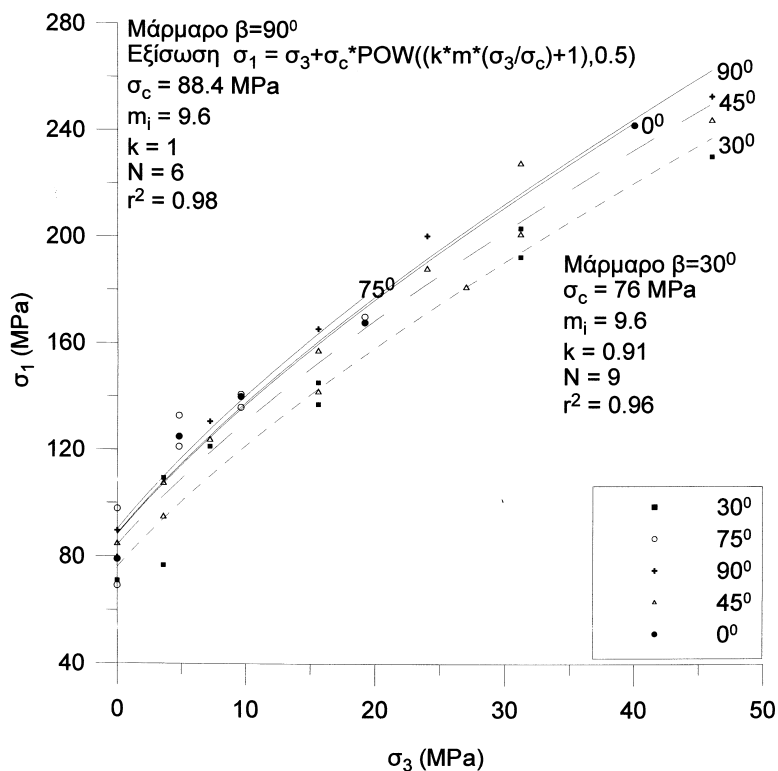
Η μεταβολή της αντοχής σ_c του μαρμάρου δίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Ανισοτροπία της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του μαρμάρου.

Figure 7. Strength anisotropy of marble in uniaxial compression.

Η προσαρμογή της Εξίσωσης (4) στα δεδομένα τριαξονικής θλίψης του μαρμάρου



Σχήμα 8. Περιβάλλουσες θραύσης για διάφορους προσανατολισμούς (β) για το μάρμαρο.
Figure 8. Failure envelopes of marble at different loading angles.

παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Η παράμετρος m_i είναι ίση με 9.6 και συμφωνεί με αυτή που προτείνεται από τους Hoek & Marinos (2000).

Το εύρος της παραμέτρου k με τον προσανατολισμό (β) είναι μικρό λόγω της μικρής ανισοτροπίας αντοχής του μαρμάρου (όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3).

Πίνακας 3. Διακύμανση παραμέτρου k για το μάρμαρο

Table 3. Variation of k for marble

β ($^\circ$)	0	30	45	75	90
k	0.99	0.91	0.93	1	1
σ_{ci} (MPa)	88.1	76.1	84.3	90.1	88.4
r^2	0.98	0.96	0.96	0.86	0.98

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δυνατότητα εφαρμογής του κριτηρίου θραύσης Hoek – Brown και στα ανισότροπα πετρώματα επιτυγχάνεται με την εισαγωγή της παραμέτρου (k), η οποία προσδιορίζεται με βάση τα δεδομένα τριαξονικών δοκιμών, που προκύπτουν από τη φόρτιση των δοκιμών υπό διαφορετικούς προσανατολισμούς ως προς το επίπεδο ανισοτροπίας τους.

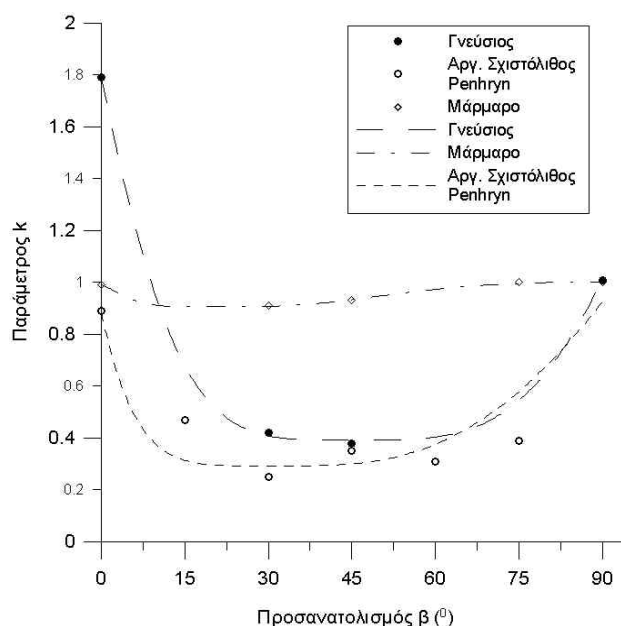
Η εκτίμηση της μείωσης της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος λόγω της ανισοτροπίας γίνεται από τον λόγο k_{90}/k_{30} (της παραμέτρου k

