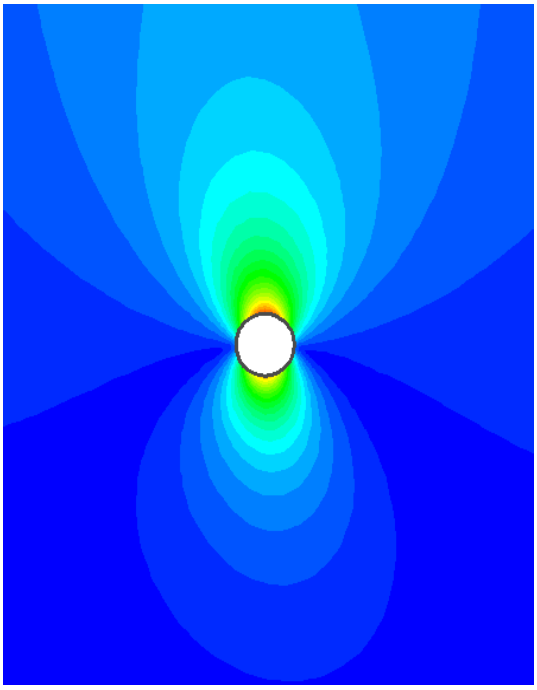
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Συμπεριφορά Ανισότροπης Βραχόμαζας σε Σήραγγες με Έμφαση σε Κριτήρια Αστοχίας

ΠΑΠΑΔΑΝΤΩΝΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπων Καθηγητής:

ΜΙΧΑΗΛ ΚΑΒΒΑΔΑΣ

Συνεπιβλέπων:

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΣΑΡΟΓΛΟΥ, Ε.ΔΙ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τίτλος Εργασίας: Συμπεριφορά Ανισότροπης Βραχόμαζας σε Σήραγγες με Έμφαση σε Κριτήρια Αστοχίας.

Φοιτητής: Εμμανουήλ Παπαδαντωνάκης

Επιβλέπων: Μιχαήλ Καββαδάς, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Χαράλαμπος Σαρόγλου, Ε.ΔΙ.Π.

Ακαδημαϊκό Έτος: 2015-2016

Στη παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η συμπεριφορά ανισότροπης βραχόμαζας κατά τη διαδικασία διάνοιξης σήραγγας, ενώ δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση τόσο του αρχικού όσο και του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown.

Στην εισαγωγή παρουσιάζεται το αντικείμενο, ο στόχος και η δομή της διπλωματικής ενώ γίνεται αναφορά στους γεωλογικούς σχηματισμούς που παρουσιάζουν ανισότροπη συμπεριφορά καθώς επίσης και στον τρόπο δημιουργίας της «εγγενούς» ανισοτροπίας.

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η ανισοτροπία αντοχής του άρρηκτου πετρώματος η οποία οφείλεται στην ύπαρξη επιπέδων σχιστότητας ή στρώσης. Ο βαθμός ανισοτροπίας του πετρώματος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c και τον δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια συσχέτισης των δύο δεικτών με βάση δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Διερευνήθηκε η χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown το οποίο προτάθηκε από τους Saroglou & Tsiambaos (2008), δίνοντας έμφαση στη μεταβολή των παραμέτρων του κριτηρίου για διαφορετικό βαθμό ανισοτροπίας αντοχής. Με βάση δεδομένα τριαξονικών δοκιμών από τη βιβλιογραφία έγινε προσπάθεια συσχέτισης του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με την παράμετρο K_β του κριτήριου. Παρατηρήθηκε ότι οι δύο αυτές παράμετροι συσχετίζονται ικανοποιητικά, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί από άλλους ερευνητές (Ismael et al., 2014).

Για να διερευνηθεί η ανισότροπη συμπεριφορά βραχόμαζας, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ταξινόμησης GSI που αναφέρεται σε μεταμορφωμένα πετρώματα και λαμβάνει υπόψη το βαθμό ανισοτροπίας βραχόμαζας. Προτάθηκε ο διαχωρισμός της «εγγενούς» ανισοτροπίας της βραχόμαζας σε:

- Ανισοτροπία αντοχής άρρηκτου πετρώματος
- Ανισοτροπία δομής βραχόμαζας

Χρησιμοποιώντας αυτήν τη θεώρηση, προτάθηκε ταξινόμηση της ανισοτροπίας βραχόμαζας. Ακόμα χρησιμοποιήθηκε τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown για εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα (Σαρόγλου, 2013).

Προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότερη χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας για εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα και η προτεινόμενη ταξινόμηση της βραχόμαζας, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία σε ανυποστήρικτη κυκλική σήραγγα. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε ισότροπο και εγκάρσια ισότροπο μέσο χρησιμοποιώντας τόσο το αρχικό όσο και το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας, συγκρίνοντας για κάθε περίπτωση τις

αναπτυσσόμενες συγκλίσεις στα τοιχώματα της σήραγγας. Για την περίπτωση της εγκάρσια ισότροπης βραχόμαζας οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής (R_c) και παραμορφωσιμότητας (R_E) έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του βαθμού ανισοτροπίας στις συγκλίσεις της σήραγγας.

ABSTRACT

Under-Graduate Thesis:	Behavior of anisotropic rockmass in tunneling with emphasis on failure criteria.
Student:	Emmanouil Papadantonakis
Supervisor:	Michael Kavvadas, Associate Professor, N.T.U.A.
Co-supervisor:	Haralambos Saroglou, E.DI.P.
Academic Year:	2015-2016

In the present thesis the behavior of anisotropic rock mass in a tunneling problem has been studied. Specific emphasis was given in the application of the original and modified Hoek & Brown failure criterion for the prediction of anisotropic behaviour.

The general concepts of the thesis are presented, i.e. its topic, aim and structure. Moreover reference has been made to the geological formations, which exhibit anisotropic behavior, and to the genesis of “inherent” anisotropy.

A review of anisotropic strength was performed, distinguishing the two main types of “inherent” anisotropy: bedding and schistosity. Anisotropic strength can be determined using the degree of strength anisotropy (R_c) and the degree of anisotropy of deformation modulus (R_E). In the current thesis both indexes have been studied and correlated.

Additionally, the modified Hoek & Brown failure criterion proposed by Saroglou & Tsiambaos (2008) has been studied emphasizing on the variation of the parameters for different degrees of strength anisotropy. R_c has been correlated with criterion parameter k_β based on a significant number of triaxial test data. It is evident that these two parameters are well correlated, as it has already been proposed in literature (Ismael et al., 2014).

In order to study the anisotropic behavior of rockmasses, a proposed chart of Geological Strength Index (GSI) for metamorphic rocks was used, which distinguishes different degrees of anisotropy. It was suggested that the “inherent” anisotropy of rock masses is distinguished in:

- strength anisotropy of intact rock and
- rock mass structure anisotropy.

Using this approach, a classification of anisotropic rockmasses and a correlation between these two parameters was suggested. Furthurmore, a modified Hoek & Brown criterion applied to transversely isotropic rock mass is presented (Saroglou, 2013).

Finally, in order to demonstrate the use of the rockmass classification and the modified failure criterion for of transversely anisotropic rockmasses, selected analyses of an unsupported circular tunnel were performed. The analyses were performed for an isotropic and transversely isotropic rockmass using both the original and modified Hoek & Brown failure criterion and the tunnel convergences were compared. Specifically, in the case of a transversely isotropic rockmass, the analyses were performed for different degrees of anisotropy utilizing the degree of strength anisotropy (R_c) and the degree of anisotropy of deformation modulus (R_E).

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων i

Πίνακας Εικόνων iv

Πίνακας Πινάκων v

Πίνακας Γραφημάτων vi

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 1

1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 2

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 3

1.4 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ 5

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ 5

2.1.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ 5

2.1.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ-ΙΣΤΟΣ 7

2.1.3 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ 8

2.2 Η ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΣΤΟ ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ 12

2.2.1 ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΧΙΣΤΟΤΗΤΑ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ 12

2.2.2 Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ R_c 13

2.3 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK-BROWN 15

2.3.1 ΤΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK-BROWN 15

2.3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK & BROWN ΓΙΑ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΟ ΠΕΤΡΩΜΑ (1980) 20

2.3.3 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK & BROWN ΓΙΑ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΟ ΠΕΤΡΩΜΑ 21

2.4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ 22

2.4.1 Η ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ $\sigma_{c\beta}$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ β 24

2.4.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΊΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ R_c ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $K\beta_{min}$ 25

2.4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ K_β ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ β 27

2.4.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΑΝΤΟΧΗ R_c ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_3 28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ 30

3.1 ΓΕΝΙΚΑ 30

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ 33

3.2.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ RQD 33

3.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ Q 34
3.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ RMR 35
3.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ GSI 36
3.3 Η ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΣΤΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ 39
3.4 ΜΕΤΡΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ 47
3.5 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ 49
3.6 ΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK & BROWN ΓΙΑ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ 53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 57
4.1 ΓΕΝΙΚΑ – ΣΚΟΠΟΣ 57
4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΑΡΧΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ 58
4.2.1 ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΕΣΟ 59
4.2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ 60
4.3 ΣΕΙΡΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 62
4.3.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ 63
4.3.1.1 Ελαστική συμπεριφορά υλικού 63
4.3.1.2 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού 64
4.3.1.3 Αναλύσεις 65
4.3.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΕΣΟ 65
4.3.2.1 Αναλύσεις Σειράς A 66
4.3.2.2 Αναλύσεις Σειράς B 72
4.3.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΕΣΟ 74
4.3.3.1 Αναλύσεις Σειράς C 74
4.3.3.2 Αναλύσεις Σειράς D 79
4.3.3.3 Αναλύσεις Σειράς E 80
4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 83
4.4.1 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ A – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ B 83
4.4.2 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ D 85
4.4.3 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ E 87
4.4.4 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ B – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C 89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α’ 97

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΄Β 115

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Κύκλος πετρωμάτων 6
Εικόνα 2 Διεργασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων 7
Εικόνα 3 Μεγέθυνση (x25) του γνευσίου όπου είναι εμφανή τα ορυκτά από τα οποία αποτελείται. 10
Εικόνα 4 Στρωματώδης Γνεύσιος 10
Εικόνα 5 Παράδειγμα διαφορετικής διαμέτρου ανοιγμάτων στην ίδια βραχόμαζα (Amadei, 1996) 11
Εικόνα 6 Η γωνία β 14
Εικόνα 7 Βραχόμαζα με εμφανείς ασυνέχειες 30
Εικόνα 8 Απεικονίζεται η μετάβαση από το άρρηκτο στο κατακερματισμένο πέτρωμα καθώς αυξάνουν οι διαστάσεις του δείγματος 32
Εικόνα 9 Σύγκριση της εξωτερικής δομής γνεύσιου, όπου το αριστερό τμήμα του πρανούς προέκυψε μετά από ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών ενώ το δεξιά έπειτα από μη ελεγχόμενη έκρηξη 39
Εικόνα 10 Θεώρηση ανισοτροπίας αντοχής και δομής σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα 40
Εικόνα 11 Αντιστοίχηση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με δομές της βραχόμαζας-Προσέγγιση Α 41
Εικόνα 12 Ορισμός των ελαστικών σταθερών για εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα 50
Εικόνα 13 Πετρώματα στα οποία η "εγγενής" ανισοτροπία πηγάζει από τη (περίπτωση εγκάρσια ισότροπης βραχόμαζας) 54
Εικόνα 14 Γεωμετρία του προσομοιώματος και της σήραγγας 58
Εικόνα 15 Προσδιορισμός της γωνίας β (στο πρόγραμμα PHASE2) για εγκάρσια ισότροπο μέσο 60
Εικόνα 16 Χαρακτηριστικά σημεία της διατομής της σήραγγας 66
Εικόνα 17 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Συνολικές μετακινήσεις - GSI 30 68
Εικόνα 18 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Συνολικές μετακινήσεις - GSI50 68
Εικόνα 19 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Συνολικές μετακινήσεις - GSI70 68
Εικόνα 20 Ανάλυση Α για ελαστοπλαστικό μέσο – Πλαστική ζώνη - GSI30 69
Εικόνα 21 Ανάλυση Α για ελαστοπλαστικό μέσο - Πλαστική ζώνη - GSI50 69
Εικόνα 22 Ανάλυση Α για ελαστοπαστικό μέσο - Πλαστική ζώνη - GSI70 70
Εικόνα 23 Στροφή του τασικού πεδίου γύρω από σήραγγα κυκλικής διατομής 70
Εικόνα 24 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 - GSI50 71
Εικόνα 25 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Ελάχιστες κύριες τάσεις σ_3 - GSI50 71
Εικόνα 26 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=1 & R_c=2 76
Εικόνα 27 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=1,5 & R_c=3 76
Εικόνα 28 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2 & R_c=4 77
Εικόνα 29 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2,5 & R_c=5 77
Εικόνα 30 Ανάλυση C - Παραμορφωμένη διατομή σάραγγας - R_E=1 & R_c=2 78
Εικόνα 31 Ανάλυση C - Παραμορφωμένη διατομή σήραγγας - R_E=2,5 & R_c=5 78
Εικόνα 32 (αριστερά) Ανάλυση Ε - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=1,5 82
Εικόνα 33 (δεξιά) Ανάλυση Ε - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2 82
Εικόνα 34 Ανάλυση Ε - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2,5 83
Εικόνα 35 Ανάλυση Ε, β=90º - Παραμόρφωση διατομής σήραγγας - R_E=2,5 88

Εικόνα 36 Ανάλυση C, β=30º - Παραμόρφωση διατομής σήραγγας - R_E=2,5 88

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1 Ταξινόμηση πετρωμάτων με βάση τον δείκτη ανισοτροπίας (Ramamurthy, 1993) 13
Πίνακας 2 Επί τόπου εκτίμηση αντοχής πετρώματος (κατά ISRM, 1981) 17
Πίνακας 3 Τιμές της σταθεράς m_i για το ακέραιο πέτρωμα κατά λιθολογικό τύπο πετρώματος (Hoek & Marinos, 2000) 18
Πίνακας 4 Οδηγίες για την εκτίμηση του παράγοντα διατάραξης D (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002) 19
Πίνακας 5 Αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με βάση δεδομένα τριαξονικών δοκιμών 23
Πίνακας 6 Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση τον δείκτη RQD 33
Πίνακας 7 Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση τον δείκτη Q 35
Πίνακας 8 Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση τον δείκτη RMR 35
Πίνακας 9 Πίνακας GSI για ομοιογενή πετρώματα Hoek & Marinos (2000) 37
Πίνακας 10 Πίνακας GSI για μεταμορφωμένα σχιστώδη πετρώματα Hoek& Karzulovic (2000), κατά Truzman (1999) 38
Πίνακας 11 Αντιστοίχηση τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής με συγκεκριμένη δομή βραχόμαζας 41
Πίνακας 12 Αντιστοίχηση τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής με πιθανές δομές βραχόμαζας 44
Πίνακας 13 Προτεινόμενες τιμες της σταθεράς MR, Hoek & Diederichs (2006) - με βάση τις προτάσεις των Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001) 48
Πίνακας 14 Εκτίμηση του λόγου Poisson (Καββαδάς, 2012) 49
Πίνακας 15 Τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής και παραμορφωσιμότητας για διάφορα πετρώματα 52
Πίνακας 16 Μεταβολή των $m_{b,an}$ και S_{an} για διάφορες δομές βραχόμαζας και τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 55
Πίνακας 17 Βαθμός ανισοτροπίας δομής βραχόμαζας και ποιότητα των ασυνεχειών που επιλέχθηκαν για την σύγκριση των παραμέτρων $m_{b,an}$ και S_{an} 56
Πίνακας 18 Δεδομένα πετρώματος (Σχιστόλιθος, R.Gholami & V. Rasouli, 2013) 61
Πίνακας 19 Κωδικοποίηση και περιγραφή των σειρών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας 62
Πίνακας 20 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς A 66
Πίνακας 21 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς B 72
Πίνακας 22 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς C 74
Πίνακας 23 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις τις σειράς D 79
Πίνακας 24 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς E 80

Πίνακας Γραφημάτων

Γράφημα 1 Μεταβολή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ συναρτήσει της γωνίας β (σχιστόλιθος, Kumar 2006) 14
Γράφημα 2 Μεταβολή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ συναρτήσει της γωνίας β 24
Γράφημα 3 Δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c - λόγος (K_{90}/K_{min}) 25
Γράφημα 4 Δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c - παράμετρος $K_{\beta min}$ 26
Γράφημα 5 Μεταβολή της παραμέτρου K_β συναρτήσει της γωνίας β 27
Γράφημα 6 Μεταβολή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c συναρτήσει της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 28
Γράφημα 7 Μέγιστη κύρια τάση σ_1 - γωνία β, για διάφορες τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 (σχιστόλιθος Kumar, 2006) 29
Γράφημα 8 Η επίδραση της κλίμακας στην αντοχή της βραχόμαζας 32
Γράφημα 9 $m_{b,an}$ - GSI, για σταθερά m_i=12 και διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 42
Γράφημα 10 $m_{b,an}$ - GSI, για σταθερά m_i=20 και διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 42
Γράφημα 11 $m_{b,an}$ - GSI, για σταθερά m_i=28 και διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 43
Γράφημα 12 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=1 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i 44
Γράφημα 13 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=2 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i 45
Γράφημα 14 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=3 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i 45
Γράφημα 15 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=5 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i 46
Γράφημα 16 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=7 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i 46
Γράφημα 17 S_{an} - GSI, για διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 47
Γράφημα 18 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E σε σχέση με τη γωνία β (Behrestaghi et al. 1996) 51
Γράφημα 19 Δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c - Δείκτης ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E, για τα πετρώματα του πίνακα 15 53
Γράφημα 20 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τα ιδανικά ελαστικά υλικά α) γραμμικό ελαστικό, β)τελείως ελαστικό, γ)ελαστικό με υστέρηση 63
Γράφημα 21 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για ελαστοπλαστικό υλικό 64
Γράφημα 22 Ανάλυση A για ελαστκό μέσο - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του GSI 67
Γράφημα 23 Ανάλυση B για ελαστικό μέσο - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 73
Γράφημα 24 Ανάλυση B για ελαστοπλαστικό μέσο - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c 73
Γράφημα 25 Ανάλυση C - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας και αντοχής 75

Γράφημα 26 Ανάλυση D - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας..... 80
Γράφημα 27 Ανάλυση E - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας..... 81
Γράφημα 28 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές αναλύσεων A και B για ελαστική συμπεριφορά βραχόμαζας..... 84
Γράφημα 29 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές αναλύσεων A και B για ελαστοπλαστική συμπεριφορά βραχόμαζας 85
Γράφημα 30 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές αναλύσεων C και D..... 86
Γράφημα 31 Σύγκριση των συκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές C και E 87
Γράφημα 32 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές B και C 89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς βραχόμαζας με «εγγενή» ανισοτροπία, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση κριτηρίων αστοχίας. Για τον σκοπό αυτό γίνεται εφαρμογή σε ανάλυση διάνοιξης σήραγγας.

Η «εγγενής» ανισοτροπία, η οποία προκύπτει από τη διαδικασία γένεσης των πετρωμάτων, διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην αντοχή και παραμορφωσιμότητα των πετρωμάτων και κατ' επέκταση επηρεάζει την συμπεριφορά και την απόκριση της βραχόμαζας, όταν εντός αυτής πρόκειται να διανοιχθεί σήραγγα. Τα πετρώματα που παρουσιάζουν «εγγενώς» ανισότροπη δομή είναι τα ιζηματογενή, λόγω της στρωματώδους δομής, και τα μεταμορφωμένα που έχουν υποστεί έντονη σχιστοποίηση.

Το κριτήριο αστοχίας των Hoek και Brown (1980) είχε αρχικά προταθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός ισότροπου άρρηκτου πετρώματος και αργότερα επεκτάθηκε και στη βραχόμαζα. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εφαρμογή πρόσφατων τροποποιήσεων του αρχικού κριτηρίου των Hoek & Brown, οι οποίες αναπτύχθηκαν με σκοπό να εντάξουν την επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας στην εκτίμηση της αντοχής ενός ανισότροπου πετρώματος. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη διερεύνηση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας (Χ. Σαρόγλου, 2007). Έγινε προσπάθεια να ερμηνευθεί η σημασία και η ευαισθησία της παραμέτρου K_β σε σχέση με την τιμή του δείκτη ανισοτροπίας της αντοχής R_c. Το κριτήριο αυτό έχει ιδιαίτερη εφαρμογή σε άρρηκτο πέτρωμα που χαρακτηρίζεται από επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας. Ακόμη ελέγχθηκε η χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας για ανισότροπη βραχόμαζα (Σαρόγλου, 2013).

Στη συνέχεια εκτελέστηκε μια σειρά αναλύσεων με βάση τις οποίες επιχειρήθηκε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της «εγγενούς» ανισότροπης βραχόμαζας κατά την διάνοιξη σήραγγας. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό PHASE2 εστίαζαν σε ισότροπο και εγκάρσια ισότροπο μέσο καθώς και στην χρήση τόσο του αρχικού κριτηρίου Hoek & Brown (1980) όσο και του τροποποιημένου (2007). Μέσω των αναλύσεων αυτών, και ύστερα από σύγκριση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων στο τοίχωμα της σήραγγας για κάθε μια περίπτωση, καταλήξαμε σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την σπουδαιότητα της συμπεριφοράς του μέσου (ισότροπου ή εγκάρσια ισότροπου), την επιρροή της ανισοτροπίας στην συμπεριφορά της βραχόμαζας, καθώς και την διαφοροποίηση ή μη των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων από την χρήση των δύο διαφορετικών κριτηρίων.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Γενικότερος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η έρευνα της συμπεριφοράς πετρωμάτων με «εγγενή» ανισοτροπία, με εφαρμογή σε σήραγγες.

Αρχικά δόθηκε έμφαση στην ανάδειξη του τρόπου «γένεσης» της ανισότροπης δομής ενός πετρώματος, δηλαδή στους μηχανισμούς που οδηγούν ένα πέτρωμα στην ανισοτροπία. Στη συνέχεια πραγματοποιώντας μια εκτενή έρευνα στη βιβλιογραφία ανακτήθηκαν δεδομένα τριαξονικών δομικών σε μία προσπάθεια να ερμηνευθεί η σημασία της «εγγενούς» ανισοτροπίας στην αντοχή και παραμορφωσιμότητα της βραχόμαζας. Απώτερος σκοπός της έρευνας αυτής ήταν η ανάδειξη της σπουδαιότητας της παραμέτρου K_β του τροποποιημένο κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown, καθώς και η άμεση συσχέτιση αυτής με τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c. Δηλαδή, η παρακολούθηση της μεταβολής στην τιμή της παραμέτρου K_β ανάλογα με το πόσο έντονα ανισότροπο είναι ένα πέτρωμα.

Τέλος, μέσα από μία σειρά αναλύσεων με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ανάδειξη και την επιλογή του σωστού κριτηρίου αστοχίας για την ορθή ερμηνεία της συμπεριφοράς μίας «εγγενούς» ανισότροπης βραχόμαζας. Για τον λόγο αυτό στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε χρήση του αρχικού και του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown σε ισότροπο και εγκάρσια ισότροπο μέσο. Σκοπός των αναλύσεων ήταν η σύγκριση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων στο τοίχωμα της σήραγγας, η εξαγωγή συμπερασμάτων για κάθε μια περίπτωση ανάλυσης και ο έλεγχος της ταύτισης ή μη των αποτελεσμάτων.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το κεφάλαιο 1 είναι εισαγωγικό και έχει ως σκοπό να δώσει στον αναγνώστη την δυνατότητα να σχηματίσει μια εικόνα για το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο υποκεφάλαιο 1.1 παρουσιάζεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ενώ στο υποκεφάλαιο 1.2 ο στόχος αυτής. Τέλος το εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της δομής της διπλωματικής εργασίας (υποκεφάλαιο 1.3) και τις ευχαριστίες (υποκεφάλαιο 1.4).

Το κεφάλαιο 2 εστιάζει στην «εγγενή» ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος. Αρχικά στο υποκεφάλαιο 2.1 δίνονται κάποια γενικά στοιχεία για τους γεωλογικούς σχηματισμούς και την «εγγενή» ανισοτροπία των πετρωμάτων. Έπειτα γίνεται αναφορά στην σχιστότητα και στη στρωσιγένεια, δύο μηχανισμοί που οδηγούν σε ανισότροπη συμπεριφορά των πετρωμάτων κατά τη γένεσή τους, ενώ εισάγεται για πρώτη φορά η έννοια του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα κριτήρια αστοχίας Hoek & Brown που έχουν αναπτυχθεί έχοντας σαν βάση το αρχικό κριτήριο (1980). Στο τέλος του κεφαλαίου αντλήθηκαν δεδομένα τριαξονικών δοκιμών για διάφορα πετρώματα από τη βιβλιογραφία με σκοπό να ερμηνευθεί η σημασία της παραμέτρου K_β που εισάγεται στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας (Σαρόγλου, 2007), (Saroglou & Tsiambaos, 2008).

Συνεχίζοντας στο κεφάλαιο 3 ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιρροή της ανισοτροπίας στην βραχόμαζα, όπου και παρουσιάζονται τα βασικότερα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας (RQD, Q, RMR, GSI). Στη συνέχεια θεωρήθηκε πως η «εγγενής» ανισοτροπία των πετρωμάτων διακρίνεται σε ανισοτροπία αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και ανισοτροπία δομής της βραχόμαζας, ενώ γίνεται προσπάθεια συσχέτισης των δύο αυτών παραμέτρων. Έπειτα γίνεται αναφορά στο μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας, πως αυτό επηρεάζεται από την ανισοτροπία του πετρώματος ενώ μελετήθηκε η σχέση που συνδέει τους δείκτες ανισοτροπίας αντοχής (R_c) και παραμορφωσιμότητας (R_E). Τέλος παρατίθεται το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας το οποίο έχει εφαρμογή σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα (Σαρόγλου, 2013).