για φόρτιση κάθετα στα επίπεδα ανισοτροπίας και υπό γωνία $\beta=30^\circ$, που παρουσιάζεται η ελάχιστη αντοχή) και σχετίζεται άμεσα με τον μέσο δείκτη ανισοτροπίας, R_c (Πίνακας 4).

Η μεταβολή του k με τον προσανατολισμό για τα πετρώματα που εξετάστηκαν δίνεται στο Σχήμα 9 και περιγράφεται από την Εξίσωση 6.

$$k = b - Ae^{-\left(\frac{\beta - \xi_m}{A2 + A3\beta}\right)^C} \quad (6)$$

όπου, b και C είναι σταθερές για κάθε πέτρωμα και οι ξ_m , A , $A2$ και $A3$ όπως αναφέρονται στην Εξίσωση (2).



Σχήμα 9. Μεταβολή της παραμέτρου k στον γνεύσιο, μάρμαρο, σχιστόλιθο Penrhyn.

Figure 9. Variation of parameter k .

Με βάση τα δεδομένα, το εύρος τιμών της παραμέτρου k είναι μεγαλύτερο για πετρώματα με υψηλό βαθμό ανισοτροπίας (όπως ο γνεύσιος), ενώ μειώνεται σημαντικά για πετρώματα με μικρό βαθμό ανισοτροπίας, όπως το μάρμαρο της Πεντέλης ($0.91 < k < 1$).

Πίνακας 4. Συσχέτιση του λόγου k_{90}/k_{30} με τον βαθμό ανισοτροπίας R_c .

Table 4. Correlation of k_{90}/k_{30} with R_c .

Πέτρωμα	Λόγος k_{90}/k_{30}	Βαθμός ανισοτροπίας R_c
Σχιστόλιθος Penrhyn	4.0	3.3
Γνεύσιος	2.3	2.11
Μάρμαρο	1.09	1.14

Τέλος, με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, είναι εφικτή η εφαρμογή του κριτηρίου

θραύσεως Hoek-Brown για ανισότροπα πετρώματα, με προσδιορισμό του βαθμού ανισοτροπίας R_c (οπότε και του λόγου k_{90}/k_{30}), διαθέτοντας τα δεδομένα δοκιμών σε δύο διευθύνσεις, κάθετα στα επίπεδα ανισοτροπίας και υπό τη γωνία ελάχιστης αντοχής.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το Εργαστήριο Βραχομηχανικής του Κ.Ε.Δ.Ε/Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε. και τον Δ. Γεροχριστοδούλου για την συμβολή του στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών. Η έρευνα χρηματοδοτείται από το ΕΠΕΑΕΚ που συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Attewell P. and Sandford M. (1974), "Intrinsic Shear Strength of a Brittle, Anisotropic Rock – I. Experimental and Mechanical Interpretation". Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 11, pp. 423-430.
- Colak K. and Unlu T. (2004), "Effect of transverse anisotropy on the Hoek-Brown strength parameter " m_i " for intact rocks". Int. J. Rock Mech. & Mining Sciences. Vol. 41 (3), pp. 1045-1052.
- Donath F.A. (1961). "Experimental study of shear failure in anisotropic rock". Geol. Soc. Amer. Bull. Vol. 72, pp. 985-990.
- Hoek E. and Brown E.T. (1980), "Underground Excavations in Rock", Instn Min. Metall., London, U.K., p. 527.
- Hoek, E. and Brown E.T. (1997), "Practical estimates of rock mass strength". Int. J. Rock Mech. & Mining Sciences. Vol. 34 (8), pp. 1165-1186.
- Jaeger J.C. (1960), "Shear failure of anisotropic rock". Geol. Mag. Vol. 97, pp. 65-72.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1976), "Fundamentals of Rock Mechanics". Chapman & Hall, London, U.K., p. 585.
- Marinos P. and Hoek E. (2000), "GSI: A Geologically friendly tool for rock mass strength estimation". Geoeng2000, Australia, Vol.1, pp. 1422-1440.
- Saroglou, H., Marinos, P., Tsiambaos, G. (2004), "Applicability of the Hoek – Brown failure criterion and the effect of anisotropy on intact rock samples from Athens Schist". J. of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol.104, No. 4, pp.209-215.