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι σειρές αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PHASE2. Στην αρχή του κεφαλαίου δίνονται πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία, τις αρχικές ρυθμίσεις του προβλήματος και τα δεδομένα του πετρώματος. Στον πίνακα 4.2 εμφανίζονται συνοπτικά οι σειρές αναλύσεων ενώ στη συνέχεια, και σε κάθε μία υποπαράγραφο του κεφαλαίου, δίνονται χρήσιμα αποτελέσματα, σε μορφή πινάκων και εικόνων, από κάθε μια ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Στο τέλος του κεφαλαίου ακολουθεί η σύγκριση μεταξύ των σειρών αναλύσεων και ο έλεγχος για πιθανή ταύτιση ή μη των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων.

Κλείνοντας την διπλωματική εργασία μέσω του κεφαλαίου 5, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των ποιοτικών συμπερασμάτων που προέκυψαν.

1.4 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Μιχάλη Καββαδά της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία και για τις συμβουλές που μου παρείχε.

Οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον Δρ. Χάρη Σαρόγλου, Επιστημονικό Συνεργάτη του Τομέα Γεωτεχνικής των Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συνεχή ενασχόληση καθώς και για τις υποδείξεις και τις ιδέες του πάνω στο θέμα της εργασίας. Θεωρώ πως λόγω της καθοδήγησης και της βοήθειας που μου παρείχε κατάφερα να πραγματοποιήσω την συγκεκριμένη εργασία. Ακόμη θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για το γεγονός ότι ήταν πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την εργασία αυτή στους γονείς μου, Ελευθέριο και Ελπίδα, για την υποστήριξη που μου παρέχουν σε όλα τα βήματα της ζωής μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

2.1.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

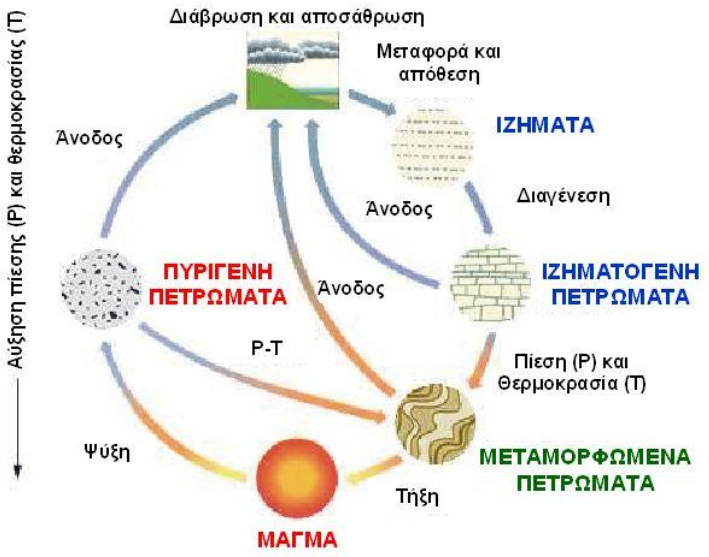
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν τον στερεό φλοιό της γης διακρίνονται από τεχνικογεωλογικής πλευράς σε εδαφικούς και βραχώδεις. Οι εδαφικοί σχηματισμοί είναι τα προϊόντα των διεργασιών της διάβρωσης των βραχωδών μαζών, αλλά και της μηχανικής ή/και χημικής αποσάθρωσης αυτών.

Βραχώδεις σχηματισμοί ή πετρώματα είναι τα υλικά τα οποία κατά μεγάλες μάζες αποτελούν τον στερεό φλοιό της γης. Αποτελούνται από τα ορυκτά και παρουσιάζουν στατιστική ομοιογένεια σε μεγάλη έκταση. Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους, τα πετρώματα διακρίνονται σε τρείς μεγάλες κατηγορίες:

Τα ιζηματογενή, που προέρχονται από την αποσάθρωση και καταστροφή των πετρωμάτων η οποία συμβαίνει στην επιφάνεια της γης. Τα υλικά της καταστροφής μεταφέρονται με το νερό ή με τον άνεμο και αποτίθενται σε χαμηλότερες περιοχές σχηματίζοντας έτσι τα ιζήματα. Τα αποτιθέμενα υλικά στην αρχή είναι χαλαρά, αλλά με την επίδραση των παραγόντων διαγένεσης και την πάροδο του χρόνου γίνονται συμπαγή ιζηματογενή πετρώματα (π.χ. η άμμος γίνεται ψαμμίτης)

Τα πυριγενή, που προέρχονται από την πήξη και στερεοποίηση του μάγματος, όταν αυτό διεισδύσει μέσα στο στερεό φλοιό της γης ή εκχυθεί στην επιφάνειά της. Δηλαδή το μάγμα μπορεί να στερεοποιηθεί είτε εντός του φλοιού χωρίς έξοδο στην επιφάνεια, οπότε σχηματίζονται τα πλουτώνια πετρώματα, είτε αφού βγει στην επιφάνεια οπότε σχηματίζονται οι ηφαιστειακοί σχηματισμοί (υλικά ηφαιστειακών εκρήξεων και πετρώματα από την στερεοποίηση της λάβας).

Τα μεταμορφωμένα, που προέρχονται από την μεταμόρφωση των δύο παραπάνω κατηγοριών ή και παλαιότερων μεταμορφωμένων, η οποία συμβαίνει με την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί τόσο ο ιστός, όσο και η ορυκτολογική σύσταση του αρχικού πετρώματος.



Εικόνα 1 Κύκλος πετρωμάτων

Στη συνέχεια δίνονται κάποιες επιπρόσθετες πληροφορίες για τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα.

Ιζηματογενή πετρώματα

Για τον σχηματισμό των ιζηματογενών πετρωμάτων λαμβάνουν χώρα οι εξής διεργασίες:

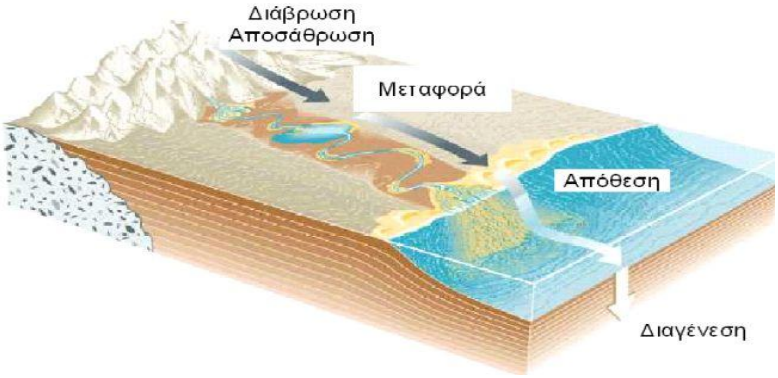
- **Διάβρωση και αποσάθρωση**, που είναι οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που υφίστανται τα προϋπάρχοντα πετρώματα με αποτέλεσμα την καταστροφή τους.
- **Μεταφορά** των υλικών που προέκυψαν από την αποσάθρωση, με τον άνεμο και το νερό των ποταμών και των θαλασσών.
- **Απόθεση** των υλικών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση. Η απόθεση γίνεται σε διαδοχικά στρώματα.
- **Διαγένεση**, που είναι η διαδικασία με την οποία ένα χαλαρό ίζημα μετατρέπεται σε συμπαγές πέτρωμα, με τη βοήθεια της πίεσης των υπερκείμενων στρωμάτων και της φυσικής συνδετικής ύλης.

Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους τα ιζηματογενή πετρώματα διακρίνονται σε:

Α) **μηχανικά ιζήματα**, τα οποία δημιουργούνται από τη μηχανική μεταφορά των υλικών της αποσάθρωσης με τη βοήθεια του νερού ή του ανέμου. Τα υλικά αυτά είναι στην αρχή ασύνδετα μεταξύ τους δίνοντας γένεση σε χαλαρούς σχηματισμούς, με την πάροδο όμως του χρόνου μεταπίπτουν σε συμπαγή πετρώματα (διαγένεση). Χαλαροί σχηματισμοί είναι οι κροκάλες, οι άμμοι ενώ συμπαγή πετρώματα είναι τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες, οι ιλυόλιθοι, κ.ά.

Β) **χημικά ιζήματα**, τα οποία δημιουργούνται από την κλασματική καθίζηση των υλικών της αποσάθρωσης που βρίσκονται διαλυμένα μέσα στο νερό. Η διάλυση προκαλείται από την κυκλοφορία των νερών της βροχής μέσα σε διάφορα πετρώματα, λόγω της διαλυτικής τους ικανότητας που οφείλεται στην παρουσία του CO_2. Χημικά ιζήματα είναι η γύψος, ο ανυδρίτης, ο ασβεστόλιθος, κ.ά.

Γ) **βιογενή ιζήματα**, τα οποία σχηματίζονται από τα ασβεστολιθικά ή πυριτικά κελύφη και τους σκελετούς διαφόρων ζώων που είτε ζουν στον πυθμένα είτε αιωρούνται μέσα στο νερό της θάλασσας. Μετά τον θάνατο των ζώων αυτών τα ασβεστολιθικά ή πυριτικά τους μέρη συσσωρεύονται στον πυθμένα και σχηματίζουν εκτεταμένα πετρώματα όπως ο κερατόλιθος κ.ά.



Εικόνα 2 Διεργασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων

Μεταμορφωμένα πετρώματα

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα προέρχονται από την μεταμόρφωση εκρηξιγενών ή ιζηματογενών όταν αυτά βρεθούν κάτω από νέες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η αλλαγή των φυσικών συνθηκών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία νέου ιστού ή και τον σχηματισμό νέων ορυκτών με αποτέλεσμα την αλλαγή της ορυκτολογικής σύστασης του αρχικού πετρώματος.

Ανάλογα με τον βαθμό μεταμόρφωσης, από έναν αρχικό σχηματισμό προκύπτουν διάφορα πετρώματα π.χ. άργιλος → σχιστή άργιλος → αργιλικός σχιστόλιθος → φυλλίτης → μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος.

Στα μεταμορφωμένα πετρώματα η επίδραση των δυνάμεων έχει ως αποτέλεσμα τον προσανατολισμό των διαφόρων ορυκτών και την δημιουργία παράλληλου ιστού (π.χ. γνεύσιος) ή σχιστότητας (π.χ. μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος). Γι' αυτό και τα πετρώματα της κατηγορίας αυτής ονομάζονται και κρυσταλλοσχιστώδη, παρόλο που ορισμένα από αυτά δεν παρουσιάζουν εμφανή σχιστότητα (π.χ. μάρμαρο κλπ).

2.1.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ-ΙΣΤΟΣ

Για να προσδιοριστεί ένα πέτρωμα θα πρέπει να αναγνωριστεί η ορυκτολογική του σύσταση και ο ιστός του.

Με τον όρο **ορυκτολογική σύσταση** ενός πετρώματος αναφερόμαστε στα διάφορα ορυκτά που το συνιστούν. Αν αυτά περιέχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5-10% λέγονται ουσιώδη ή κύρια, ενώ σε μικρότερο ποσοστό λέγονται επουσιώδη ή δευτερεύοντα. Ο αριθμός των κύριων ορυκτολογικών συστατικών ενός πετρώματος είναι συνήθως μικρός.

Με τον όρο **ιστό** αναφερόμαστε στη μορφή, στο μέγεθος, στην διάταξη στο χώρο και στον τρόπο συνδέσεων των διαφόρων ορυκτολογικών συστατικών.

Τα ορυκτά ενός πετρώματος διακρίνονται είτε μακροσκοπικά είτε μικροσκοπικά, με τη χρήση μικροσκοπίου, σαν ευδιάκριτοι κόκκοι, κάθε ένας από τους οποίους αποτελείται είτε από ένα κρύσταλλο είτε από περισσότερους, που μπορεί να είναι στρογγυλοί, γωνιώδεις ή να παρουσιάζουν κρυσταλλικές έδρες.

Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων το πέτρωμα χαρακτηρίζεται ως αδρόκοκκο, μεσόκοκκο ή λεπτόκοκκο. Όσων αφορά στην διάταξη των κόκκων αυτή μπορεί να είναι τυχαία μέσα στο πέτρωμα (άστρωτος ιστός) ή να είναι προσανατολισμένη περισσότερο ή λιγότερο προς μία ή περισσότερες διευθύνσεις (παράλληλος ιστός) όπως συμβαίνει στα διάφορα είδη σχιστολίθων. Σχετικά με την σύνδεση των κόκκων αυτή μπορεί να είναι ισχυρή (συμπαγές πέτρωμα) ή ασθενής (χαλαρό πέτρωμα)

Ακόμη, ένα πέτρωμα παρουσιάζει στρώση όταν έχει παράλληλο ιστό που έχει προέλθει από την ιζηματογένεση. Αντίθετα σχιστότητα είναι η ιδιότητα που παρουσιάζουν πολλά πετρώματα να αποχωρίζονται εύκολα σε πλάκες υπό την επίδραση κατευθυνόμενης πίεσης πάνω σε αυτά κατά τη μεταμόρφωση (σχιστόλιθοι).

2.1.3 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Αρκετά πετρώματα κοντά στην επιφάνεια της γης παρουσιάζουν καλά καθορισμένα δομικά στοιχεία υπό μορφή της διαστρωμάτωσης (stratification), της φύλλωσης (foliation), της σχιστότητας (schistosity) και των διακλάσεων (jointing). Σύμφωνα με τον Amadei (1996), το αποτέλεσμα πολλών χρόνων μηχανικής, θερμικής και χημικής καταπόνησης που υφίστανται τα πετρώματα οδήγησαν στη σημερινή ανισότροπη μορφή τους.

Ένα ανισότροπο πέτρωμα παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές διευθύνσεις καταπόνησης. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να είναι η αντοχή, το μέτρο παραμορφωσιμότητας, η διαπερατότητα και η συχνότητα των ασυνεχειών. Γενικά ένα ανισότροπο πέτρωμα παρουσιάζει ιδιότητες, όπως φυσικές, δυναμικές, μηχανικές και υδραυλικές οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τη διεύθυνση καταπόνησης.

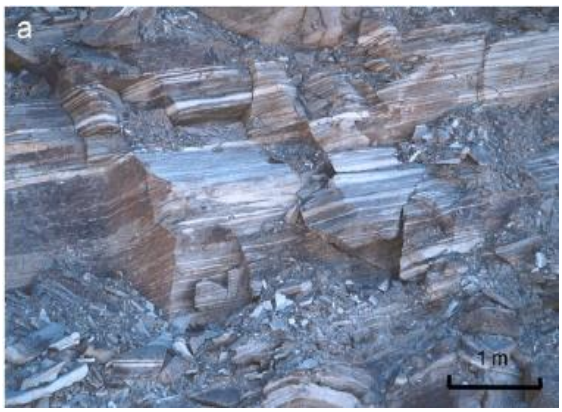
Η ανισοτροπία μπορεί να εντοπιστεί σε διάφορες κλίμακες στη βραχόμαζα ξεκινώντας από την ανισοτροπία των κρυστάλλων των ορυκτών, τη μικροδομή σε δοκίμια που εξετάζονται σε μικροσκόπιο (πετρογραφική ανισοτροπία λόγω διάταξης των ορυκτών στον ιστό του), την ανισοτροπία στην κλίμακα του εργαστηρίου μέχρι και σε μεγέθη που συναντώνται σε έργα μηχανικού.

Η ανισοτροπία είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των σχιστοποιημένων μεταμορφωμένων πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα ο γνεύσιος, ο φυλλίτης και ο σχιστόλιθος. Στα πετρώματα αυτά η δομή τους παρουσιάζεται ποικιλοτρόπως. Πετρώματα όπως ο σχιστόλιθος, τείνουν να διαχωρίζονται σε διευθύνσεις παράλληλες με τη διεύθυνση της σχιστότητας, η οποία οφείλεται στους κρυστάλλους μαρμαρυγίας, του χλωρίτη και άλλων διάφορων πεπλατυσμένων ορυκτών. Στους γνεύσιους, η χαρακτηριστική μορφή τους οφείλεται στον προσανατολισμό των διαφόρων ορυκτών που εμπεριέχουν. Σε μεταμορφωμένα πετρώματα χωρίς κάποια ορατή σχιστότητα ή φύλλωση όπως το μάρμαρο υφίσταται κάποιας μορφής ανισοτροπίας εξαιτίας του προσανατολισμού των κρυστάλλων του ασβεστίτη.

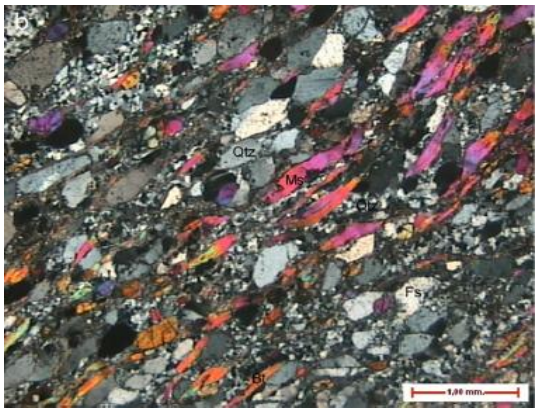
Η ανισοτροπία είναι επίσης χαρακτηριστικό γνώρισμα των στρωσιγενών πετρωμάτων όπως ο ιλυόλιθος, ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος. Αξίζει να σημειωθεί ότι πετρώματα που έχουν υποστεί διάφορες μορφές διεργασίας είναι πιθανό να παρουσιάσουν περισσότερα από ένα επίπεδο ανισοτροπίας. Αυτά τα επίπεδα ανισοτροπίας δεν είναι απαραίτητα παράλληλα μεταξύ τους.

Ανισοτροπία μπορεί να εντοπιστεί και σε βραχόμαζες ηφαιστειακών (βασάλτη, τύρφη) και ιζηματογενών πετρωμάτων που αποτελούνται από πολλά στρώματα (ισότροπα ή ανισότροπα) διαφόρων ειδών.

Όπως φαίνεται και από τις παρακάτω φωτογραφίες, η «εγγενής» ανισοτροπία του πετρώματος είναι εμφανής σε μακροκλίμακα μέσω των στρωσιγενών επιφανειών και η οποία, αν μελετηθεί σε μικροκλίμακα, οφείλεται στη διάταξη των ορυκτών.



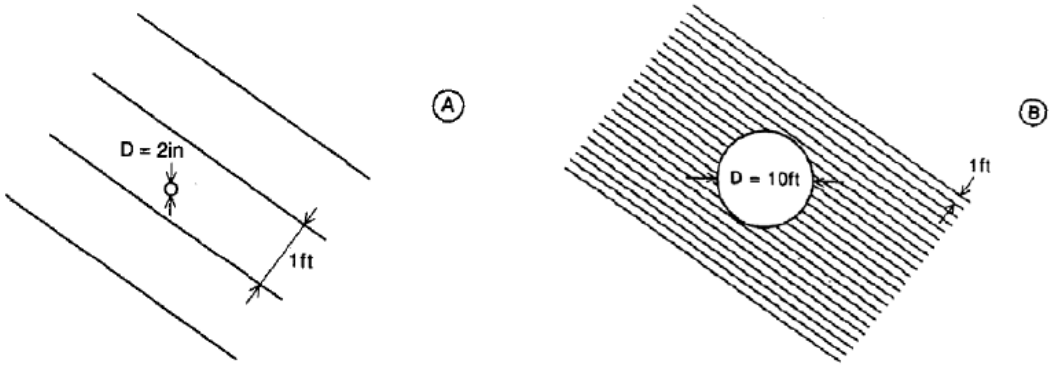
Εικόνα 4 Στρωματώδης Γνεύσιος



Εικόνα 3 Μεγέθυνση (x25) του γνευσίου όπου είναι εμφανή τα ορυκτά από τα οποία αποτελείται.

Ένα πέτρωμα μπορεί να τέμνεται από μία ή περισσότερες διακλάσεις, στοιχείο που το χαρακτηρίζει ως ανισότροπο όπως επίσης και διακλασμένο. Το άρρηκτο πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών μπορεί να συμπεριφέρεται ισότροπα ή ανισότροπα.

Η σημασία και η επίδραση της ανισοτροπίας στην συμπεριφορά των πετρωμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του έργου σε σχέση με το μέγεθος των δομικών χαρακτηριστικών του πετρώματος, όπως για παράδειγμα η απόσταση των ασυνεχειών, το πάχος των στρωμάτων κ.λπ. Επίσης, το είδος της ανισοτροπίας ενδεχομένως και να διαφέρει από τη μια κλίμακα στην άλλη. Αυτό φαίνεται σχηματική και στην εικόνα 5, όπου δύο κυκλικά ανοίγματα ανοίγονται στην ίδια βραχόμαζα που τέμνεται από μια οικογένεια ασυνεχειών με απόσταση 30 cm. Μπορούμε να θεωρήσουμε πως το πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών είναι ισότροπο. Στην περίπτωση Α, το άνοιγμα έχει διάμετρο 5 mm , δηλαδή πολύ μικρό σε σχέση με την απόσταση των ασυνεχειών και επομένως η βραχόμαζα μπορεί να προσομοιωθεί πρακτικά ως συνεχής και ισότροπη. Αντίθετα, στην περίπτωση Β όπου το άνοιγμα έχει διάμετρο 3 m η βραχόμαζα πρέπει να προσομοιωθεί ως ασυνεχής και ανισότροπη. Στην περίπτωση βέβαια που θεωρήσουμε ότι το άρρηκτο πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών είναι ανισότροπο, τότε και στις δύο περιπτώσεις (Α, Β) πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπόψη τη δομή του πετρώματος κατά την προσομοίωση της εκσκαφής. Στη περίπτωση Α η ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος είναι σοβαρή ενώ στην περίπτωση Β κρίσιμη είναι η επιρροή των ασυνεχειών στην ανισοτροπία του πετρώματος.



Εικόνα 5 Παράδειγμα διαφορετικής διαμέτρου ανοιγμάτων στην ίδια βραχόμαζα (Amadei, 1996)

2.2 Η ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΣΤΟ ΑΡΡΗΚΤΟ ΠΕΤΡΩΜΑ

2.2.1 ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΧΙΣΤΟΤΗΤΑ ΑΡΡΗΚΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Οι βασικές κατηγορίες των άρρηκτων πετρωμάτων που εμφανίζουν ανισότροπη συμπεριφορά είναι κατά κύριο λόγο τα μεταμορφωμένα και τα ιζηματογενή πετρώματα, στα οποία η «εγγενής» ανισοτροπία πηγάζει από την σχιστότητα και την στρωσιγένεια που αναπτύσσονται κατά τη γένεσή τους. Για τον υπολογισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} ενός άρρηκτου πετρώματος, της οποίας την τιμή εισάγουμε στο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown, το δείγμα το οποίο υποβάλλουμε σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από δομικές ασυνέχειες. Επομένως κρίνεται αναγκαία η ορθή επιλογή ενός δείγματος από την βραχόμαζα, με σκοπό να αποτρέψουμε την ύπαρξη επιφανειών αδυναμίας εντός αυτού και να αποφύγουμε την λανθασμένη εκτίμηση των χαρακτηριστικών του πετρώματος. Παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις τα δομικά χαρακτηριστικά του πετρώματος οφείλουν την ύπαρξή τους στην «εγγενή» ανισοτροπία και δεν μπορούν να αφαιρεθούν από το δοκίμιο. Επομένως οδηγούν σε ένα εύρος αποτελεσμάτων στην τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, το οποίο είναι συνάρτηση της γωνίας που σχηματίζει ο άξονας της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο ανισοτροπίας.

<u>Στρωσιγένεια</u>

Τα ιζηματογενή πετρώματα διατάσσονται στο χώρο κατά σειρές στρωμάτων. Στρώμα είναι μία λιθολογική ενότητα με μεγάλη έκταση που η πάνω και η κάτω επιφάνειά της είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και στην οποία ο πετρογραφικός χαρακτήρας δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου ή και καθόλου.

Σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ρυθμικής εναλλαγής στρώσεων διαφόρων πετρωμάτων σε μία κατακόρυφη τομή, διότι κατά την ιζηματογένεση ενδέχεται να διακοπεί η απόθεση ενός υλικού Α (π.χ. μάργα) και να συνεχιστεί με την απόθεση ενός άλλου υλικού Β (π.χ. άργιλος). Όπως είναι λογικό αυτή η εναλλαγή του είδους του πετρώματος έχει σαν συνέπεια την μεταβολή των ιδιοτήτων των πετρωμάτων σε κάθε αλλαγή.

Επομένως η στρώση χαρακτηρίζει τα ιζηματογενή πετρώματα και μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα επίπεδο οριζόντιο ή κεκλιμένο που τέμνει το πέτρωμα. Στο επίπεδο στρώσης θεωρούμε πως σταματά η συνέχεια της δομής του βράχου σε όλη την έκταση της. Για τον λόγο αυτό η στρώση αποτελεί μία επιφάνεια ολικής ασυνέχειας του πετρώματος και οδηγεί σε ανισότροπη συμπεριφορά.

Σχιστότητα

Είναι η ιδιότητα που παρουσιάζουν πολλά πετρώματα να αποχωρίζονται εύκολα σε πλάκες λόγω στρώσεως ή παράλληλου ιστού, εξαιτίας της επίδρασης κατευθυνόμενης πίεσης πάνω στο πέτρωμα. Η πίεση αυτή μπορεί είτε να είναι τεκτονική, είτε να οφείλεται στο βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων. Κάτω από την πίεση αυτή και με μία πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας, το πέτρωμα αποκτά πλαστικότητα ενώ τα επιμήκη και φυλλώδη ορυκτά αναδιατάσσονται ώστε ο μεγαλύτερος άξονας τους να είναι κάθετος στη διεύθυνση της πίεσης. Μέσω της διαδικασίας αυτής δημιουργούνται τα σχιστολιθικά πετρώματα τα οποία εμφανίζουν μέγιστη θλιπτική αντοχή όταν η διεύθυνση του φορτίου είναι κάθετη προς το επίπεδο σχιστότητας και ελάχιστη όταν τα φορτία εφαρμόζονται σε γωνία 30º έως 45º ως προς αυτό.

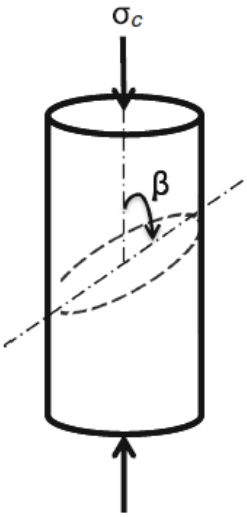
2.2.2 Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ R_c

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή ($\sigma_{c\beta}$) ενός «εγγενούς» ανισότροπου πετρώματος παρουσιάζει διακύμανση στην τιμή της, η οποία είναι συνάρτηση της γωνίας που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με την επιφάνεια ανισοτροπίας. Το εύρος στην τιμή της αντοχής εκφράζεται μέσω του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος $R_c = \sigma_{ci(90)} / \sigma_{ci(min)}$, όπου $\sigma_{ci(90)}$ είναι η μέγιστη αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη για φόρτιση κάθετα στα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας, ενώ $\sigma_{ci(min)}$ η ελάχιστη αντοχή του άρρηκτου πετρώματος η οποία προκύπτει όταν το δοκίμιο είναι προσανατολισμένο με τέτοιο τρόπο ώστε η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 να σχηματίζει γωνία 30 έως 45 μοίρες με την επιφάνεια ανισοτροπίας. Είναι φανερό πως καθώς αυξάνει ο βαθμός ανισοτροπίας ενός πετρώματος, η τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c αναμένεται να μεγαλώσει. Με βάση τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής (R_c) προτάθηκε ταξινόμηση της ανισοτροπίας αντοχής του άρρηκτου πετρώματος από τον Ramamurthy (1993). Γενικά, η μεταβολή της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος σε συνθήκες μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε σχέση με τον προσανατολισμό του επιπέδου ανισοτροπίας ορίζεται ως ανισοτροπία αντοχής.

Πίνακας 1 Ταξινόμηση πετρωμάτων με βάση τον δείκτη ανισοτροπίας (Ramamurthy, 1993)

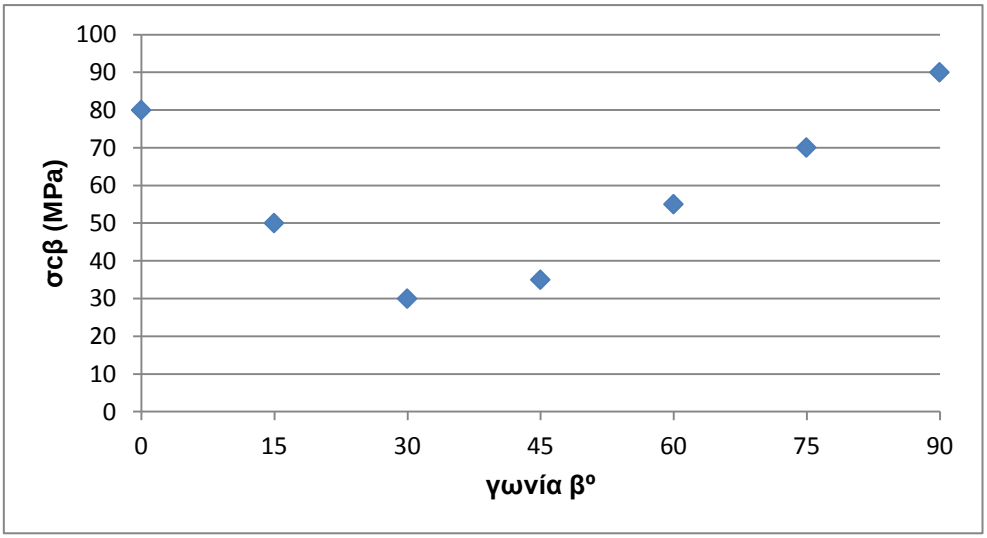
Δείκτης ανισοτροπίας R_c	**Ανισοτροπία:**
$1<R_c\leq1.1$	Ισότροπο πέτρωμα
$1.1<R_c\leq2$	Χαμηλή ανισοτροπία
$2<R_c\leq4$	Μέτρια ανισοτροπία
$4<R_c\leq6$	Υψηλή ανισοτροπία
$R_c>6$	Πολύ υψηλή ανισοτροπία

Η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο ανισοτροπίας θα την συμβολίζουμε ως β (εικόνα 6).



Εικόνα 6 Η γωνία β

Τα παραπάνω φαίνονται και στο γράφημα 1 που ακολουθεί, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ ενός σχιστόλιθου (Kumar 2006), συναρτήσει της γωνίας β. Παρατηρήθηκε πως η μέγιστη αντοχή των 90 MPa προκύπτει για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας (β=90º), ενώ η ελάχιστη, που ισούται με 30 MPa, εμφανίζεται όταν το επίπεδο ανισοτροπίας σχηματίζει γωνία β=30º με τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1. Επομένως η αντοχή ενός πετρώματος εξαρτάται άμεσα από τον προσανατολισμό της επιφάνειας ανισοτροπίας σε σχέση με τη διεύθυνση επιβολής του αξονικού φορτίου. Για τον συγκεκριμένο σχιστόλιθο υπολογίσθηκε ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής Rc=3 και με βάση τον πίνακα 1 θα μπορούσε να χαρακτηρισθεί ως ένα μέτρια ανισότροπο πέτρωμα.



Γράφημα 1 Μεταβολή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ συναρτήσει της γωνίας β (σχιστόλιθος, Kumar 2006)

2.3 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK-BROWN

Πρόκειται για ένα ημιεμπειρικό μη-γραμμικό κριτήριο, η αρχική μορφή του οποίου παρουσιάστηκε από τους Hoek και Brown το 1980, οι οποίοι στηρίχθηκαν σε ήδη υπάρχουσα εξίσωση που περιέγραφε την αστοχία του σκυροδέματος από το 1936. Κατά τα έτη που ακολούθησαν το κριτήριο επαναδιατυπώθηκε βάσει γεωλογικών παρατηρήσεων και εμπειρίας, ενώ χρησιμοποιήθηκε ως βασική παράμετρος ο δείκτης RMR (Bieniawski, 1973), ο οποίος το 1995 αντικαταστάθηκε από τον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI. Η τελική μορφή του κριτηρίου δόθηκε το 2002 από τους Hoek, Carranza-Torres και Corkum.

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown είχε αρχικά προταθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το πέτρωμα συμπεριφέρεται ισότροπα, έχοντας παράλληλα εφαρμογή και σε βραχόμαζες που αποτελούνται από κοντινές ασυνέχειες και οι οποίες της προσδίδουν ισότροπη συμπεριφορά. Στη συνέχεια οι Hoek και Brown τροποποίησαν το κριτήριο αστοχίας προκειμένου να έχει εφαρμογή και σε πετρώματα με «εγγενή» ανισοτροπία, δηλαδή σε πετρώματα που οφείλουν την ανισότροπη τους συμπεριφορά στην διαδικασία γένεσής τους (π.χ. στρωσιγενείς ιζηματογενή πετρώματα). Σε περιπτώσεις όμως κατά τις οποίες η ανισοτροπία του πετρώματος οφείλεται στην ύπαρξη ενός κύριου επιπέδου αδυναμίας, όπως μια κύρια επιφάνεια ασυνέχειας, προτείνεται η ανάλυση με ένα επίπεδο αδυναμίας που αναπτύχθηκε από τους Jaeger και Cook.

2.3.1 ΤΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK-BROWN

Το γενικευμένο κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της αντοχής τόσο του άρρηκτου πετρώματος όσο και της βραχόμαζας, σε ολόκληρο το εύρος ποιότητάς της. Θεωρεί πως η βραχόμαζα αποτελείται από σκληρό πέτρωμα που διατέμνεται από πολλαπλά συστήματα ασυνεχειών, από τα οποία όμως κανένα δεν δημιουργεί δυνητική αστάθεια έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ισότροπη.

Το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown για τη βραχόμαζα δίνεται παρακάτω.

$$\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\ \ m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s}^{\ \mathbf{a}}$$

$$m_b = m_i * e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

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

Όπου:

- ✓ σ_1 : η μέγιστη κύρια τάση κατά την αστοχία
- ✓ σ_3 : η ελάχιστη κύρια τάση κατά την αστοχία
- ✓ σ_{ci} : η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος
- ✓ GSI: η τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής που προκύπτει έπειτα από βαθμονόμηση της βραχόμαζας

- ✓ m_i : σταθερά του άρρηκτου πετρώματος, η οποία εξαρτάται από τη λιθολογική του σύσταση, την αλληλεμπλοκή των κόκκων του καθώς και από την εσωτερική γωνία τριβής του.
- ✓ m_b : η μειωμένη σταθερά m_i, η οποία αναφέρεται στη ρωγματωμένη βραχόμαζα.
- ✓ s : σταθερά που εξαρτάται από την ποιότητα (κερματισμού και αποσάθρωσης) της βραχόμαζας
- ✓ α : σταθερά που εξαρτάται από την ποιότητα (κερματισμού και αποσάθρωσης) της βραχόμαζας
- ✓ D : συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό διατάραξης της βραχόμαζας κατά την εκσκαφή (τιμή από 0, για προσεκτική και ελεγχόμενη ανατίναξη, έως και την τιμή 1, για έντονη διατάραξη λόγω των ανατινάξεων) (Πίνακας 4)

Ενώ για την περίπτωση του άρρηκτου πετρώματος το κριτήριο παίρνει την μορφή:

$$\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \ \ m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}^{\ 0.5}$$

Επομένως αντικαθιστώντας την παράμετρο m_b με την παράμετρο m_i και δίνοντας στις σταθερές s, α τις τιμές 1 και 0,5 αντίστοιχα, προκύπτει η έκφραση του κριτηρίου Hoek-Brown για άρρηκτο πέτρωμα.

Είναι επομένως εμφανές πως η σχέση που συνδέει τις κύριες τάσεις (σ_1, σ_3) κατά την αστοχία ενός πετρώματος ορίζεται κατά κύριο λόγο από δύο παραμέτρους. Την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) και την σταθερά m_i. Όταν καθίσταται δυνατό, οι τιμές των δύο αυτών παραμέτρων του πετρώματος θα πρέπει να προσδιορίζονται μέσω τριαξονικών δοκιμών, που εκτελούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών κρίνεται δυσχερής, δίνεται η δυνατότητα χρήσης των πινάκων 2 και 3 για την εκτίμηση της τιμής των παραμέτρων.

Μέσω του πίνακα 2 έχουμε τη δυνατότητα για επί τόπου εκτίμηση της αντοχής ενός πετρώματος, ενώ ο πίνακας 3 μας πληροφορεί για την τιμή της παραμέτρου m_i για ένα πλήθος πετρωμάτων. Ο πίνακας 4 παρέχει πληροφορίες για την εκτίμηση του παράγοντα διατάραξης D.

Πίνακας 2 Επί τόπου εκτίμηση αντοχής πετρώματος (κατά ISRM, 1981)

Περιγραφή	σ_{ci} (MPa)	Επί τόπου εκτίμηση της αντοχής	Παραδείγματα
Εξαιρετικά ισχυρό	>250	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί.	Υγιής βασάλτης, χαλαζίτης, διάβασης, γνεύσιος, γρανίτης, πυριτιόλιθος
Πολύ ισχυρό	100-250	Θραύεται μετά από πολλούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί.	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, γρανοδιορίτης, περιδοτίτης, ρυόλιθος, τόφος
Ισχυρό	50-100	Θραύεται με περισσότερο από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί.	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
Μετρίως ισχυρό	25-50	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι. Θραύεται με ένα μόνο κτύπο με γεωλογικό σφυρί.	Σκυρόδεμα, φυλλίτης, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
Ασθενές	5-25	Χαράσσεται δύσκολα με μαχαίρι.	Κιμωλία, αργιλόλιθος, ποτάσα, μάργα, αργιλικός σχιστόλιθος, ορυκτό αλάτι
Πολύ ασθενές	1-5	Θρυμματίζεται με ισχυρά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί. Χαράσσεται με μαχαίρι.	Έντονα αποσαθρωμένος ή εξαλλοιωμένος βράχος
Εξαιρετικά ασθενές	0.25-1	Χαράσσεται με το νύχι.	Στιφρό υλικό πλήρωσης ρήγματος

Πίνακας 3 Τιμές της σταθεράς m_i για το ακέραιο πέτρωμα κατά λιθολογικό τύπο πετρώματος (Hoek & Marinos, 2000)

Τύπος	Ομάδα		Κοκκομετρία			
			Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγές (21±3)* Λατυποπαγές (19±5)*	Ψαμμίτης 17±4	Ιλυόλιθος 7±2 Γραουβάκης (18±3)	Αργιλόλιθος 4±2 Αργ. Σχιστόλιθος (6±2) Μάργες (7±2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος (12±3)	Σπαριτικός ασβεστόλιθος (10±2)	Μικριτικός ασβεστόλιθος (9±2)	Δολομίτης (9±3)
		Εβαπορίτες		Γύψος 8±2	Ανυδρίτης 12±2	
		Οργανικά				Κιμωλία 7±2
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 9±3	Κερατόλιθος (19±4) Μεταψαμμίτης (19±3)	Χαλαζίτης 20±3	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτης 29±3	Αμφιβολίτης 26±6	Γνεύσιος 28±5	
	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθος 12±3	Φυλλίτης 7±3	Σχίστης 7±4
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 32±3 Γρανοδιορίτης (29±3)	Διορίτης 25±5		
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 27±3 Νορίτης 20±5	Δολερίτης (16±5)		
	Υποβυσσικά		Πορφύρης (20±5)		Διαβάσης (15±5)	Περιδοτίτης (25±5)
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25±5) Ανδεσίτης 25±5	Δακίτης (25±3) Βασάλτης (25±5)	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγές (19±3)	Ηφ. Λατυποπαγές (19±5)	Τόφφος (13±5)	

(*) Το m_i των κροκαλοπαγών και λατυποπαγών εξαρτάται από το είδος του συνδετικού υλικού και το βαθμό συγκόλλησης. Έτσι η τιμή του mi μπορεί να κυμαίνεται από αυτή που αντιστοιχεί στους ψαμμίτες μέχρι αυτήν των λεπτόκοκκων ιζημάτων.

(**) Οι τιμές του m_i αναφέρονται σε δείγματα άρρηκτου πετρώματος που δοκιμάσθηκαν κάθετα στη στρώση ή σχιστότητα. Το m_i μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τις αναφερόμενες τιμές αν η θραύση λάβει χώρα κατά μήκος επιφανειών αδυναμίας.

Πίνακας 4 Οδηγίες για την εκτίμηση του παράγοντα διατάραξης D (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002)

Εμφάνιση βραχόμαζας	Περιγραφή βραχόμαζας	Προτεινόμενη τιμή D
	Προσεκτική χρήση εκρηκτικών ή εκσκαφή με TBM, με αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας.	D = 0.0
	Μηχανική εκσκαφή σε πτωχής ποιότητας βραχόμαζα (δίχως χρήση εκρηκτικών) με αποτέλεσμα την ελάχιστη διαταραχή της περιβάλλουσας βραχόμαζας.	D = 0.0
	Στην περίπτωση εκτεταμένων συγκλίσεων με ανύψωση του δαπέδου μπορεί να δημιουργηθεί σημαντική διαταραχή, εκτός εάν κατασκευαστεί προσωρινό ανάστροφο τόξο.	D = 0.5 Δίχως προσωρινό ανάστροφο τόξο
	Ανατινάξεις πολύ πτωχής ποιότητας σε σκληρούς βράχους έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική διαταραχή στην περιβάλλουσα βραχόμαζα έκτασης 2-3m.	D = 0.8
	Μικρής κλίμακας ανατινάξεις σε πρανή έργων πολιτικού μηχανικού έχουν ως αποτέλεσμα μέτρια αστοχία της βραχόμαζας. Ωστόσο η εκτόνωση των τάσεων έχει ως αποτέλεσμα κάποια διαταραχή.	D = 0.7 Καλή ποιότητα ανατινάξεων
		D = 1.0 Πτωχή ποιότητα ανατινάξεων
	Η βραχόμαζα στα πολύ μεγάλα πρανή ανοιχτών ορυχείων διαταράσσεται σημαντικά λόγω της εκτεταμένης χρήσης εκρηκτικών και της αποτόνωσης των τάσεων από την αφαίρεση της υπερκείμενης μάζας.	D = 1.0 Εκρηκτικά
	Σε ορισμένους πιο μαλακούς βράχους η εκσκαφή μπορεί να γίνει με ποιο ήπια μέσα, με αποτέλεσμα τη μειωμένη διαταραχή της βραχόμαζας.	D = 0.7 Μηχανική εκσκαφή

2.3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK & BROWN ΓΙΑ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΟ ΠΕΤΡΩΜΑ (1980)

Οι Hoek & Brown υποστηρίζουν ότι «η ανάλυση με ένα επίπεδο αδυναμίας», που αναπτύχθηκε από τους Jaeger και Cook (1976), είναι ικανοποιητική για την εκτίμηση της αντοχής ενός πετρώματος που εμφανίζει ανισότροπη συμπεριφορά λόγω της ύπαρξης ενός κύριου επιπέδου αδυναμίας, όπως για παράδειγμα μια κύρια ασυνέχεια. Ωστόσο υπογραμμίζουν πως η θεώρηση αυτή δεν περιγράφει επαρκώς την αντοχή ενός άρρηκτου πετρώματος που χαρακτηρίζεται από «εγγενή» ανισοτροπία και η οποία οφείλεται στην παρουσία στρωσιγένειας ή σχιστότητας, ιδιότητες που συναντώνται συχνά σε πετρώματα όπως ο γνεύσιος, ο σχίστης κ.λπ.

Η συμπεριφορά ενός άρρηκτου, «εγγενούς» ανισότροπου πετρώματος κατά την αστοχία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό των επιφανειών ανισοτροπίας ως προς τον άξονα φόρτισης. Επομένως, ο προσδιορισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ενός «εγγενούς» ανισότροπου πετρώματος παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, λαμβάνοντας υπόψη μας πως τυχών αστοχία του πετρώματος κατά την διεύθυνση του επιπέδου ανισοτροπίας θα οδηγήσει σε διαφορετικές τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής σ_{ci} και της σταθερά m_i σε σχέση με αυτές που αρχικά υπολογιστήκαν μέσω εργαστηριακών δοκιμών, όπου η φόρτιση έγινε κάθετα στα επίπεδα ανισοτροπίας.

Για τον παραπάνω λόγο, οι Hoek και Brown πρότειναν τροποποιήσεις στην τιμή των σταθερών m και s του αρχικού κριτηρίου Hoek & Brown σε σχέση με τον προσανατολισμό του επιπέδου ανισοτροπίας ως προς τον κύριο άξονα φόρτισης. Οι τροποποιήσεις στην τιμή των σταθερών m και s προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\frac{m}{m_i} = 1 - A\exp\left[-\frac{\beta - \xi m}{A_2 + \beta A_3}^{4}\right]$$

$$s = 1 - P\exp\left[-\frac{\beta - \xi s}{P_2 + \beta P_3}^{4}\right]$$

Όπου:

- ✓ ξ_m : η γωνία β για την οποία η σταθερά m παίρνει την ελάχιστη τιμή
- ✓ ξ_s : η γωνία β για την οποία η σταθερά s παίρνει την ελάχιστη τιμή
- ✓ A : σταθερά που δίνεται από την σχέση $A = m_i - \frac{m_{min}}{m_i}$
- ✓ P : σταθερά που δίνεται από τη σχέση $P = (1 - s_{min})$
- ✓ A_2, A_3, P_2, P_3 : σταθερές

Η εκτίμηση της αντοχής ενός ανισότροπου άρρηκτου πετρώματος μέσω των παραπάνω σχέσεων αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο για να προσεγγίσουμε την «εγγενή» ανισοτροπία, ενώ απαιτεί την διενέργεια ενός μεγάλου αριθμού τριαξονικών δοκιμών σε κατάλληλα προσανατολισμένα δοκίμια. Ακόμη, η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη της την μεταβολή στην τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του πετρώματος συναρτήσει της γωνίας φόρτισης β και έτσι μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

2.3.3 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK & BROWN ΓΙΑ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΟ ΠΕΤΡΩΜΑ

Το κριτήριο προτάθηκε από τους Σαρόγλου (2007) και Saroglou & Tsiambaos (2008). Η σταθερά m_i του κριτηρίου αστοχίας των Hoek & Brown είναι χαρακτηριστικό του κάθε πετρώματος και προκύπτει μέσα από μια σειρά τριαξονικών δοκιμών που εκτελούνται κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας του. Επομένως, συμφώνα με τους Saroglou & Tsiambaos (2008), η τιμή της σταθεράς αυτής δεν θα πρέπει να αλλάζει κατά την προσπάθεια μας να ενσωματώσουμε την επιρροή της ανισοτροπίας στην αντοχή του πετρώματος. Για τον σκοπό αυτό προτείνουν την προσθήκη μιας παραμέτρου στο κριτήριο αστοχίας, το εύρος της οποίας πρακτικά συνδέεται με τον δείκτη ανισοτροπίας της αντοχής R_c. Η παράμετρος αυτή συμβολίζεται ως K_β και μας δείχνει τον βαθμό στον οποίο η «εγγενής» ανισοτροπία επηρεάζει την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Επομένως το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown προσεγγίζει άμεσα την επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας στην συμπεριφορά του πετρώματος. Αφενός μέσω της παραμέτρου K_β και αφετέρου μέσω της διακύμανσης στην τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, σε συνάρτηση με το προσανατολισμό β ($\sigma_{c\beta}$). Η παραπάνω προσέγγιση της ανισοτροπίας εκφράζεται από την σχέση που ακολουθεί.

$$\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta} \quad K_\beta * m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} + 1}^{\mathbf{0.5}}$$

Όπου:

- ✓ $\sigma_{c\beta}$: η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος σε φόρτιση υπό γωνία β ως προς το επίπεδο ανισοτροπίας
- ✓ s=1 και α=0.5, αφού αναφερόμαστε σε άρρηκτο πέτρωμα.

<u>Η παράμετρος K_β</u>

Η παράμετρος K_β που εισάγεται στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown πρακτικά σχετίζεται με τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c. Συγκεκριμένα παρέχει τη δυνατότητα άμεσης εισαγωγής της επιρροής της «εγγενούς» ανισοτροπίας στο κριτήριο αστοχίας, χωρίς να χρειαστεί μεταβολή στις τιμές των σταθερών m και s.

Οι βασικές τροποποιήσεις του κριτηρίου, οι οποίες αποσκοπούν στο να εισαχθεί η επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας, είναι:

a) η χρήση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ έναντι της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}, όπου β η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο ανισοτροπίας.
b) Η χρήση της παραμέτρου K_β που υποδηλώνει το εύρος μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης αντοχής του άρρηκτου πετρώματος.

Όταν η φόρτιση εκτελείται κάθετα στο επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας του άρρηκτου πετρώματος, τότε η επιρροή της ανισοτροπίας στην αντοχή του ελαχιστοποιείται και η παράμετρος K_β ισούται με την μονάδα. Αντίθετα, η παράμετρος λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν η φόρτιση πραγματοποιείται υπό γωνία β στο

εύρος των 30 με 45 μοιρών, όπου συνήθως η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος είναι η ελάχιστη δυνατή. Ακόμη παρατηρείται χαμηλότερη τιμή της παραμέτρου K_β για πετρώματα με μεσαία έως υψηλή ανισοτροπία σε σχέση με πετρώματα όπου η ανισοτροπία είναι χαμηλή.

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή $\sigma_{c\beta}$

Για να χρησιμοποιηθεί το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας των Hoek & Brown είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ($\sigma_{c\beta}$) σε διάφορες γωνίες β. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της εκτέλεσης εργαστηριακών δοκιμών σε κατάλληλα προσανατολισμένα δοκίμια, είτε χρησιμοποιώντας την σχέση που δίνεται παρακάτω. Η σχέση αυτή προτάθηκε από τον Jaeger και μετέπειτα τροποποιήθηκε από τον Donath.

$$\sigma_{c\beta} = \mathrm{A} - \mathrm{D}[\cos 2\ \beta\mathrm{m} - \beta\ ]$$

Όπου:

- ✓ β_m : η γωνία β στην οποία η μονοαξονική θλιπτική αντοχή λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της.
- ✓ *A, D* : σταθερές των οποίων οι τιμές προσδιορίζονται όταν είναι εργαστηριακά υπολογισμένη η μονοαξονική θλιπτική αντοχή $\sigma_{c\beta}$ σε τουλάχιστον τρεις διαφορετικές γωνίες φόρτισης, π.χ. για β=0º, 30º και 90º. Συγκεκριμένα η σταθερά D σχετίζεται με τον δείκτη ανισοτροπίας.

2.4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Αντλώντας δεδομένα τριαξονικών δοκιμών για διάφορα πετρώματα, που χαρακτηρίζονται ως «εγγενώς» ανισοτροπα, από την βιβλιογραφία, έγινε προσπάθεια να ερμηνευθεί η σημασία της παραμέτρου K_β που εισάγεται στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown, να παρατηρηθεί η συσχέτισή της με τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c και να εξαχθεί μια χρήσιμη σχέση η οποία θα τα συσχετίζει. Τα πετρώματα τα οποία μελετήθηκαν είναι:

- φυλλίτης (Kumar 2006)
- σχιστόλιθος (Kumar 2006)
- χαλαζίτης (Kumar 2006)
- σχιστόλιθος του Penrhyn (Attewell & Sandford 1974)
- βιοτιτικός σχιστόλιθος (Behrestaghi 1996)
- χλωριτικός σχιστόλιθος (Behrestaghi 1996)
- χαλαζιακός μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος (Behrestaghi 1996).

Για κάθε ένα από τα παραπάνω πετρώματα ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια:

- Αρχικά για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο εγγενούς ανισοτροπίας και για μηδενική πλευρική τάση (σ_3=0), από τα δεδομένα των τριαξονικών δοκιμών βρέθηκε η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci}.
- Στη συνέχεια για γωνία φόρτισης β=90º, επομένως K_β=1, έγινε προσπάθεια να εκτελεσθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown στα εργαστηριακά δεδομένα (best fitting), υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο την σταθερά m_i του πετρώματος.
- Τέλος, με γνωστή πλέον την τιμή της σταθεράς m_i εφαρμόσθηκε η ίδια διαδικασία (best fitting) στα εργαστηριακά δεδομένα των υπόλοιπων γωνιών φόρτισης β, υπολογίζοντας την σταθερά K_β για κάθε μία από αυτές (β=15º, 30º, 45º κ.λπ.).

Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα συγκεκριμένα πετρώματα φαίνονται στον πίνακα 5 και συνοδεύονται από συμπεράσματα που προκύπτουν βάση των διαγραμμάτων που ακολουθούν. Ακόμη στο παράρτημα Α που παρατίθεται στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εμφανίζονται τα γραφήματα που προέκυψαν από την διαδικασία της καλύτερης προσαρμογής (best fitting) του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek-Brown στα εργαστηριακά δεδομένα, τόσο για τον προσδιορισμό της σταθεράς m_i όσο και της παραμέτρου K_β.

Πίνακας 5 Αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με βάση δεδομένα τριαξονικών δοκιμών

α.α.	Ομάδα πετρώματος	Τύπος πετρώματος	Βιβλιογραφική αναφορά	mi	Rc	Ανισο-τροπία:	Kmin	βº για Kmin	K90/Kmin
1	Σχιστόλιθος Penrhyn	-	Attewell & Sandford 1974	6,24	5,4	Υψηλή	0,31	30	3,22
2	Σχιστόλιθος	Βιοτιτικός	Behrestaghi 1996	19,2	1,67	Χαμηλή	0,57	30	1,75
3	Σχιστόλιθος	Χαλαζιακός μαρμαρυγιακός	Behrestaghi 1996	28,16	2,04	Μεσαία	0,56	45	1,79
4	Σχιστόλιθος	Χλωριτικός	Behrestaghi 1996	17,03	2,22	Μεσαία	0,63	45	1,59
5	Χαλαζίτης	-	Kumar 2006	33,3	1,9	Χαμηλή	0,79	30	1,27
6	Φυλλίτης	-	Kumar 2006	13,2	2,57	Μεσαία	0,50	45	2
7	Σχιστόλιθος	-	Kumar 2006	16,3	3	Μεσαία	0,58	45	1,73
8	*Γνεύσιος	-	Saroglou & Tsiambaos 2007	23,2	3,8	Μεσαία	0,41	45	2,44
9	*Μάρμαρο	-	Saroglou & Tsiambaos 2007	9,6	1.16	Χαμηλή	0,91	30	1,1

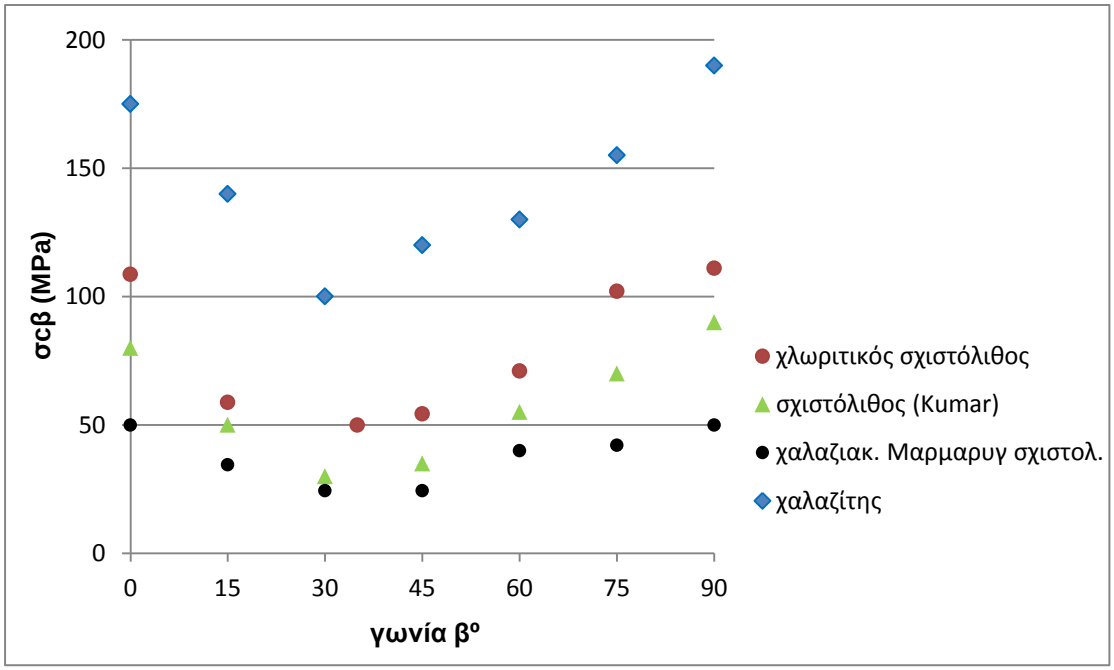
*δεδομένα αναλύσεων από άρθρο "A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock" Saroglou&Tsiambaos

2.4.1 Η ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ $\sigma_{c\beta}$ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ β

Τοποθετώντας στο ίδιο γράφημα τις τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ (δηλαδή για μηδενική πλευρική τάση, σ_3=0) συναρτήσει της γωνίας β, που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο ανισοτροπίας, για τα πετρώματα με α.α. 3,4,5 και 7 παρατηρούμε:

- Την επιρροή που ασκεί η «εγγενής» ανισοτροπία στην αντοχή του πετρώματος καθώς μεταβάλλεται η γωνία β. Είναι εμφανές πως η γωνία στην οποία παρουσιάζεται η χαμηλότερη τιμή της αντοχής είναι αυτή των 30º. Αντίθετα και στα τέσσερα πετρώματα η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται όταν το φορτίο ασκείται κάθετα στο επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας.

- Ακόμη γίνεται αντιληπτό πως το εύρος μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης αντοχής σχετίζεται με τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής Rc, καθώς πετρώματα στα οποία η ανισοτροπία είναι χαμηλή δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες μεταβολές στην τιμή της αντοχής τους καθώς αλλάζει η τιμή της γωνίας β.



Γράφημα 2 Μεταβολή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ συναρτήσει της γωνίας β

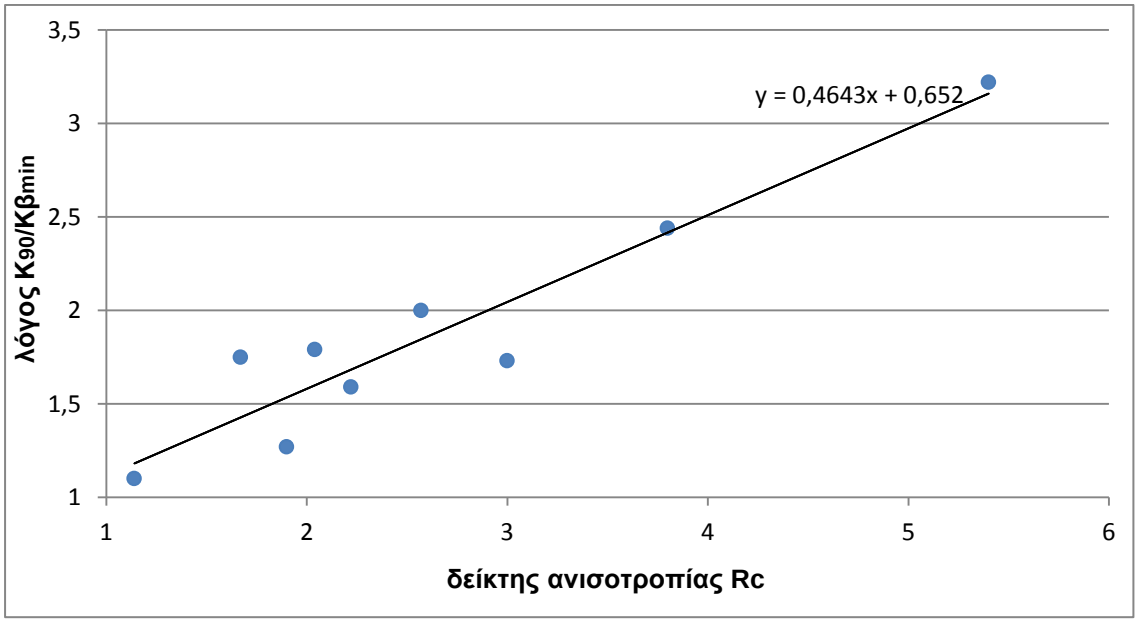
2.4.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΊΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ R_c ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $K\beta_{min}$

Για να υπολογισθεί η τιμή της παραμέτρου K_β σε οποιαδήποτε γωνία β είναι απαραίτητο να εκτελεσθούν τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια άρρηκτου πετρώματος. Αντίθετα, για τον προσδιορισμό του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c απαιτούνται μονοαξονικές θλιπτικές δοκιμές. Θα ήταν επομένως χρήσιμη η εξαγωγή μίας σχέσης, με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξήχθησαν, η οποία θα συνέδεε την παράμετρο $K_{\beta min}$ με τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c. Η σχέση αυτή θα ήταν ιδιαίτερα εύχρηστη καθώς θα επέτρεπε μέσω της διενέργειας απλών μονοαξονικών θλιπτικών δοκιμών να υπολογισθεί η τιμή και των δύο παραμέτρων (R_c και $K_{\beta min}$).

Στο γράφημα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η γραμμική συσχέτιση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με τον λόγο $K_{90}/K_{\beta min}$, όπου K_{90} = 1 καθώς για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας η επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας ελαχιστοποιείται.

Με βάση το γράφημα αυτό προέκυψε η παρακάτω εξίσωση η οποία περιγράφει, όσο πιο αποτελεσματικά γίνεται, την σχέση που συνδέει τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με τον αντίστροφο της παραμέτρου $K_{\beta min}$. Παρατηρώντας την σχέση αυτή είναι φανερό πως για ένα απόλυτα ισότροπο πέτρωμα (Rc=1), ο λόγος $K_{90}/K_{\beta min}$ ισούται με την τιμή 1.116, δηλαδή κοντά στη μονάδα. Η γραμμική συσχέτιση των δύο παραμέτρων (R_c, $K_{\beta min}$) φανερώνει πως τυχών αύξηση της ανισοτροπίας ενός πετρώματος (δηλαδή αύξηση της τιμής του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c) θα οδηγήσει σε μείωση της τιμής της παραμέτρου $K_{\beta min}$. Επομένως η εφαρμογή του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown για «εγγενές» ανισότροπο πέτρωμα θα οδηγήσει σε μείωση της αντοχής του πετρώματος.

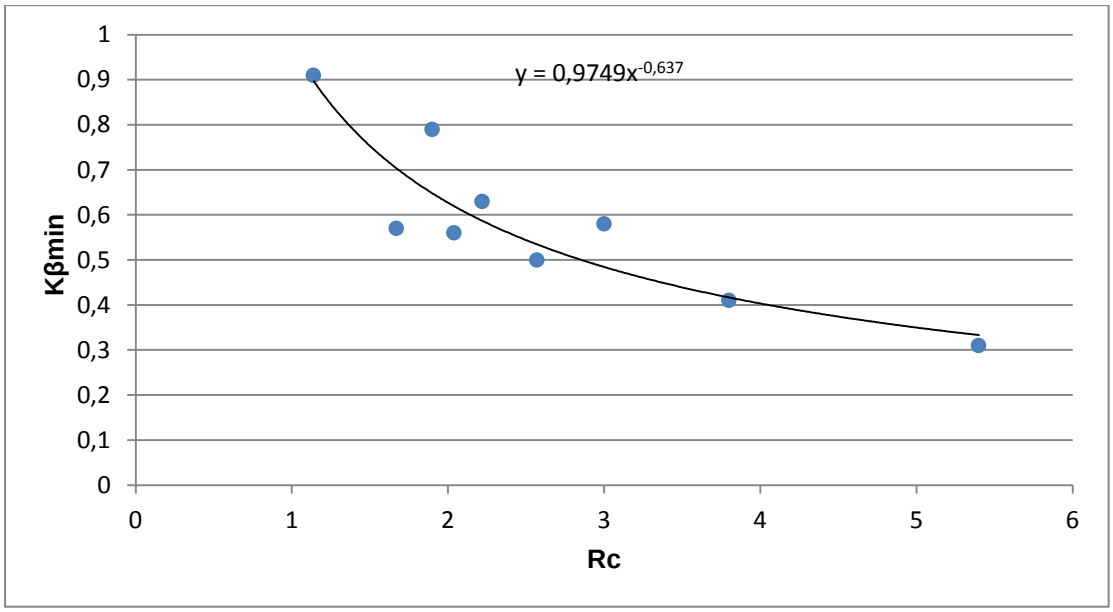
$$\frac{\mathbf{K_{90}}}{\mathbf{Kmin}} = \mathbf{0,464Rc + 0,652}$$



Γράφημα 3 Δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c - λόγος (K_{90}/K_{min})

Θέλοντας να παραχθεί μία εξίσωση η οποία θα καταδεικνύει άμεσα την σχέση που συνδέει τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με την παράμετρο $K_{\beta min}$, δημιουργήθηκε το γράφημα 4 με βάση το οποίο παράχθηκε η σχέση που δίνεται παρακάτω. Από τη σχέση αυτή γίνεται αντιληπτό πως οι δύο παράμετροι είναι αντιστρόφως ανάλογοι, όπως έχει ήδη επισημανθεί. Στην περίπτωση αυτή εάν μελετηθεί ένα απόλυτα ισότροπο πέτρωμα (R_c=1), η παράμετρος K_β ισούται με 0.974 δηλαδή κοντά στη μονάδα.

$$\mathbf{K_{\beta min} = 0,974Rc^{-0,63}}$$



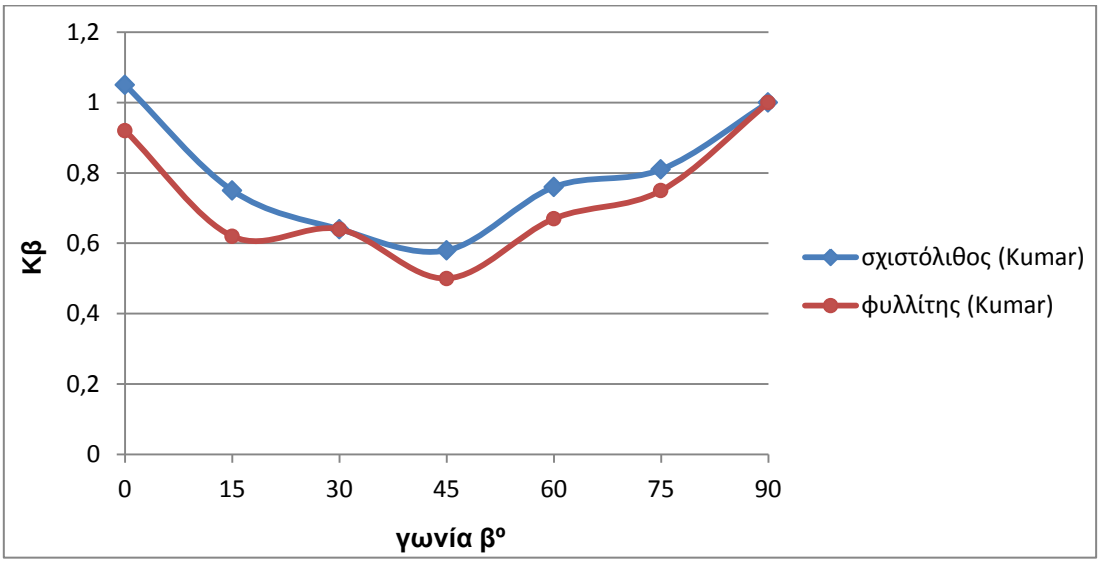
Γράφημα 4 Δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c - παράμετρος $K_{\beta min}$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεων και με γνωστή την τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c ενός πετρώματος, εύκολα μπορεί να υπολογισθεί η παράμετρο $K_{\beta min}$ και επομένως η ελάχιστη αντοχή του πετρώματος.

Αξίζει ακόμη να επισημανθεί το γεγονός πως επειδή η παράμετρος $K_{\beta min}$ είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c, είναι λογικό το συμπέρασμα πως όσο λιγότερο ανισότροπο είναι ένα πέτρωμα, τόσο πιο κοντά στη μονάδα θα είναι η τιμή της παραμέτρου $K_{\beta min}$, και κατ' επέκταση το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown θα πλησιάζει το αρχικό.

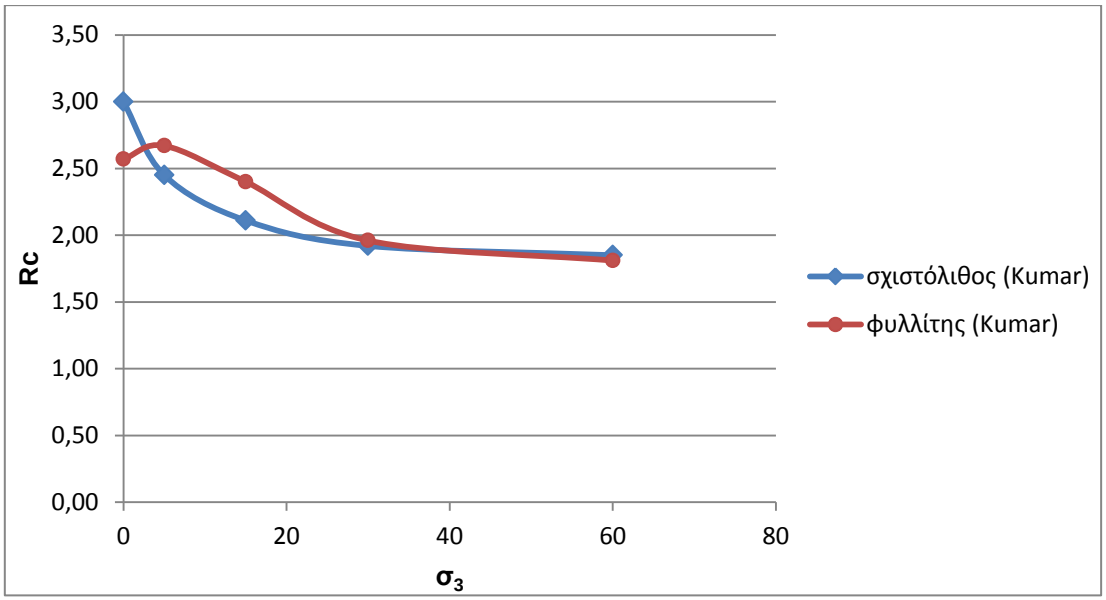
2.4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ K_β ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ β

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμέτρου K_β συναρτήσει της γωνίας β για το πέτρωμα του φυλλίτη και του σχιστόλιθου (Kumar 2006), οπού είναι φανερή η επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας στην τιμή της παραμέτρου K_β. Συγκεκριμένα για φόρτιση υπό γωνία β=30º έως 45º η τιμή της παραμέτρου K_β ελαχιστοποιείται, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς στο συγκεκριμένο εύρος τιμών της γωνίας β συναντάται η χαμηλότερη τιμή της αντοχής. Αντίθετα για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας η παράμετρος αυτή ισούται με τη μονάδα, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Παρατηρείται δηλαδή παρόμοια διακύμανση με το γράφημα 2, όπου η θλιπτική μονοαξονική αντοχή $\sigma_{c\beta}$ των πετρωμάτων ελαχιστοποιείται στη γωνία των 30º, γεγονός που καταδεικνύει την ορθότητα και την σπουδαιότητα της εισαγωγής της παραμέτρου Kβ στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας, αφού προσεγγίζει ικανοποιητικά την φυσική συμπεριφορά ενός «εγγενούς» ανισότροπου πετρώματος.



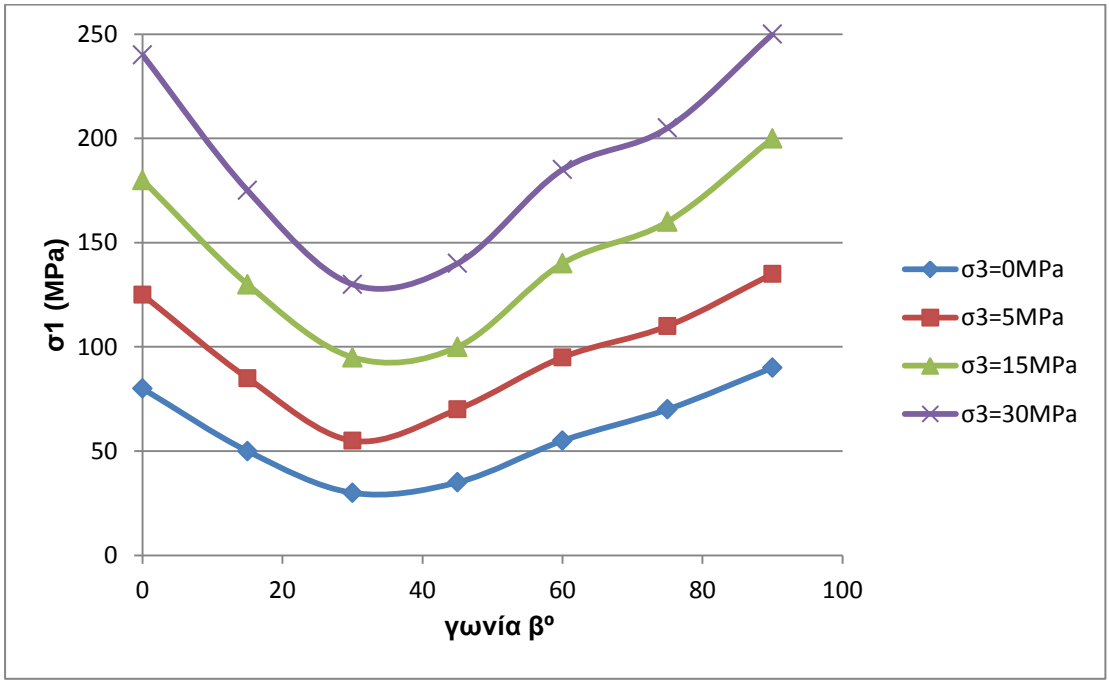
Γράφημα 5 Μεταβολή της παραμέτρου K_β συναρτήσει της γωνίας β

2.4.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΑΝΤΟΧΗ R_c ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_3



Γράφημα 6 Μεταβολή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c συναρτήσει της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3

Στο γράφημα 6 παρουσιάζεται η μείωση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με την αύξηση της πλευρικής κύριας τάσης σ_3. Είναι εμφανές πως η επίδραση της ανισοτροπίας στην αντοχή του πετρώματος κατά την αστοχία είναι μικρότερη όταν συνοδεύεται από μία πλευρική τάση περίσφιγξης, η οποία ενδεχομένως κατά την εκτέλεση των τριαξονικών δοκιμών στο εργαστήριο να μην επιτρέπει την ολίσθηση τμημάτων του πετρώματος κατά το επίπεδο ανισοτροπίας, και άρα να δυσκολεύει την αστοχία του δείγματος. Παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και από το γράφημα 7 όπου παρατηρείται αύξηση της κύριας τάσης αστοχίας (σ_1) καθώς αυξάνει η πλευρική τάση (σ_3). Το γράφημα 7 αναφέρεται στον σχιστόλιθο του Kumar (2006).



Γράφημα 7 Μέγιστη κύρια τάση σ_1 - γωνία β, για διάφορες τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 (σχιστόλιθος Kumar, 2006)

Ο Ramamurthy (1986) αναφέρει ότι όταν η πλευρική πίεση είναι μεγαλύτερη από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας, τότε η ανισοτροπία της αντοχής εξαλείφεται. Άρα, η επίδραση της ανισοτροπίας είναι σημαντική στις εξής περιπτώσεις:

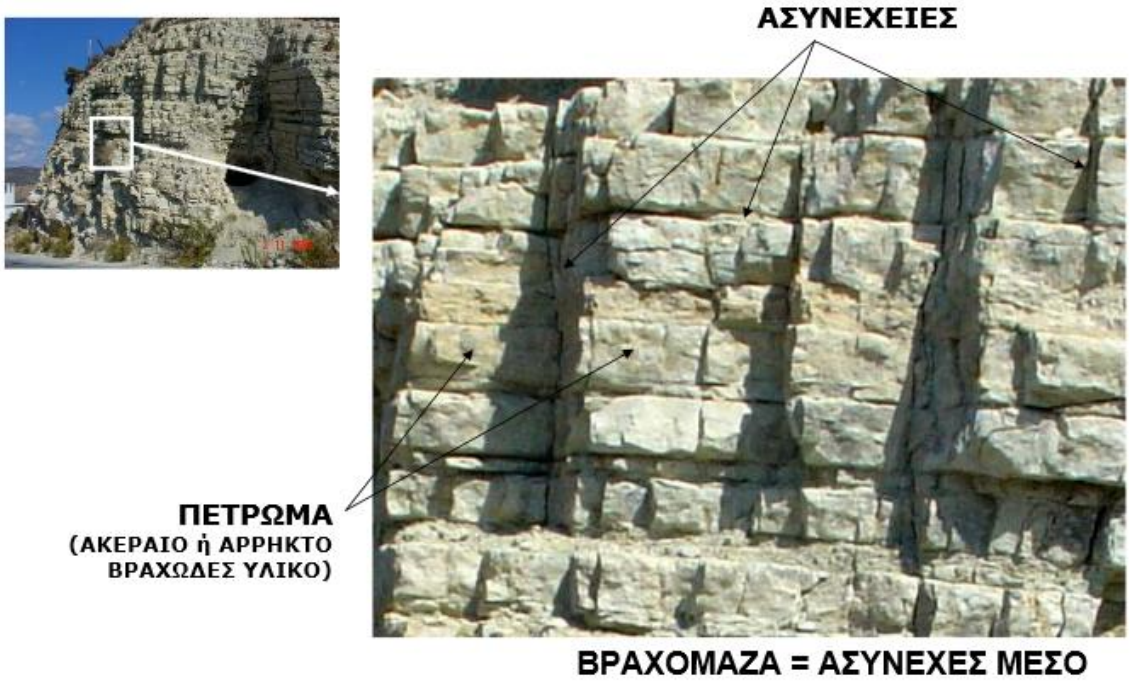
- Στην μονοαξονική φόρτιση
- Σε τριαξονική φόρτιση σε πεδίο μικρής πλευρικής πίεσης σ_3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η βραχόμαζα είναι ένα ασυνεχές στερεό μέσο το οποίο αποτελείται από βραχώδες υλικό που διατέμνεται από γεωλογικές ασυνέχειες και αποτελεί την φυσική κατάσταση ενός πετρώματος, όπως αυτό συναντάται επί τόπου και σε μεγάλη έκταση.

Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας είναι απαραίτητο εργαλείο για το σχεδιασμό κάθε τεχνικού έργου που κατασκευάζεται μέσα (π.χ. σήραγγα) ή πάνω (π.χ. θεμελίωση) σε αυτή. Η εκτίμηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας (κυρίως αντοχή και παραμορφωσιμότητα) αποτελεί ένα αρκετά δύσκολο αντικείμενο, αφού οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά και τη δομή του πετρώματος αλλά και από τη κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι επιφάνειες των ασυνεχειών που τη διατέμνουν. Η κατάσταση γίνεται περισσότερο περίπλοκη και δυσχερής όταν υπάρχει λιθολογική ανομοιογένεια στη σύσταση και δομή της, ποικιλία βαθμού αποσάθρωσης, ανισότροπο εντατικό πεδίο κ.λπ. Αυτό σημαίνει ότι ο γεωλογικός παράγοντας είναι καθοριστικός στη διαμόρφωση του πλαισίου της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας και η δυνατόν καλύτερη γνώση και πρόβλεψη της επίδρασής του αποτελεί τη θεμελιώδη αρχή για μία αξιόπιστη εκτίμηση.

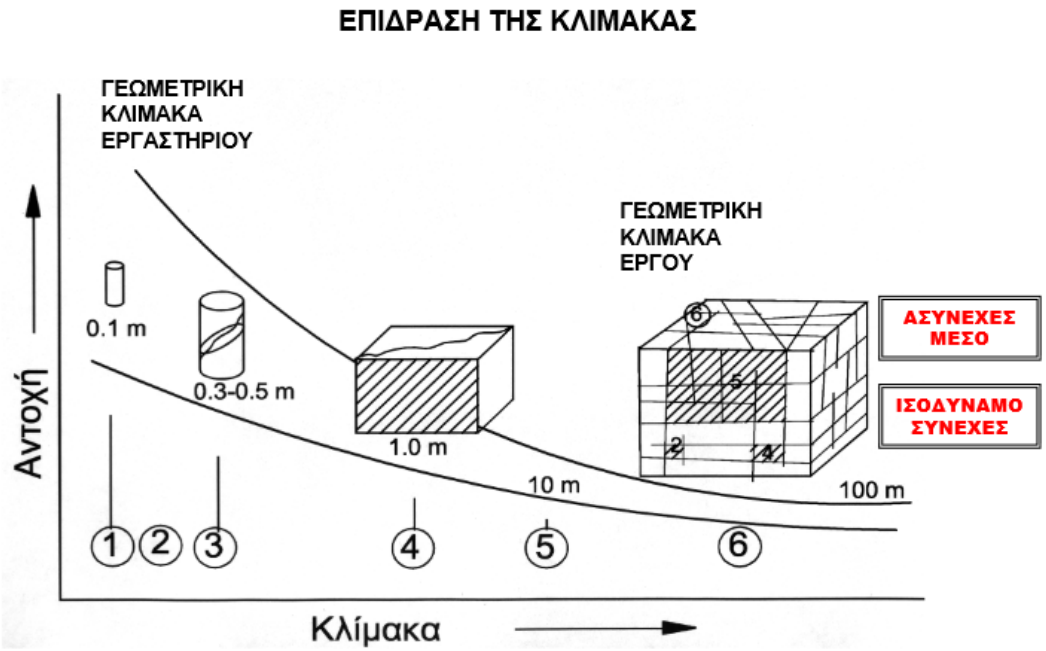


Εικόνα 7 Βραχόμαζα με εμφανείς ασυνέχειες

Ανάλογα με το πλήθος των ασυνεχειών που περιέχονται σε μία βραχόμαζα, εκείνη μπορεί να διακριθεί σε:

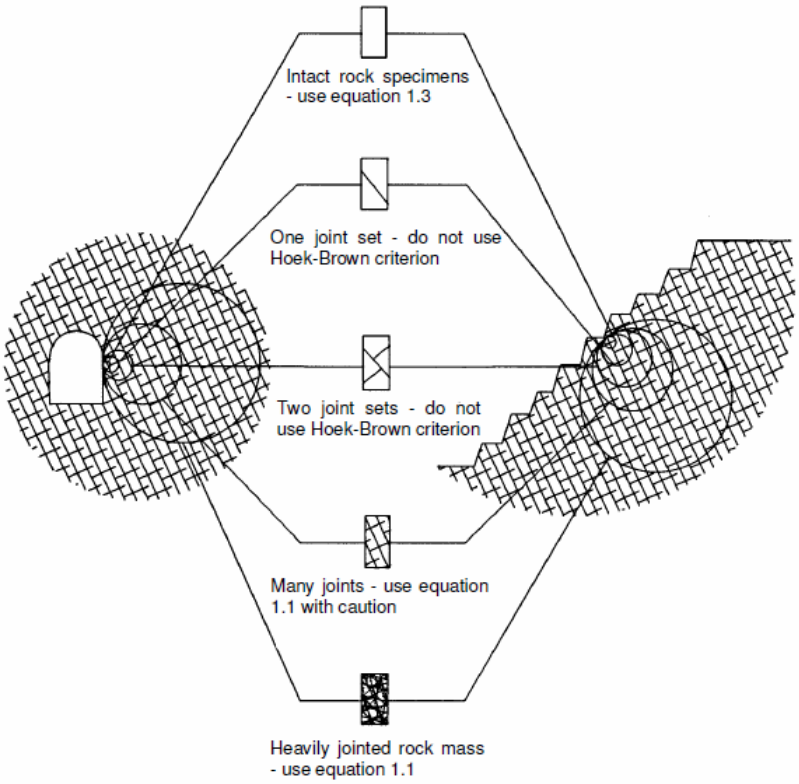
a) κανονικά διακλασμένη βραχόμαζα, όταν ο αριθμός των συστημάτων ασυνεχειών είναι μέχρι τέσσερα οπότε δημιουργούνται πρισματικές δομές του πετρώματος και το υλικό αυτό παρουσιάζει ανισότροπη συμπεριφορά η οποία εξαρτάται από την διεύθυνση φόρτισης
b) έντονα διακλασμένη βραχόμαζα, όταν ο αριθμός των συστημάτων ασυνεχειών είναι πάνω από τέσσερα επομένως είναι δύσκολο να διακριθούν γεωμετρικές δομές και η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ισότροπα.

Η μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος όταν προσδιορίζεται εργαστηριακά είναι προφανές ότι δεν μπορεί να επεκταθεί στη βραχόμαζα, καθόσον οι εκτιμώμενες παράμετροι αναφέρονται σε δείγματα άρρηκτου πετρώματος που προκύπτουν κατά τη διαδικασία προετοιμασίας εργαστηριακών δοκιμίων, τα οποία είναι απαλλαγμένα από ασυνέχειες. Στη φυσική της όμως κατάσταση η βραχόμαζα εμπεριέχει δομικές ασυνέχειες οι οποίες μειώνουν την αντοχή της ανάλογα με την συχνότητα και το βαθμό αποσάθρωσης της επιφάνειας των ασυνεχειών. Οι επιτόπου δοκιμές βραχομηχανικής (φορτίσεις πλάκας, επιτόπου δοκιμές διάτμησης κ.λπ.) θεωρούνται περισσότερο αντιπροσωπευτικές, καθόσον εκτελούνται σε μεγαλύτερου όγκου «δείγματα» που βρίσκονται στη φυσική τους κατάσταση και τα οποία εμπεριέχουν δομικές ασυνέχειες. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερα κομβικό ρόλο στον προσδιορισμό της αντοχής της βραχόμαζας έχει η σύγκριση του μέγεθος της κατασκευής με το μέγεθος των άρρηκτων τεμαχών που δημιουργούνται από τις οικογένειες των ασυνεχειών. Βραχόμαζα που είναι αρκετά διατμημένη και οι επιφάνειες των ασυνεχειών έχουν κοινά χαρακτηριστικά, εμφανίζει ισότροπη συμπεριφορά σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το μέγεθος της κατασκευής είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το μέγεθος των τεμαχών της βραχόμαζας. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown για τον προσδιορισμό της αντοχής της ισότροπης βραχόμαζας. Αντίθετα, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το μέγεθος της κατασκευής είναι συγκρίσιμο με αυτό των άρρηκτων τεμαχών ή όταν στη βραχόμαζα επικρατεί ένα κύριο επίπεδο αδυναμίας, για τον έλεγχο της ευστάθεια της κατασκευής θα πρέπει να ελέγξουμε τυχόν επίπεδη ή περιστροφική ολίσθηση της βραχόμαζας, καθώς πλέον το κριτήριο αστοχίας των Hoek & Brown δεν έχει εφαρμογή. Μία σχηματική απεικόνιση των παραπάνω φαίνονται στην εικόνα 8 που ακολουθεί.



Γράφημα 8 Η επίδραση της κλίμακας στην αντοχή της βραχόμαζας

Είναι αντιληπτό ότι η αντοχή της βραχόμαζας εξαρτάται από την συχνότητα, την εμμονή, τη χωρική διάταξη (διεύθυνση και κλίση) των ασυνεχειών, από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και τις διαστάσεις μιας κατασκευής.



Εικόνα 8 Απεικονίζεται η μετάβαση από το άρρηκτο στο κατακερματισμένο πέτρωμα καθώς αυξάνουν οι διαστάσεις του δείγματος

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Ο σχεδιασμός ενός τεχνικού έργου σε βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς προϋποθέτει τη διερεύνηση όλων των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν άμεσα τη μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η ακριβής γνώση των παραγόντων αυτών και το εύρος της πιθανής διακύμανσής τους, μπορεί να καθορίσει το πλαίσιο της αναμενόμενης μηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας και επομένως να οριοθετήσει τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του τεχνικού έργου.

Προς την κατεύθυνση αυτή έχει διαπιστωθεί ότι μια συστηματική ταξινόμηση της βραχόμαζας μπορεί να δώσει μια αρκετά ικανοποιητική πληροφόρηση. Η βασική απαίτηση για την ταξινόμηση αυτή είναι η αναγκαιότητα ανάπτυξης των κατάλληλων κριτηρίων ώστε να επιτυγχάνεται η συστηματική κατάταξη της βραχόμαζας σε συγκεκριμένες κατηγορίες και ομάδες, που κάθε μία να έχει παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, οπότε και να απαιτεί κοινή αντιμετώπιση (π.χ. αντιστήριξη). Σήμερα, οι ταξινομήσεις της βραχόμαζας αποτελούν τη βάση του εμπειρικού σχεδιασμού και η εφαρμογή τους είναι πολύ σημαντική στο σχεδιασμό τεχνικών έργων σε βραχώδους σχηματισμούς. Ακολουθεί αναφορά στις κυριότερες εξ αυτών μεθόδους.

3.2.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ RQD

Η ταξινόμηση των DEERE et al (1967), εισήγαγε το Δείκτη Ποιότητας Πετρώματος (RQD), που αποτελεί μια απλή και πρακτική μέθοδο περιγραφής της ποιότητας του πετρώματος από τα δείγματα μιας δειγματοληπτικής γεώτρησης. Η αξιολόγηση της βραχόμαζας βασίζεται στην εκτίμηση του κερματισμού που έχει υποστεί, βάσει τον πυρήνων που ελήφθησαν. Ως δείκτης RQD ορίζεται το ποσοστό των τεμαχών άνω των 10cm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

$$\mathrm{RQD} = \frac{\Sigma(\mathrm{li} > 10cm)}{\mathrm{l}} * 100\%$$

Όπου li το μήκος τεμαχών που είναι >10cm και l το ολικό μήκος του πυρήνα.

Η επί τόπου ταξινόμηση της βραχόμαζας με βάση το RQD φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6 Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση τον δείκτη RQD

RQD (%)	Ποιότητα Βραχόμαζας
0-25	Πολύ Πτωχή
25-50	Πτωχή
50-75	Μέτρια
75-90	Καλή
90-100	Εξαιρετική

Ο δείκτης RQD χρησιμοποιείται ευρέος για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας, παρά τα μειονεκτήματα που εμφανίζει. Αρχικά θεωρείται ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων, αφού π.χ. ένας πυρήνας μήκους 10.1 cm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10%, ενώ αντίθετα ένας πυρήνας 9.9 cm δεν προκαλεί αύξηση. Ακόμη, ο δείκτης εξαρτάται και από τον προσανατολισμό της

γεώτρησης ως προς τα επίπεδα των ασυνεχειών της βραχόμαζας. Έτσι η τιμή του αναμένεται μεγαλύτερη όταν η γεώτρηση έχει άξονα παράλληλο με τα επίπεδα ασυνεχειών και μικρότερη όταν ο άξονας είναι κάθετος.

3.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ Q

Αναπτύχθηκε το 1974 από τους Barton, Lien και Lunde στο Νορβηγικό Γεωλογικό Ινστιτούτο με βάση την εμπειρία από την κατασκευή σημαντικού αριθμού υπόγειων τεχνικών έργων στην Σκανδιναβία. Αποσκοπούσε στον προσδιορισμό τόσο των χαρακτηριστικών της βραχόμαζας, όσο και των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με συμβατικές μεθόδους. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται βάσει ενός δείκτη Q ο οποίος εξαρτάται από τις ακόλουθες έξι παραμέτρους: τον δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD), το πλήθος των συστημάτων ασυνεχειών, την τραχύτητα των ασυνεχειών, τον βαθμό αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών, την επιρροή υπόγειου νερού και το υφιστάμενο εντατικό πεδίο. Η αριθμητική τιμή του δείκτη Q μεταβάλετε σε λογαριθμική κλίμακα από την ελάχιστη τιμή 0,001 έως την μέγιστη 1000 και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{Q} = \frac{\mathrm{RQD}}{\mathrm{Jn}} * \frac{\mathrm{Jr}}{\mathrm{Ja}} * \frac{\mathrm{Jw}}{\mathrm{SRF}}$$

Όπου:

RQD : ο δείκτης ποιότητας της βραχόμαζας

Jn : ο δείκτης του πλήθους των συστημάτων ασυνεχειών

Jr : ο δείκτης της τραχύτητας των ασυνεχειών

Ja : ο δείκτης του βαθμού αποσάθρωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

Jw : ο συντελεστής απομείωσης λόγω ύπαρξης νερού στις ασυνέχειες

SRF : ο συντελεστής απομείωσης λόγω των επιτόπου τάσεων

Στην παραπάνω σχέση ο πρώτος λόγος $\frac{RQD}{Jn}$ αντιπροσωπεύει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συγκροτούν τη βραχόμαζα, ο δεύτερος λόγος $\frac{Jr}{Ja}$ εκφράζει το αλληλοκλείδωμα των τεμαχών αυτών μέσω της διατμητικής αντοχής των διεπιφανειών των ασυνεχειών, ενώ ο λόγος $\frac{Jw}{SRF}$ εκφράζει το υφιστάμενο εντατικό πεδίο.

Με βάση λοιπόν τον δείκτη Q, η βραχόμαζα κατατάσσεται αντίστοιχα από εξαιρετικά πτωχή βραχόμαζα έως εξαιρετικά καλής ποιότητας βραχόμαζα όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7 Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση τον δείκτη Q

Δείκτης Q	Χαρακτηρισμός
>400	Εξαιρετικά Καλή
100 – 400	Πάρα Πολύ Καλή
40 – 100	Πολύ Καλή
10 – 40	Καλή
4 – 10	Μέτρια
1 – 4	Πτωχή
0.1 – 1	Πολύ Πτωχή
0.01 - 0.1	Πάρα Πολύ Πτωχή
<0.01	Εξαιρετικά Πτωχή

3.2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ RMR

Ονομάζεται «Γεωμηχανική Ταξινόμηση» ή σύστημα RMR (Rock Mass Rating) και αναπτύχθηκε από τον Bieniawski το 1973, τροποποιήθηκε μερικώς και βελτιώθηκε από τον ίδιο το 1979 ενώ πήρε την τελική του μορφή το έτος 1989. Το σύστημα ταξινόμησης RMR έχει μεγάλη εφαρμογή σε διάφορα τεχνικά έργα, κυρίως σε σήραγγες, αλλά και σε πρανή, θεμελιώσεις καθώς και μεταλλεία. Ο δείκτης RMR προσδιορίζεται ως το άθροισμα έξι επί μέρους δεικτών, οι οποίοι αντιστοιχούν στις εξής παραμέτρους:

- Αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})
- Δείκτη ποιότητας πετρώματος (RQD)
- Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- Κατάσταση των επιφανειών ασυνέχειας
- Παρουσία υπόγειων υδάτων
- Προσανατολισμός των ασυνεχειών ως προς την φορά διάνοιξης

Με βάση την τιμή του δείκτη RMR η βραχόμαζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 8 Ταξινόμηση βραχόμαζας με βάση τον δείκτη RMR

Δείκτης RMR	Κατηγορία-Χαρακτηρισμός Βραχόμαζας
81-100	I – Πολύ καλή
61-80	II – Καλή
41-60	III – Μέτρια
21-40	IV – Πτωχή
<20	V – Πολύ πτωχή

Η ταξινόμηση της βραχόμαζας σε μια συγκεκριμένη κατηγορία με βάση την τελική βαθμολογία της (RMR) έχει σαν αποτέλεσμα την οριοθέτηση της μηχανικής συμπεριφοράς της καθώς επίσης και την εκτίμηση των απαιτήσεων υποστήριξής της που γίνεται με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων αλλά και συγκεκριμένων οδηγιών.

3.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ GSI

Η αντοχή της βραχόμαζας εξαρτάται από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος καθώς επίσης και από την δυνατότητα που έχουν τα βραχώδη τεμάχη να ολισθαίνουν μεταξύ τους για διάφορες συνθήκες φόρτισης. Η δυνατότητα αυτή εξαρτάται από το γεωμετρικό σχήμα των τεμαχών και από την ποιότητα της επιφάνειας των ασυνεχειών. Για παράδειγμα, γωνιώδη τεμάχη με σκληρή επιφάνεια ασυνεχειών θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με μία βραχόμαζα στην οποία τα τεμάχη χαρακτηρίζονται ως στρογγυλεμένα και αποσαρθρωμένα.

Ο γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI) αρχικά προτάθηκε από τον Hoek (1994), βελτιώθηκε περαιτέρω κατά τα επόμενα έτη από τους Hoek, Kaiser, Bawden, Brown, Μαρίνο και Μπενίση, έως την τελική του μορφή το 2000 από τους Ε. Hoek και Π. Μαρίνο (Hoek & Marinos, 2000). Αποτελεί ένα σύστημα ταξινόμησης για την εκτίμηση της απομείωσης της αντοχής της βραχόμαζας για διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες. Τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας εκτιμώνται με βάση τη δομή του πετρώματος (αλληλοκλείδωμα τεμαχών) και την κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών (τραχύτητα και αποσάθρωση των τοιχωμάτων) που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής τους αντοχής. Ο συνδυασμός αυτών των δύο παραμέτρων μας οδηγεί στην εκτίμηση του τύπου της βραχόμαζας και στον υπολογισμό της τιμής του GSI με βάση τον πίνακα 9 (Hoek & Marinos 2000) για ομοιογενή πετρώματα και τον πίνακα 10 (Hoek & Karzulovic (2000), από Truzman (1999)) που αναφέρεται σε μεταμορφωμένα σχιστώδη πετρώματα.

Το εύρος τιμών του γεωλογικού δείκτη αντοχής κυμαίνεται από 5, για εξαιρετικά πτωχής ποιότητας, έως 100 για το άρρηκτο πέτρωμα. Ο προσδιορισμός της τιμής του γεωλογικού δείκτη αντοχής βασίζεται σε παρατηρήσεις υπαίθρου, όπου σε περιπτώσεις κατά τις οποίες γίνεται χρήση εκρηκτικών κατά την εκσκαφή ενός πρανούς θεωρείται ορθότερη η εκτίμηση της τιμής του γεωλογικού δείκτη αντοχής στο αδιατάρακτο πέτρωμα. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί το πρανές στην εικόνα 9 όπου το αριστερό τμήμα του προέκυψε μετά από ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών ενώ το δεξιά έπειτα από μη ελεγχόμενη έκρηξη. Στην εικόνα αυτή είναι εμφανής η διαφορά στην εξωτερική δομή της βραχόμαζας, που θα οδηγήσει σε διαφορετικές τιμές του GSI για κάθε περίπτωση

Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχόμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των τεμαχών, δηλαδή σε βραχόμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού. Το διάγραμμα GSI δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η συμπεριφορά της βραχόμαζας ελέγχεται από διακριτές ασυνέχειες οι οποίες οδηγούν σε δομικές – βαρυτικές αστοχίες, όπως είναι οι επίπεδες ολισθήσεις, οι ολισθήσεις σφηνών κ.λπ. Ακόμη σε περιπτώσεις παρουσίας νερού ενδείκνυται η μετατόπιση προς τα δεξιά για κατηγορίες πτωχών και πολύ πτωχών πετρωμάτων. Τέλος, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η απόσταση των ασυνεχειών είναι μεγάλη σε σχέση με τις διαστάσεις ενός έργου (π.χ. σήραγγα) τότε σύμφωνα και με την εικόνα 8 το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown, καθώς και ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται. Αντίθετα η χρήση τους ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου η απόσταση των ασυνεχειών είναι μικρή εν συγκρίσει με την κατασκευή.

Πίνακας 9 Πίνακας GSI για ομοιογενή πετρώματα Hoek & Marinos (2000)

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI)

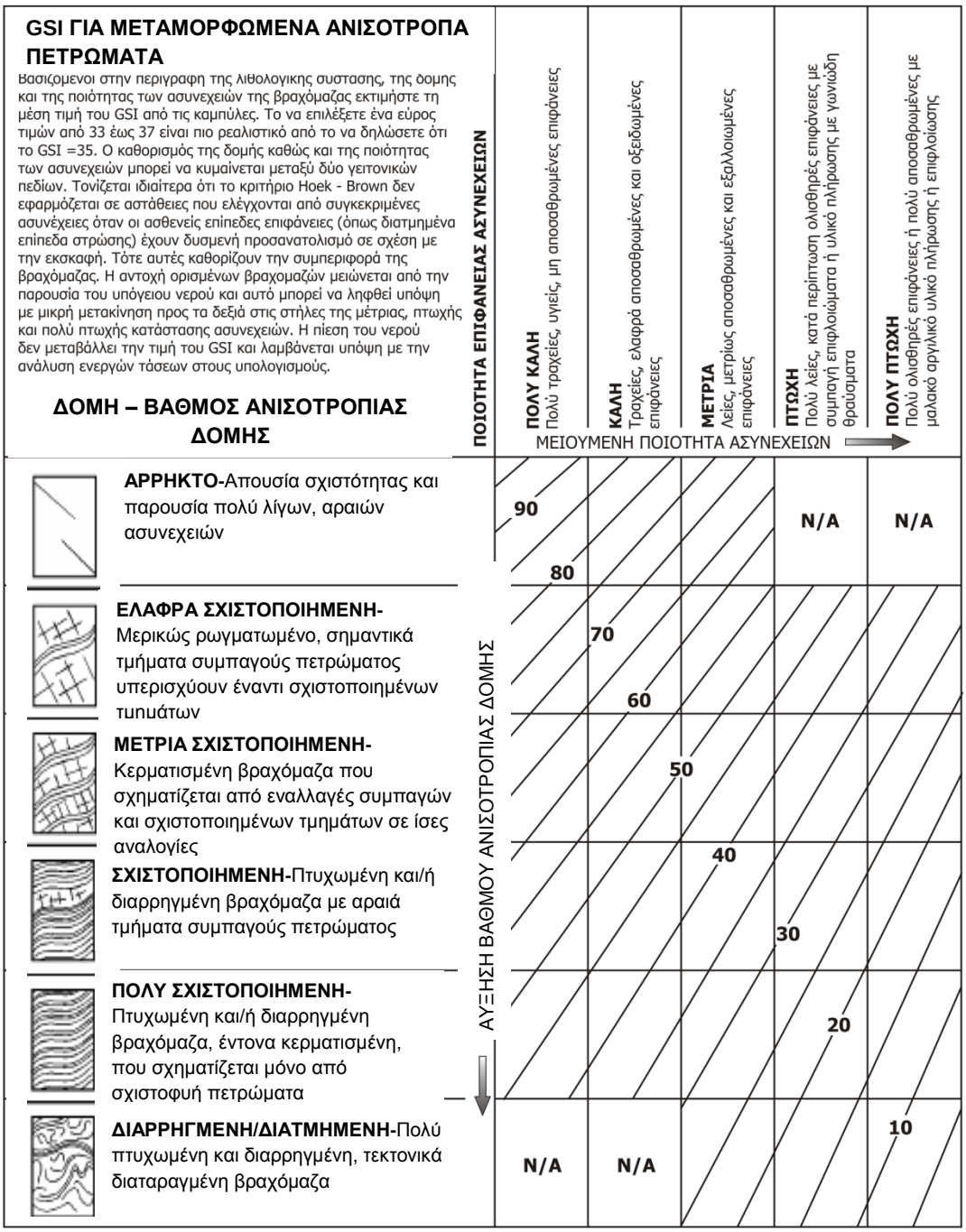
(Ε. Hoek, Π. Μαρίνος, 2000)

Βασιζόμενοι στην περιγραφή της λιθολογικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχειών της βραχόμαζας εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI από τις καμπύλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI =35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχειών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθειες που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατμημένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η αντοχή ορισμένων βραχομαζών μειώνεται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτριας, πτωχής και πολύ πτωχής κατάστασης ασυνεχειών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.

ΔΟΜΗ / ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	**ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ** Πολύ τραχείες, υγιείς, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες	**ΚΑΛΗ** Τραχείες, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	**ΜΕΤΡΙΑ** Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	**ΠΤΩΧΗ** Πολύ λείες, κατά περίπτωση ολισθηρές επιφάνειες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα	**ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ** Πολύ ολισθηρές επιφάνειες ή πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης ή επιφλοίωσης
ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →					
ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχη ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90 / 80			N/A	N/A
ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ/ ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχη οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών		70			
ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχη (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60	50		
ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχη που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας			40	30	
ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιώδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχών				20	
ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιώδων τεμαχών (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδιο δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	N/A	N/A			10

ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ ↓

Πίνακας 10 Πίνακας GSI για μεταμορφωμένα σχιστώδη πετρώματα Hoek& Karzulovic (2000), κατά Truzman (1999)



Στην παρούσα εργασία, οι κατηγορίες δομής που εξετάζονται είναι μεταξύ ελαφράς σχιστοποιημένης και πολύ σχιστοποιημένης και η αντιστοιχία δομής με τον βαθμό ανισοτροπίας δομής είναι η ακόλουθη:

- ✓ Ελαφρά Σχιστοποιημένη – Μικρός Βαθμός Ανισοτροπίας Δομής
- ✓ Μέτρια Σχιστοποιημένη – Μέτριος Βαθμός Ανισοτροπίας Δομής
- ✓ Σχιστοποιημένη – Μεγάλος Βαθμός Ανισοτροπίας Δομής
- ✓ Πολύ Σχιστοποιημένη – Πολύ Μεγάλος Βαθμός Ανισοτροπίας Δομής

Εικόνα 9 Σύγκριση της εξωτερικής δομής γνεύσιου, όπου το αριστερό τμήμα του πρανούς προέκυψε μετά από ελεγχόμενη χρήση εκρηκτικών ενώ το δεξιά έπειτα από μη ελεγχόμενη έκρηξη

3.3 Η ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΣΤΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η «εγγενής» ανισοτροπία της βραχόμαζας οφείλεται στη διαδικασία γένεσης του πετρώματος. Συγκεκριμένα, στα ιζηματογενή πετρώματα η κύρια αιτία είναι η δημιουργία διαδοχικών στρώσεων κατά την ιζηματογένεση, ενώ στα μεταμορφωμένα η παρουσία της οφείλεται στη σχιστότητα, η οποία δημιουργείται λόγω των πιέσεων που ασκούνται από τους υπερκείμενους εδαφικούς σχηματισμούς και της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται.

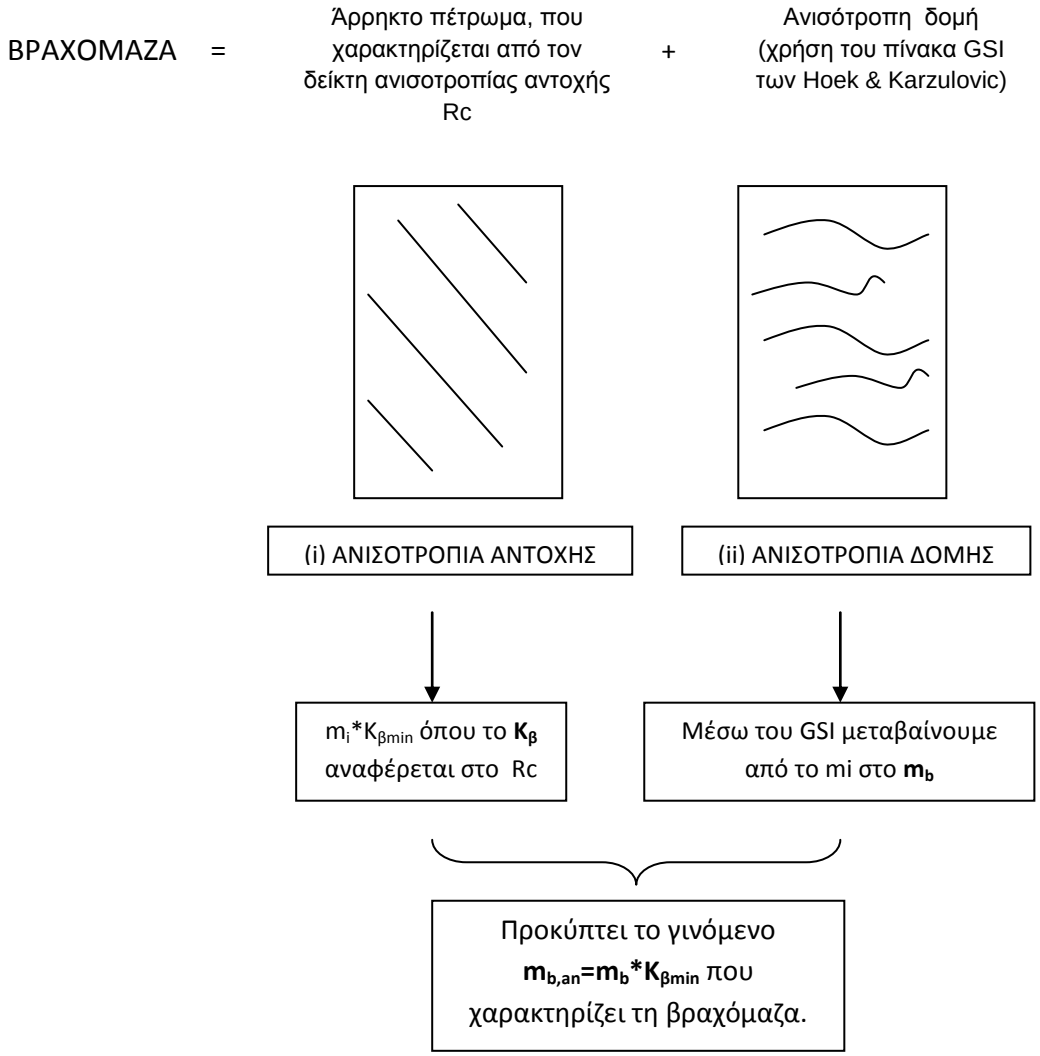
Η ανισοτροπία της βραχόμαζας μπορεί απλοποιητικά να διακριθεί σε:

i. ανισοτροπία αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, η οποία οφείλεται στην μεταβολή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του πετρώματος ($\sigma_{c\beta}$) κατά τη φόρτιση σε διάφορες γωνίες β ως προς το επίπεδο ανισοτροπίας. Η ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος εκφράζεται μέσω του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής (R_c).

ii. ανισοτροπία δομής, η οποία οφείλεται στις διάφορες δομές βραχόμαζας που δημιουργούν τα επίπεδα ανισοτροπίας λόγω της κατάστασης των επιφανειών τους (τραχύτητα, βαθμός αποσάθρωσης). Εκφράζεται μέσω του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI καθώς η τιμή του περιγράφει με ικανοποιητικό τρόπο την κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι επιφάνειες ανισοτροπίας.

Τα παραπάνω φαίνονται και στην εικόνα 10 που ακολουθεί, όπου για την περίπτωση (i) γίνεται αναφορά στο άρρηκτο πέτρωμα στο οποίο η ανισοτροπία της αντοχής σχετίζεται με τη γωνία φόρτισης β που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας

τάσης σ_1 με το επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας. Τον συγκεκριμένο «τύπο» ανισοτροπίας (της αντοχής) τον χαρακτηρίζει ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c, καθώς ισούται με τον λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος. Μέσω του δείκτη αυτού μπορεί να υπολογισθεί η αναμενόμενη τιμή της παραμέτρου $K_{\beta min}$ (που αντιστοιχεί σε γωνία β ίση με 30º έως 45º και χρησιμοποιείται στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown) εισάγοντας έτσι την ανισοτροπία αντοχής του άρρηκτου πετρώματος μέσω του δείκτη $m_{b,an} = m_i{*}K_{\beta min}$. Στη συνέχεια και για την περίπτωση (ii), όπου πλέον η ανισοτροπία σχετίζεται με την δομή στην οποία βρίσκεται το πέτρωμα, με τη βοήθεια του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI υπολογίζεται η τιμή της σταθερά m_b, προκειμένου να εισαχθεί η ανισοτροπία της δομής στη βραχόμαζα.



Εικόνα 10 Θεώρηση ανισοτροπίας αντοχής και δομής σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα

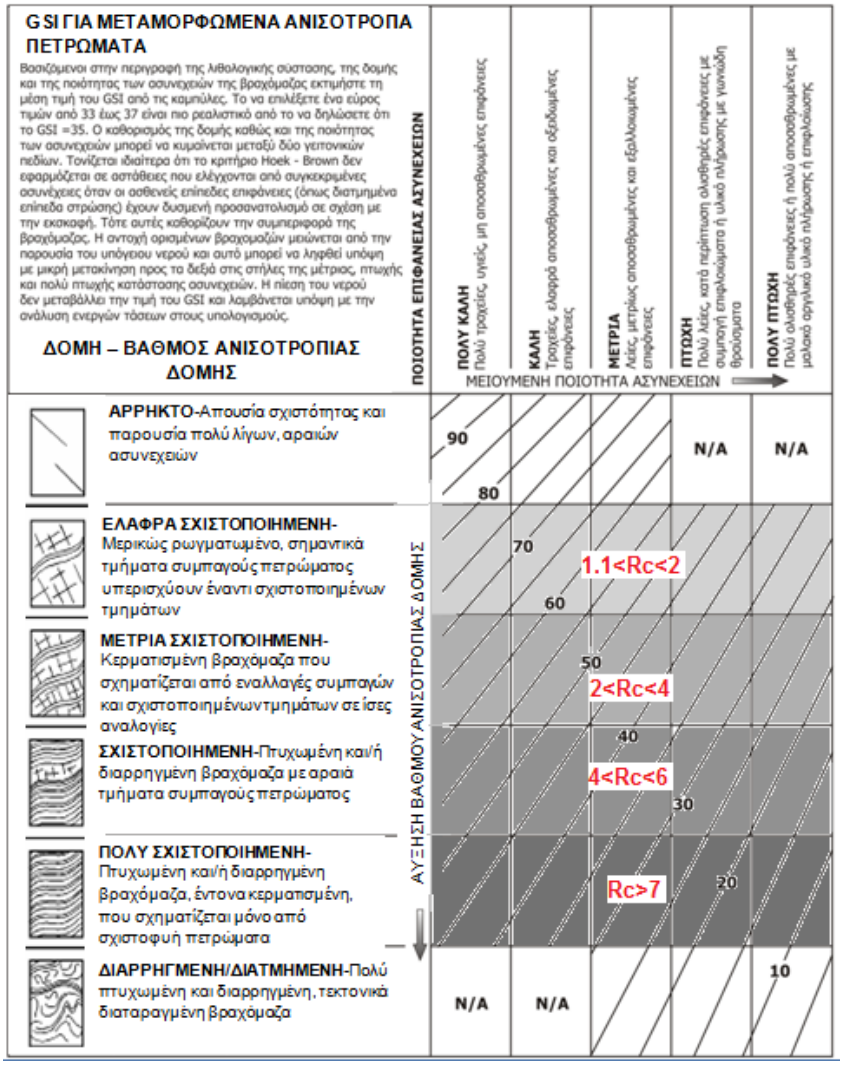
Με βάση τον πίνακα 10 για τα μεταμορφωμένα σχιστώδη πετρώματα έγινε προσπάθεια συσχέτισης της ανισοτροπίας αντοχής του άρρηκτου πετρώματος με την ανισοτροπία δομής της βραχόμαζας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις της παραπάνω συσχέτισης.

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ Α

Θεωρήθηκε ως αρχική προσέγγιση η αντιστοίχηση των διαφόρων εύρων τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με συγκεκριμένες δομές της βραχόμαζας (σειρές του πίνακα 10). Για παράδειγμα, θεωρήθηκε πως χαμηλή ανισοτροπία ($1.1<R_c<2$) μπορεί να συναντηθεί σε βραχόμαζα που χαρακτηρίζεται από μικρό βαθμό ανισοτροπίας δομής και για οποιαδήποτε κατάσταση των επιφανειών ανισοτροπίας, επομένως για όλο το εύρος τιμών του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη δομή ($30<GSI<80$). Τα παραπάνω φαίνονται στον πίνακα 10 και 11 καθώς και στην εικόνα 11.

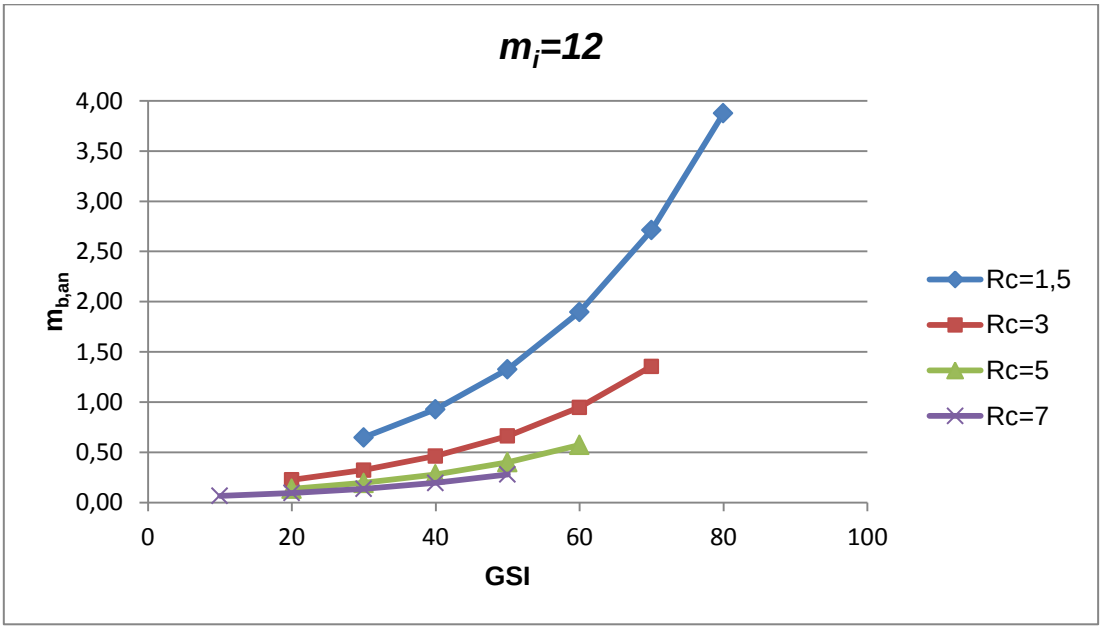
Πίνακας 11 Αντιστοίχηση τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής με συγκεκριμένη δομή βραχόμαζας

Εύρος R_c	Βαθμός Ανισοτροπίας Δομής	Εύρος GSI
$1.1<R_c<2$	Μικρός	30-80
$2<R_c<4$	Μέτριος	20-70
$4<R_c<6$	Υψηλός	20-60
$R_c>7$	Πολύ υψηλός	10-50

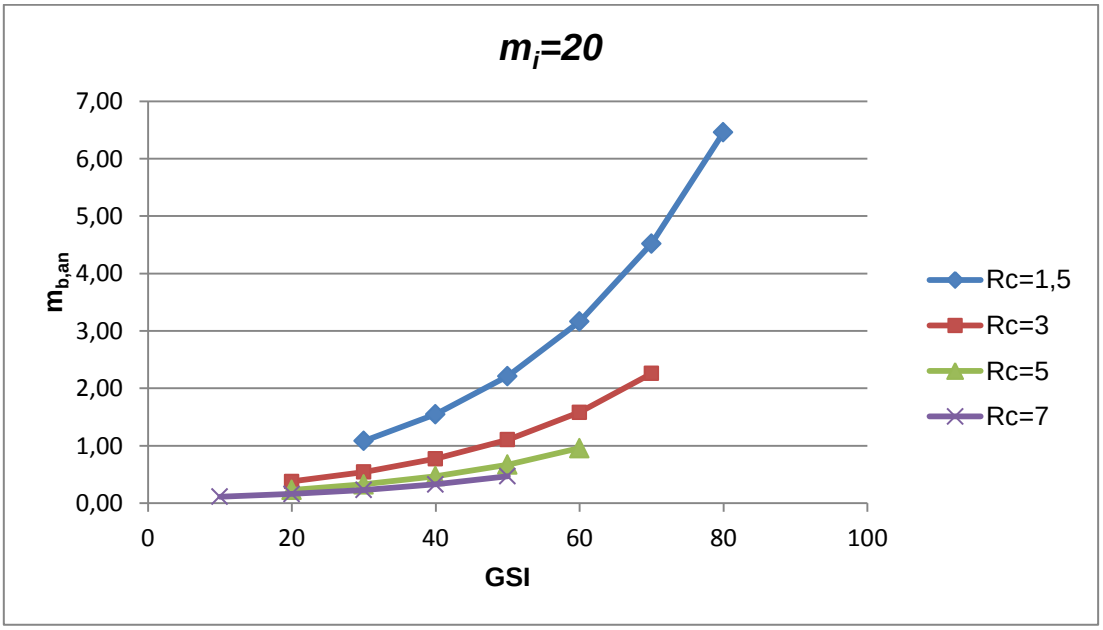


Εικόνα 11 Αντιστοίχηση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με δομές της βραχόμαζας-Προσέγγιση Α

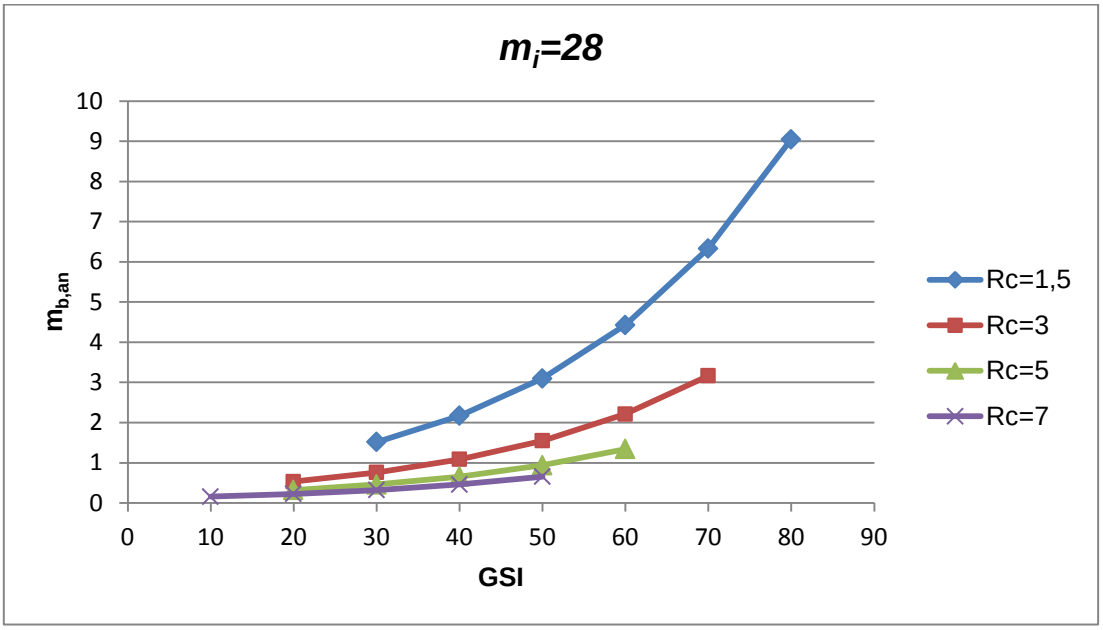
Για κάθε ένα από τα παραπάνω εύρη τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c θεωρήθηκε μια μέση τιμή που αντιπροσωπεύει τη συγκεκριμένη δομή. Έτσι επιλέχθηκαν οι τιμές 1.5, 3, 5 και 7 του δείκτη R_c. Μελετώντας τρία πετρώματα με σταθερά m_i=10 (σχιστόλιθος), m_i=28 (γνεύσιος) και m_i=20 δημιουργήθηκαν τα παρακάτω γραφήματα (9, 10, 11) με βάση τα οποία εύκολα μπορεί κάποιος να υπολογίσει το γινόμενο $m_{b,an} = K_\beta * m_b$ που χαρακτηρίζει τη βραχόμαζα.



Γράφημα 9 $m_{b,an}$ - GSI, για σταθερά m_i=12 και διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c



Γράφημα 10 $m_{b,an}$ - GSI, για σταθερά m_i=20 και διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c



Γράφημα 11 $m_{b,an}$ - GSI, για σταθερά m_i=28 και διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ Β

Σε ένα πέτρωμα στο οποίο έχει προσδιοριστεί πειραματικά η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας (σ_{c90}), αναμένονται τα εξής:

a) σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η ποιότητα των επιφανειών ανισοτροπίας μειώνεται, αναμένεται πτώση της τιμής της ελάχιστης μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta min}$. Αυτό συμβαίνει καθώς τα τεμάχη που δημιουργούνται από τα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας τείνουν να μετακινηθούν πιο εύκολα, δηλαδή σε μικρότερη κύρια τάση σ_1, με αποτέλεσμα η τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c να αυξάνεται.

b) καθώς η δομή του πετρώματος χειροτερεύει (από μικρό προς πολύ υψηλό βαθμό ανισοτροπίας δομής) η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta min}$ θα μειωθεί, με αντίστοιχη αύξηση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c.

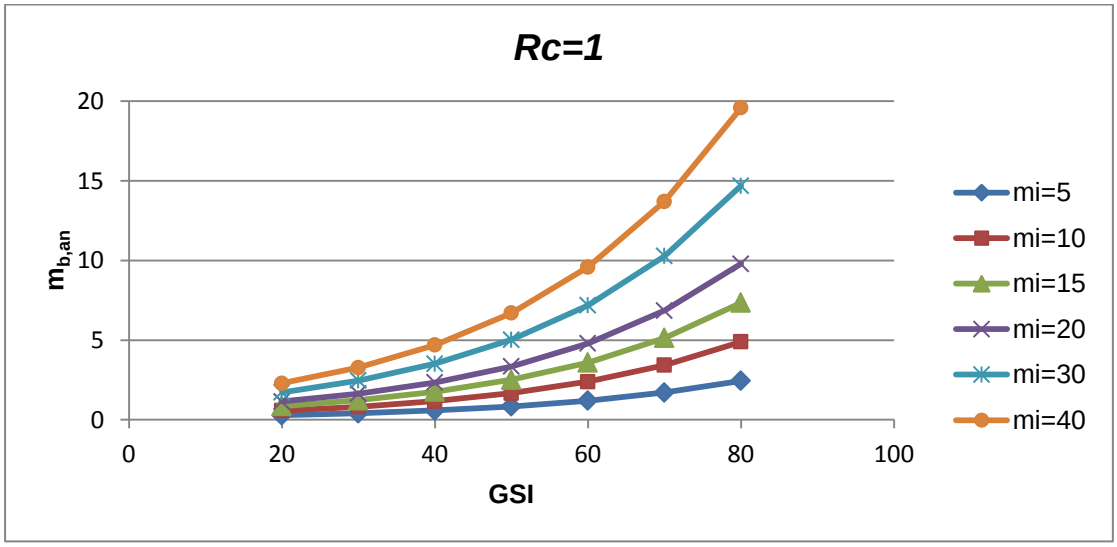
Με βάση τις παρατηρήσεις (a), (b) καταλήξαμε στον πίνακα 12 όπου για κάθε εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c θεωρήθηκαν δύο δομές της βραχόμαζας όπου είναι το πλέον πιθανό να συναντηθεί το συγκεκριμένο εύρος τιμών, καθώς και μία τρίτη δομή που συγκεντρώνει λιγότερες πιθανότητες. Επομένως έγινε η θεώρηση πως η επιρροή της ανισοτροπίας δεν μένει σταθερή καθώς κινούμαστε προς τα δεξιά στον πίνακα GSI, σε αντίθεση με την προσέγγιση Α, διότι η ποιότητα των επιφανειών ανισοτροπίας μειώνεται με αποτέλεσμα την αύξηση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c.

Πίνακας 12 Αντιστοίχηση τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής με πιθανές δομές βραχόμαζας

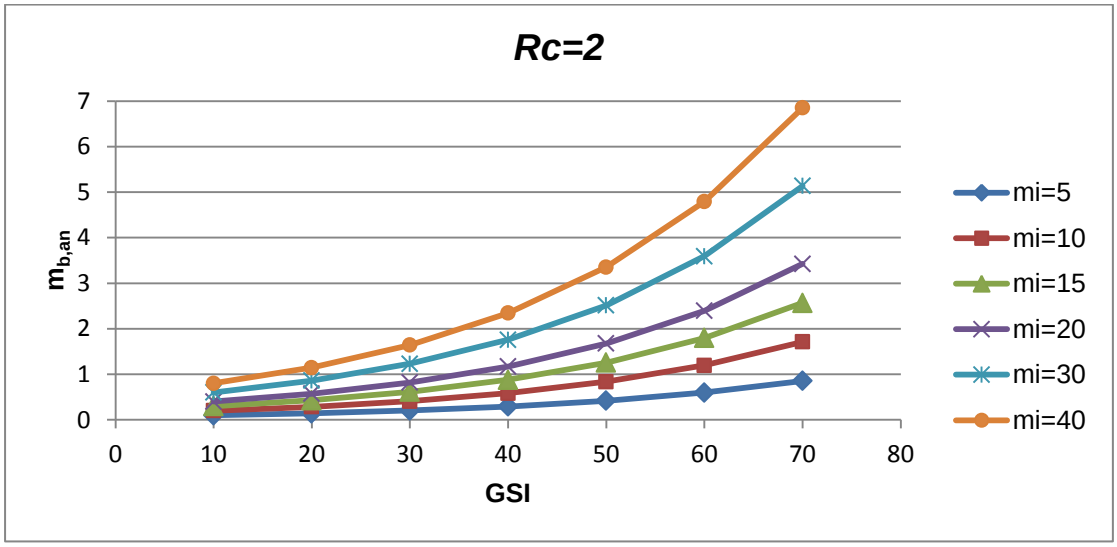
Δομή / Ανισοτροπία αντοχής	Μικρή φύλλωση GSI: 30-80	Μέτρια φύλλωση GSI: 20-70	Υψηλή φύλλωση GSI: 20-60	Πολύ υψηλή φύλλωση GSI: 10-50
1.1<Rc≤2	X	X	ίσως	
2<Rc≤4		X	X	ίσως
4<Rc≤6		ίσως	X	X
Rc>6		ίσως	X	X

Εργαστήκαμε όπως περιγράφεται στη συνέχεια προκειμένου να δημιουργήσουμε τα γραφήματα 12 έως 16.

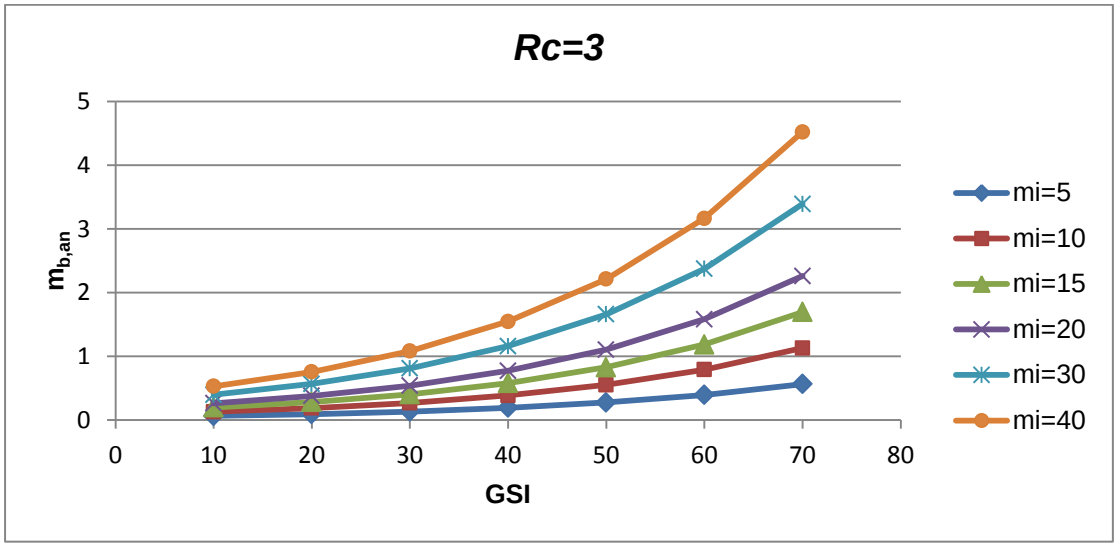
- ✓ Για κάθε ένα από τα παραπάνω εύρη τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής επιλέχθηκαν κάποιες αντιπροσωπευτικές τιμές. Συγκεκριμένα R_c=1 για την περίπτωση του ισότροπου πετρώματος και R_c = 2, 3, 5 και 7.
- ✓ Στη συνέχεια, για κάθε μία από τις παραπάνω τιμές επιλέχθηκαν οι αντίστοιχες πιθανές δομές της βραχόμαζας και τα αντίστοιχα εύρη τιμών του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI, σύμφωνα με τον πίνακα 10.
- ✓ Με τη βοήθεια της σχέσης $K_{\beta min} = \frac{1}{Rc}$ υπολογίσθηκε η τιμή της παραμέτρου $K_{\beta min}$ για κάθε περίπτωση.
- ✓ Επιλέχθηκαν διάφορες τιμές της σταθεράς m_i, προκειμένου να καλυφθεί ένα σημαντικό εύρος πετρωμάτων (m_i =5,10,15,20,30,40)
- ✓ Μέσω της γνωστής σχέσης υπολογίσθηκαν τα αντίστοιχα m_b.
- ✓ Τέλος, υπολογίσθηκε η τιμή της σταθερά $m_{b,an}$ = $K_{\beta min}$*m_b για κάθε περίπτωση και δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα.



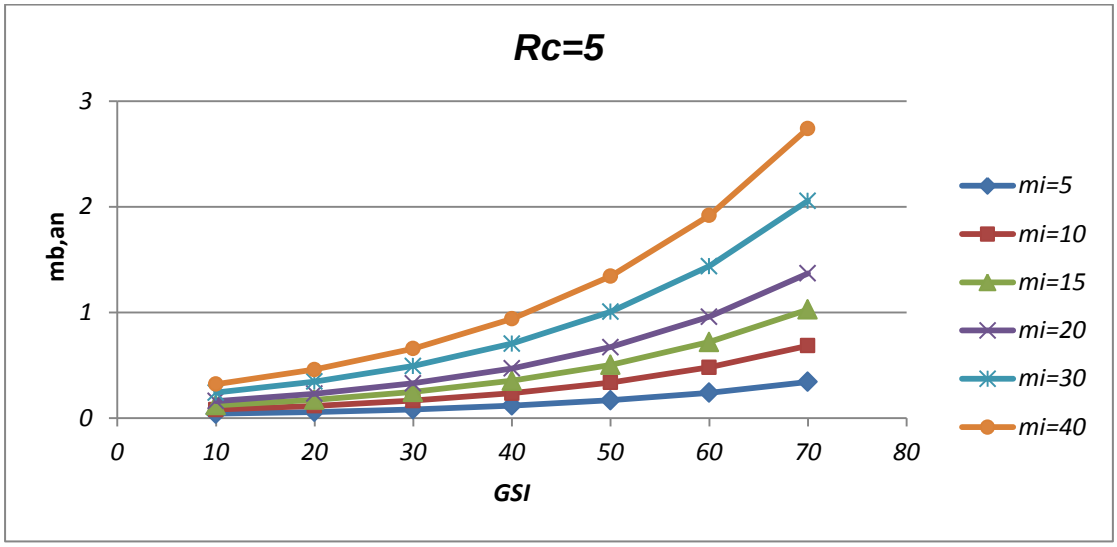
Γράφημα 12 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=1 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i



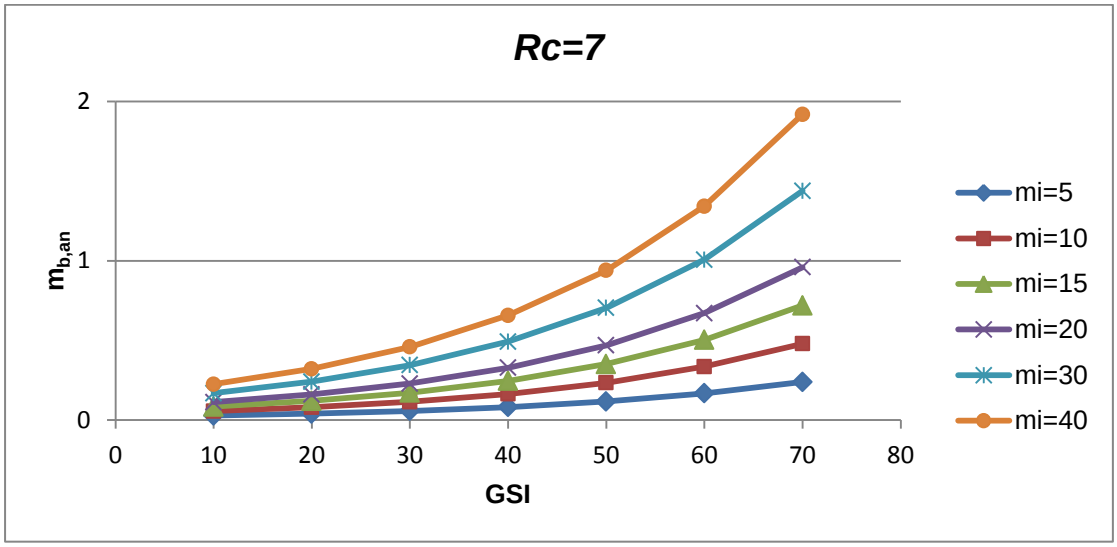
Γράφημα 13 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=2 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i



Γράφημα 14 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=3 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i

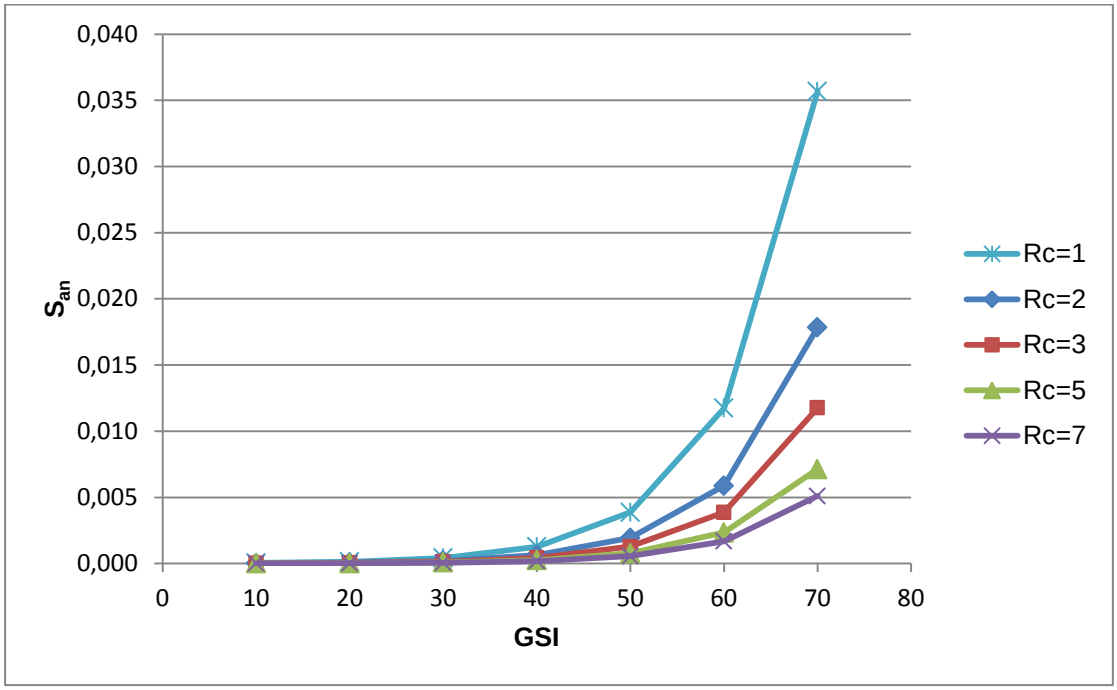


Γράφημα 15 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=5 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i



Γράφημα 16 $m_{b,an}$ - GSI, για δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c=7 και διάφορες τιμές της σταθεράς m_i

Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία καταλήγουμε στο γράφημα 17 όπου για διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c και για ένα εύρος τιμών του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI υπολογίζουμε το γινόμενο S_{an} = K_β*S.



Γράφημα 17 S_{an} - GSI, για διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c

3.4 ΜΕΤΡΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

ΜΕΤΡΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Εκτενής διεθνής έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί κατά τα τελευταία έτη έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αρκετών εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού του μέτρου παραμορφωσιμότητας (ελαστικότητας) της βραχόμαζας συναρτήσει διάφορων παραγόντων, όπως είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος, το μέτρο ελαστικότητας αυτού, τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας κλπ. Μία από τις πλέον διαδεδομένες σχέσεις υπολογισμού του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας αναπτύχθηκε από τους Hoek & Diederichs (2006) και δίνεται παρακάτω:

$$\mathbf{E_m = E_i * \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right)}$$

Όπου:

- ✓ E_m : μέτρο παραμορφωσιμότητας (ελαστικότητας) της βραχόμαζας
- ✓ E_i : μέτρο παραμορφωσιμότητας (ελαστικότητας) του άρρηκτου πετρώματος
- ✓ D :συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό διατάραξης της βραχόμαζας κατά την εκσκαφή
- ✓ GSI: η τιμή βαθμονόμησης της βραχόμαζας στο σύστημα GSI

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος E_i υπολογίζεται μέσω δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα άρρηκτου πετρώματος. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι δυσχερής η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών, ενδείκνυται η χρήση της παρακάτω προσεγγιστικής σχέσης (Hoek & Diederichs, 2006).

$$\mathbf{E_i = MR * \sigma_{ci}}$$

Όπου MR είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από τη λιθολογική σύσταση του πετρώματος και τιμές της οποίας προτείνονται από τους Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001), βάση του πίνακα 13 που παρατίθεται.

Πίνακας 13 Προτεινόμενες τιμες της σταθεράς MR, Hoek & Diederichs (2006) - με βάση τις προτάσεις των Deere (1968) και Palmstrom & Singh (2001)

Τύπος	Ομάδα		Κοκκομετρία			
			Χονδρή	Μέση	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγές 300-400 Λατυποπαγές 200-300	Ψαμμίτης 200-350	Ιλυόλιθος 350-400 Γραουβάκης 350	Αργιλόλιθος 200-300 Αργ. Σχιστόλιθος 150-200[α] Μάργα 150-200
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος 400-600	Σπαριτικός ασβεστόλιθος 600-800	Μικριτικός ασβεστόλιθος 800-1000	Δολομίτης 350-500
		Εβαπορίτες		Γύψος (350)[β]	Ανυδρίτης (350)[β]	
		Οργανικά				Κιμωλία 1000+
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 700-1000	Κερατόλιθος 400-700 Μεταψαμμίτης 200-300	Χαλαζίτης 300-450	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μιγματίτες 350-400	Αμφιβολίτης 400-500	Γνεύσιος 300-750	
	Πτυχωμένα			Σχιστόλιθος 250-1000[α]	Φυλλίτης 300-800[α]	Σχίστης 400-600[α]
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 300-550 Γρανοδιορίτης 400-450	Διορίτης 300-350		
		Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος 400-500 Νορίτης 350-400	Δολερίτης 300-400		
	Υποβυσσικά		Πορφύρης (400)[β]		Διαβάσης 300-350	Περιδοτίτης 250-300
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος 300-500 Ανδεσίτης 300-500	Δακίτης 350-450 Βασάλτης 250-450	
		Πυροκλαστικά	Κροκαλοπαγές 400-600	Ηφ. Λατυποπαγές (500)[β]	Τόφφος 200-400	

ΛΟΓΟΣ POISSON ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Για ένα ομοιογενές υλικό, όπως ένα δοκίμιο άρρηκτου βράχου, ο λόγος Poisson είναι δυνατό να προσδιοριστεί εργαστηριακά με δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, ενώ στην περίπτωση μιας ρωγματωμένης βραχόμαζας εκτιμάται κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο πίνακα:

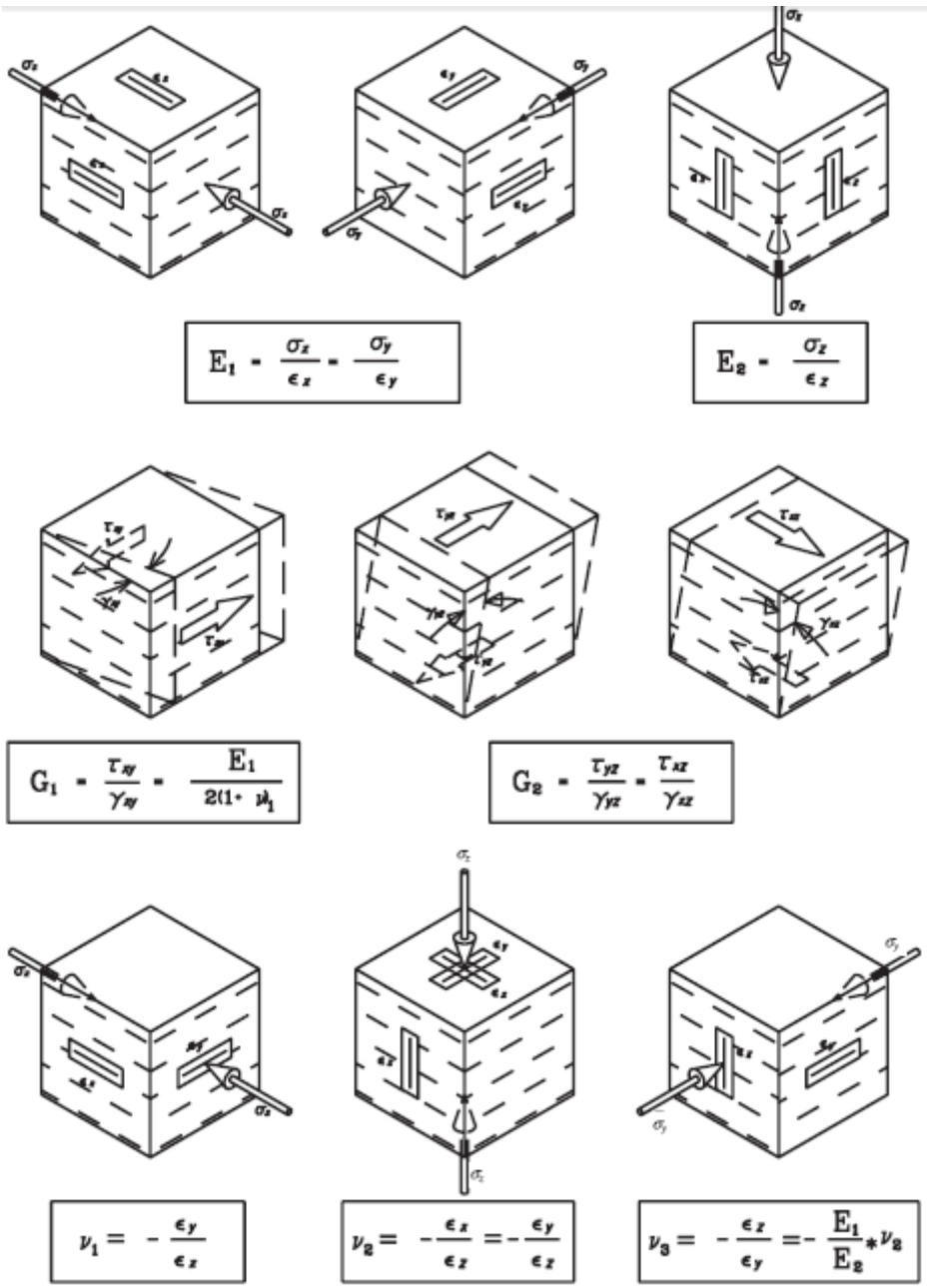
Πίνακας 14 Εκτίμηση του λόγου Poisson (Καββαδάς, 2012)

Βραχόμαζα	Λόγος Poisson ν
Τεμαχώδης, με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων, χωρίς διατάραξη	0.20-0.25
Τεμαχώδης, ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη, με γωνιώδη τεμάχη	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη, με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχη	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη	0.25-0.30

3.5 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Οι Jaeger et al. (2007) επισημαίνουν πως για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς ενός ισότροπου ομοιογενούς πετρώματος χρειάζονται μόλις δύο (2) ελαστικές παράμετροι: το μέτρο παραμορφωσιμότητας (ελαστικότητας) Ε και ο λόγος Poisson ν. Αντίθετα σε ένα ορθότροπα ανισότροπο πέτρωμα ο αριθμός των παραμέτρων που απαιτούνται αυξάνεται στις εννέα (9), ενώ για την περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου πετρώματος το πλήθος των παραμέτρων μειώνεται στις πέντε (5). Πιο συγκεκριμένα για το εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα απαιτούνται οι παράμετροι:

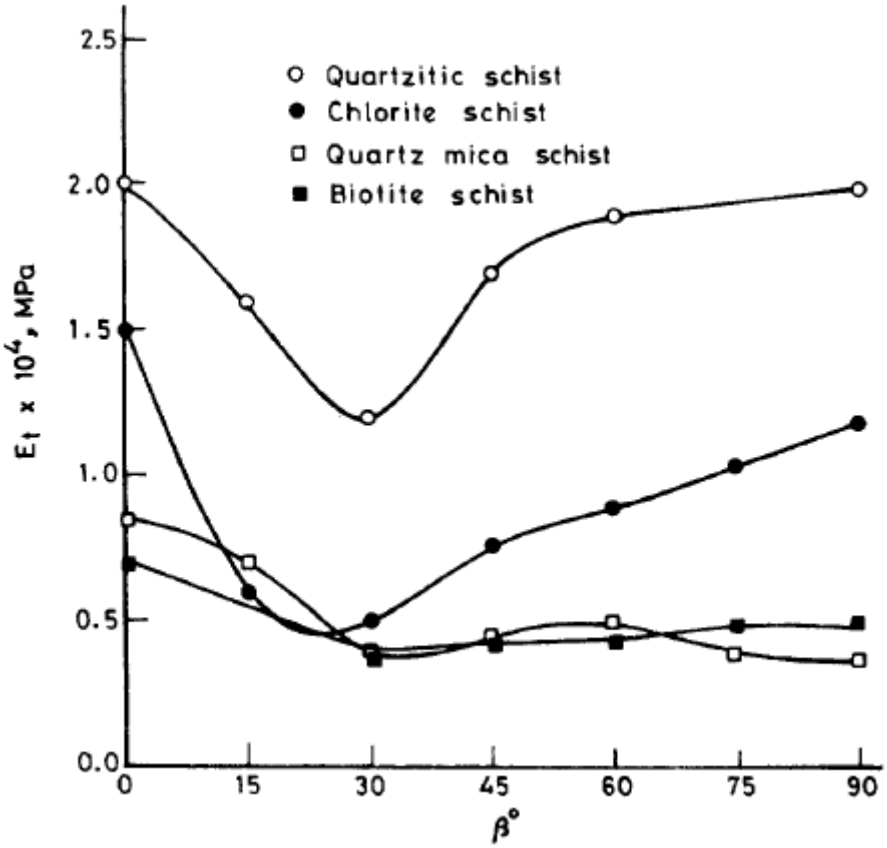
- ✓ E_1 : μέτρο ελαστικότητας Young παράλληλα στο επίπεδο ανισοτροπίας
- ✓ E_2 : μέτρο ελαστικότητας Young κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας
- ✓ ν_1 : ο λόγος Poisson ο οποίος περιγράφει την παραμόρφωση εντός του επιπέδου ανισοτροπίας όταν η φόρτιση γίνεται παράλληλα σε αυτό
- ✓ ν_2 : ο λόγος Poisson ο οποίος περιγράφει την παραμόρφωση εντός του επιπέδου ανισοτροπίας όταν η φόρτιση γίνεται κάθετα σε αυτό
- ✓ G_2 : μέτρο διάτμησης που αντιστοιχεί σε διάτμηση στο επίπεδο και κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας



Εικόνα 12 Ορισμός των ελαστικών σταθερών για εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα

Παρατηρώντας το γράφημα 18 (από Behrestaghi et al.,1996), το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Ε τεσσάρων πετρωμάτων σε σχέση με τον προσανατολισμό του επιπέδου ανισοτροπίας, είναι φανερό πως το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει την μέγιστη τιμή του, και για τα τέσσερα πετρώματα, σε φόρτιση παράλληλα στο επίπεδο ανισοτροπίας. Αυτό συμβαίνει διότι κατά αυτή τη διεύθυνση φόρτισης συναντώνται μικρότερες τιμές παραμορφωσιμότητας λόγω του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των κατακόρυφα προσανατολισμένων τεμαχών που ορίζονται από τα επίπεδα ανισοτροπίας και υπόκεινται σε θλίψη. Στην περίπτωση όπου η φόρτιση γίνεται κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας η τιμή του μέτρου

ελαστικότητας είναι μικρότερη λόγω της συμπίεσης των τεμαχών που οδηγεί σε μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα. Αντίθετα, η μεταβολή της τιμής του λόγου Poisson ν συναρτήσει της γωνίας β και για τα τέσσερα πετρώματα δεν παρουσιάζει σημαντική διακύμανση.



Γράφημα 18 Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Ε σε σχέση με τη γωνία β (Behrestaghi et al. 1996)

Το εγκάρσια ισότροπο προσομοίωμα χρησιμοποιείται για τη μελέτη πετρωμάτων όπως σχιστόλιθου, σχίστη, φιλλύτη, γνεύσιου, βασάλτη κ.λπ. Για αυτά τα πετρώματα τα επίπεδα εγκάρσιας ανισοτροπίας θεωρούνται παράλληλα με τα επίπεδα φύλλωσης και σχιστότητας. Ακόμη, κάποιες από τις πέντε (5) ελαστικές σταθερές που περιγράφουν το εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα μπορούν να συσχετιστούν. Για παράδειγμα το μέτρο διάτμησης G μπορεί να εκφραστεί βάσει των μέτρων ελαστικότητας E_1, E_2 μέσω της σχέσης του Zienkiewicz (1968):

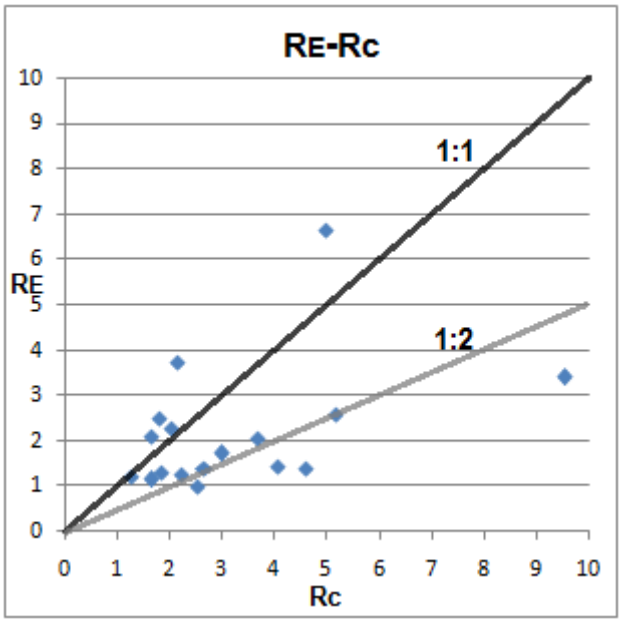
$$\frac{1}{G} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

Σε μία προσπάθεια να προσδιοριστεί ο διαφορετικός βαθμός επιρροής της ανισοτροπίας στην αντοχή και στη παραμορφωσιμότητα των πετρωμάτων, συγκεντρώθηκαν δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία (πίνακας 15). Επομένως, για ένα σημαντικό αριθμό πετρωμάτων συλλέχθηκαν οι τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής και παραμορφωσιμότητας και δημιουργήθηκε το γράφημα 19, στο οποίο

γίνεται αντιληπτό πως στην πλειοψηφία των πετρωμάτων ο δείκτης ανισοτροπίας της παραμορφωσιμότητας είναι ίσος ή μικρότερος από τον δείκτη ανισοτροπίας της αντοχής, με ελάχιστες εξαιρέσεις. Επομένως η θεώρηση πως οι δύο δείκτες ανισοτροπίας ταυτίζονται σε ένα πέτρωμα ενδεχόμενος να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός ανισότροπου πετρώματος. Συμπερασματικά προκύπτει ότι ο λόγος μεταξύ του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής Rc και παραμορφωσιμότητας RE μπορεί να ληφθεί ίσος με 2. Υπάρχουν κάποιες λίγες περιπτώσεις ανισότροπων πετρωμάτων με λόγο μικρότερο του 2, αλλά αποτελούν μειοψηφία.

Πίνακας 15 Τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής και παραμορφωσιμότητας για διάφορα πετρώματα

Τύπος πετρώματος	**Βιβλιογραφική αναφορά**	**Rc**	**RE**
Σχιστόλιθος	Read S. Perrin N., Brown I.(1987)	4,06	1,43
Διατομίτης	Alirrot & Boehler (1977) (απο Amadei)	2,15	3,75
Σχιστόλιθος (χλωριτικός)	Behrestaghi (1996)	2,22	1,25
Σχιστόλιθος (χαλαζιακός)	Behrestaghi (1996)	2,55	1
Σχιστόλιθος (βιοτιτικός)	Behrestaghi (1996)	1,67	1,15
Σχιστόλιθος (χαλαζιακός μαρμαρυγιακός)	Behrestaghi (1996)	2,05	2,29
Σχιστόλιθος (Ιλυολιθικός αργιλικός)	Ajalloeian R. & Lashkaripour G. (2000)	3,7	2,06
Σχιστόλιθος (πηλιτικός αργιλικός)	Ajalloeian R. & Lashkaripour G. (2000)	3,01	1,72
Γνεύσιος (μυλωνιτικός)	Brosch F. et al. (2000)	2,67	1,38
Γνεύσιος	Berry et al. (1974)	1,82	2,5
Σχιστόλιθος (φυλλιτικός μοσχοβοτικός)	Berry et al. (1974)	5	6,67
Λιγνίτης	Pomeroy et al. (1971)	5,18	2,59
Ψαμμίτης	Gatelier et al. (2002)	1,27	1,22
Γνεύσιος	J.-W. Cho et al. (2012)	1,86	1,3
Σχιστόλιθος (αργιλικός)	J.-W. Cho et al. (2012)	1,67	2,1
Σχιστόλιθος	J.-W. Cho et al. (2012)	9,55	3,4
Σχιστόλιθος (αργιλικός)	Gholami & Rasouli(2013)	4,6	1,4



Γράφημα 19 Δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c - Δείκτης ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E, για τα πετρώματα του πίνακα 15

3.6 ΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ HOEK & BROWN ΓΙΑ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΙΣΟΤΡΟΠΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑ

Το συγκεκριμένο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown αναφέρεται σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα στην οποία η «εγγενής» ανισοτροπία προέρχεται από την σχιστότητα και την στρωσιγένεια, που χαρακτηρίζει ένα μεταμορφωμένο ή ιζηματογενές πέτρωμα αντίστοιχα, και οφείλεται στην διαδικασία γένεσής του. Η χρήση του κριτηρίου αυτού δεν περιορίζεται από την πιθανή ύπαρξη ασυνεχειών εντός της βραχόμαζας, εφόσον οι ασυνέχειες αυτές χαρακτηρίζονται ως ήσσονος σημασίας και δεν επηρεάζουν την «εγγενή» ανισότροπη δομή της. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εγκάρσιας ισότροπης βραχόμαζας φαίνονται στην εικόνα 13 που ακολουθεί.

Εικόνα 13 Πετρώματα στα οποία η "εγγενής" ανισοτροπία πηγάζει από τη σχιστότητα (περίπτωση εγκάρσια ισότροπης βραχόμαζας)

Το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown για εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα έχει αναπτυχθεί από τον Χ. Σαρόγλου (2013) και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση.

$$\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta}\left(m_{b,an}\ \frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} + s_{an}\right)^a}$$

Όπου:

- ✓ σ_1,σ_3 :οι κύριες τάσεις κατά την αστοχία
- ✓ $\sigma_{c\beta}$:η μονοαξονική θλιπτική αντοχή για φόρτιση υπό γωνία β ως προς το επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας
- ✓ $m_{b,an} = K_\beta * m_b$ (ο προσδιορισμός της παραμέτρου $m_{b,an}$ γίνεται με χρήση των γραφημάτων 12 έως 16)
- ✓ $S_{an} = K_\beta * S$ (ο προσδιορισμός της παραμέτρου S_{an} γίνεται με χρήση του γραφήματος 17)

ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Δίνοντας έμφαση στη σχέση που εκφράζει το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown για εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα, παρατηρούμε την χρήση δυο νέων παραμέτρων: $m_{b.an}$ και s_{an}. Οι παράμετροι αυτοί αντιστοιχούν στις παραμέτρους m και s που χρησιμοποιούμε στο αρχικό κριτήριο των Hoek & Brown για τη βραχόμαζα, με την διαφορά όμως πως ο δείκτης «an» (δηλαδή ανισότροπο) αναφέρεται σε εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα. Επομένως η δημιουργία των γραφημάτων εξάρτησης των δύο αυτών παραμέτρων από την σταθερά mi, τον

γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI και το βαθμό ανισοτροπίας αντοχής Rc, παρέχει την δυνατότητα του άμεσου προσδιορισμού της τιμής των παραμέτρων αυτών, και άρα τη χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek & Brown για εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα.

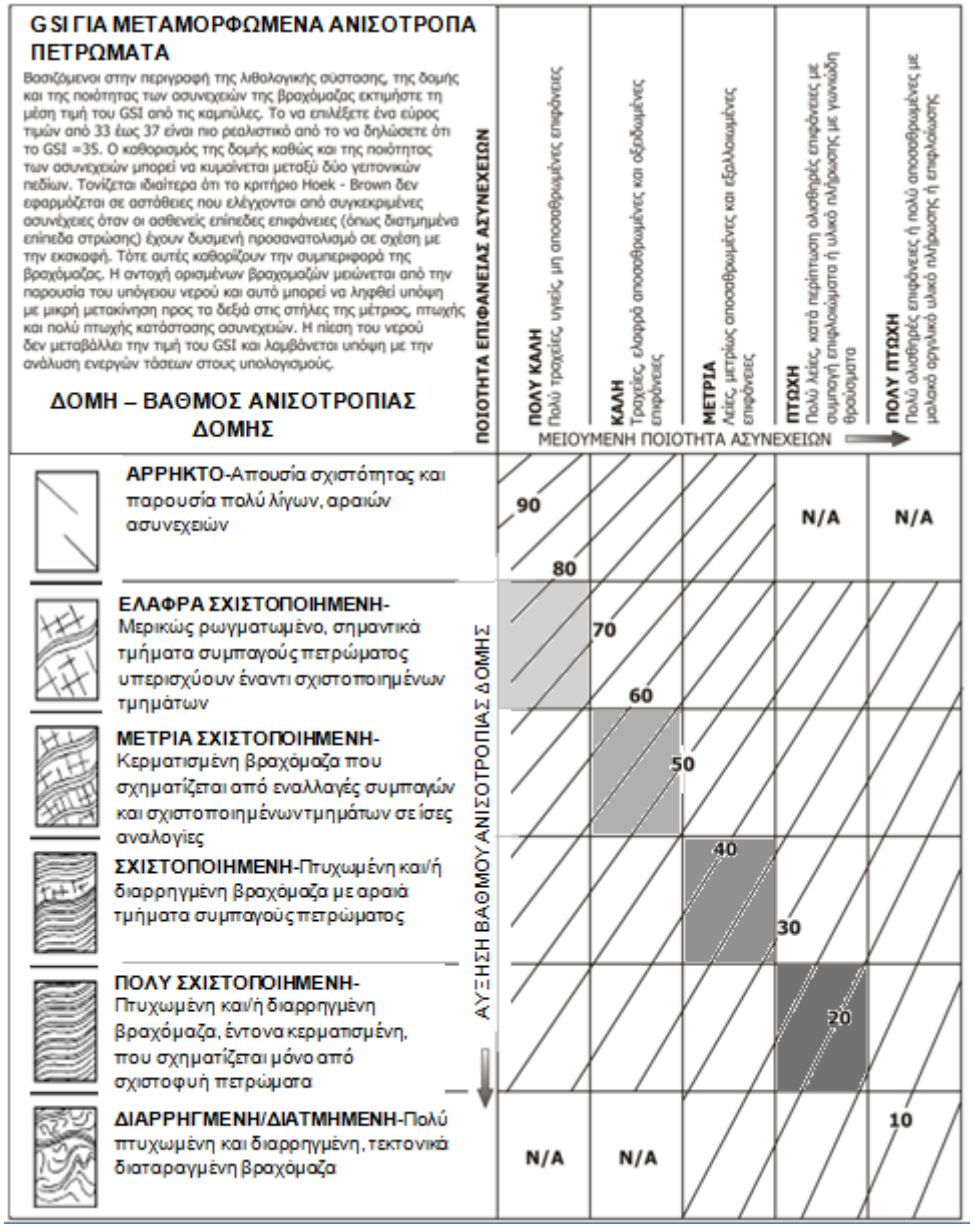
Χρησιμοποιώντας τα γραφήματα 12 έως 17 μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή των παραμέτρων $m_{b,an}$ και s_{an} για οποιοδήποτε πέτρωμα με γνωστό τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c και τον γεωλογικό δείκτη αντοχής GSI. Στο παράδειγμα που ακολουθεί και εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα, φαίνεται η μεταβολή των παραμέτρων $m_{b,an}$ και s_{an} για διάφορες δομές της βραχόμαζας και για διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c. Το πέτρωμα που μελετήθηκε είναι σχιστόλιθος με σταθερά mi=10.

Πίνακας 16 Μεταβολή των $m_{b,an}$ και S_{an} για διάφορες δομές βραχόμαζας και τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c

α.α.	Δομή και ποιότητα επιφανειών ανισοτροπίας	GSI	Rc=2 **$m_{b,an}$** *s_{an}*	Rc=3 **$m_{b,an}$** *s_{an}*	Rc=5 **$m_{b,an}$** *s_{an}*	Rc=7 **$m_{b,an}$** *s_{an}*
1	Μικρός βαθμός ανισοτροπίας δομής/πολύ καλή επιφάνεια	70	**1.71**	-	-	-
			0.017			
2	Μέτριος βαθμός ανισοτροπίας δομής/ καλή επιφάνεια	55	**1.02**	**0.67**	**0.41**	**0.29**
			0.004	0.003	0.002	0.001
3	Υψηλός βαθμός ανισοτροπίας δομής/μέτρια επιφάνεια	35	**0.5**	**0.33**	**0.2**	**0.13**
			0.001	0.00028	0.00016	0.00012
4	Πολύ υψηλός βαθμός ανισοτροπίας δομής/πτωχή επιφάνεια	20	-	**0.19**	**0.11**	**0.08**
				0.00004	0.00003	0.00002

Παρατηρώντας τον πίνακα 16 και 17 γίνεται αντιληπτό πως η τιμή των παραμέτρων $m_{b,an}$ και s_{an} που εισήχθησαν στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown μειώνεται καθώς η δομή της βραχόμαζας γίνεται πιο έντονα ανισότροπη και η ποιότητα των επιφανειών ανισοτροπίας γίνεται πιο πτωχή. Ακόμη, μείωση της τιμής των παραμέτρων ($m_{b,an}$ και s_{an}) παρατηρείται καθώς αυξάνει ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c του άρρηκτου πετρώματος. Είναι λοιπόν φανερό πως με τη βοήθεια των παραμέτρων GSI και R_c μπορούμε να εισάγουμε την επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας στο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown. Οι δύο αυτές παράμετροι παρουσιάζουν «ευαισθησία» τόσο στην ανισότροπη δομή (ποιότητα επιφανειών ανισοτροπίας, βαθμός ανισοτροπίας δομής βραχόμαζας), όσο και στον βαθμό στον οποίο ένα άρρηκτο πέτρωμα εμφανίζει ανισοτροπία αντοχής (δείκτης R_c).

Πίνακας 17 Βαθμός ανισοτροπίας δομής βραχόμαζας και ποιότητα των ασυνεχειών που επιλέχθηκαν για την σύγκριση των παραμέτρων $m_{b,an}$ και S_{an}



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ – ΣΚΟΠΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρήθηκε σκόπιμο να διενεργηθούν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία έτσι ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ανισότροπης βραχόμαζας στην κατασκευή υπογείων έργων.

Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις για την προσομοίωση της εγκάρσιας ισότροπης βραχόμαζας. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται στη θεώρηση της βραχόμαζας ως ισότροπο και ως εγκάρσια ισότροπο μέσο, ενώ αναφορικά με τα κριτήρια αστοχίας χρησιμοποιήθηκαν τόσο το αρχικό ισότροπο κριτήριο Hoek & Brown (1980) όσο και το τροποποιημένο κριτήριο (Σαρόγλου, 2013) για την εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα.

Πιο συγκεκριμένα έγινε σύγκριση δύο διαφορετικών προσομοιωμάτων:

1) Σήραγγα που διανοίγεται σε ισότροπο μέσο (isotropic)
2) Σήραγγα που διανοίγεται μέσα σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα (transversely isotropic)

Όπως αναφέρθηκε, για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις διερευνήθηκε τόσο η χρήση του αρχικού κριτηρίου Hoek & Brown (1980) όσο και αυτή του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek & Brown (Σαρόγλου, 2013), το οποίο έχει εφαρμογή σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα.

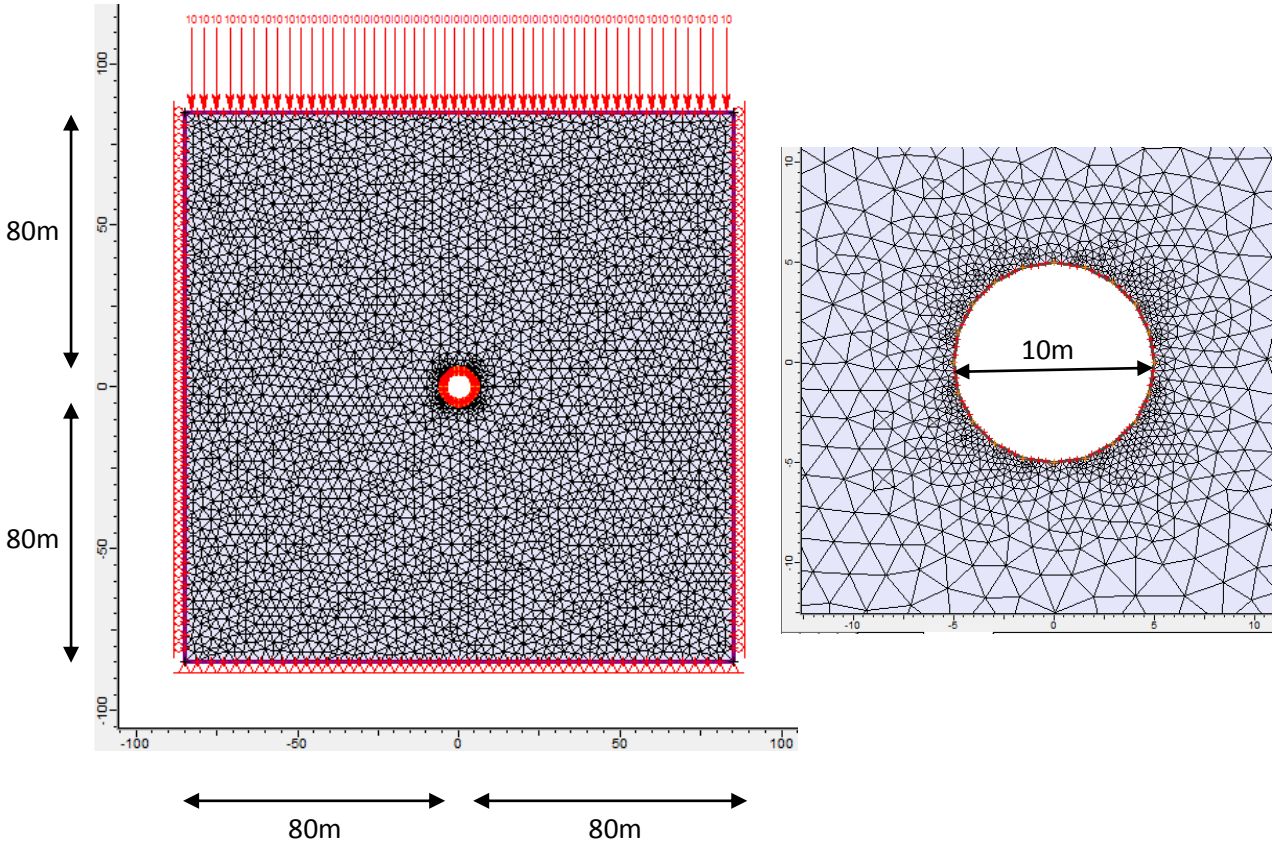
Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε ήταν το πρόγραμμα Phase2 v.5.0 της εταιρίας RocScience Inc. Το λογισμικό αυτό έχει ειδικά σχεδιαστεί για τη μελέτη γεωτεχνικών έργων και κυρίως για τη διάνοιξη σηράγγων. Για την σύγκριση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση των συγκλίσεων σήραγγας κυκλικής διατομής για κάθε περίπτωση.

Δεδομένου ότι κύριος στόχο ήταν η διερεύνηση της διακύμανσης του δείκτη ανισοτροπίας του πετρώματος στην διάνοιξη της σήραγγας, επιλέχθηκε συγκεκριμένος τύπος εγκάρσιας ισότροπης βραχόμαζας με σταθερό GSI. Οι διάφορες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως σκοπό να αναδείξουν την σημασία και την επιρροή της ανισοτροπίας (αντοχής και δομής) στην συμπεριφορά της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη ανυποστήρικτης σήραγγας εντός αυτής. Ακόμη, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην απόκριση της σήραγγας και στις συγκλίσεις που αναπτύχθηκαν στο ανυποστήρικτο τοίχωμά της για τις διάφορες περιπτώσεις αναλύσεων. Ένας επιπρόσθετος σκοπός των αναλύσεων ήταν η αξιολόγηση της χρήσης του τροποποιημένου κριτηρίου Hoek & Brown, με εφαρμογή σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα, έναντι του αρχικού κριτηρίου Hoek & Brown (1980).

Θεωρήσαμε σκόπιμη την διερεύνηση της συμπεριφοράς ανισότροπης βραχόμαζας για δύο βασικές γωνίες β. Συγκεκριμένα για γωνία β=90° όπου ο άξονας της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 είναι κάθετος στο επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας, και για γωνία β=30° όπου και αναπτύσσεται η ελάχιστη θλιπτική αντοχή της βραχόμαζας.

4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ – ΑΡΧΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε αφορά ανυποστήρικτη σήραγγα κυκλικής διατομής με διάμετρο D=10,0 m. Το συνολικό προσομοίωμα είχε μέγεθος 170x170m έτσι ώστε να μην υπάρχει επιρροή των συνόρων στα αποτελέσματα των αναλύσεων:



Εικόνα 14 Γεωμετρία του προσομοιώματος και της σήραγγας

Επιλέχθηκε να γίνει μελέτη βαθειάς ανυποστήρικτης σήραγγας, με διάμετρο D=10m.

Ως υπερκείμενα επιλέχθηκε το ύψος των 500m. Για να γίνει η προσομοίωση των υπερκειμένων πέραν των 85m που έθετε η γεωμετρία και για να μην αυξηθεί το προσομοίωμα τόσο ώστε να απαιτείται ασύμφορο χρόνο ανάλυσης, προστέθηκε εξωτερικό κατανεμημένο φορτίο. Με θεώρηση σταθερού μοναδιαίου βάρους (*unit weight*) 0,025MN/m^3, τοποθετήθηκε σταθερό κατακόρυφο γραμμικό φορτίο στο άνω σύνορο με μέγεθος 10,375MN/m για τα υπολειπόμενα 415m. Για τις αρχικές τάσεις των κόμβων (*field stress*) επιλέχθηκε το κατάλληλο βαρυτικό πεδίο και το προεπιλεγμένο μοναδιαίο βάρος έτσι ώστε κατά το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης να υπάρχει γεωστατικό εντατικό πεδίο και μηδενικές μετακινήσεις.

Ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων οριζόταν αυτόματα από το πρόγραμμα και γινόταν αύξηση της πυκνότητας αυτού στις περιοχές που ενδιαφέρουν περισσότερο, δηλαδή στη περιοχή γύρω από το υπόγειο άνοιγμα. Τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέχθηκαν ήταν τριγωνικά με τρείς κόμβους (*three nodded triangles).*

Ως μέθοδος υπολογισμού επιλέχθηκε η μέθοδος περιορισμού του Gauss (*Gaussian Elimination)* και έγινε ανάλυση τύπου επίπεδης παραμόρφωσης (*Plane Strain)*. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση του μητρώου των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε να είναι 500 και η επιτρεπόμενη απόκλιση 0,001.

Δεν θεωρήθηκε ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα.

4.2.1 ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΕΣΟ

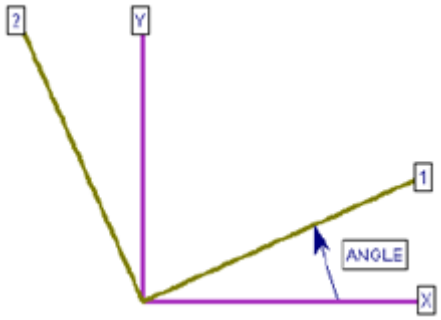
Οι αρχικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων αφορούσαν ισότροπο μέσο. Οι αναλύσεις αυτές είναι εξίσου σημαντικές με εκείνες που θα εστιάζουν στην ανισότροπη δομή και συμπεριφορά της βραχόμαζας, καθώς θα αποτελούν σημείο αναφοράς και σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών αναλύσεων. Επομένως θα παρέχουν την δυνατότητα να ελεγχθεί κατά πόσο η θεώρηση της βραχόμαζας ως εγκάρσια ισότροπης, καθώς και η χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown έναντι του αρχικού, θα οδηγήσει σε αξιοσημείωτα αποτελέσματα όσων αφορά τις συγκλίσεις του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ισότροπο μέσο με τη χρήση του αρχικού κριτηρίου Hoek & Brown (1980) είναι οι μόνες οι οποίες ελέχθησαν για μεταβλητή τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI με σκοπό να ερμηνεύσουν την επιρροή που ασκεί η ποιότητα του πετρώματος στο μέγεθος των συγκλίσεων της σήραγγας, ενώ ακόμη θεωρήθηκε σκόπιμη η θεώρηση τόσο ελαστικής όσο και ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του βραχώδους υλικού. Αντίθετα, στις αναλύσεις που έγινε χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας η τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής θεωρήθηκε σταθερή (GSI=50) και αντιστοιχεί σε βραχόμαζα με μέτριο βαθμό ανισοτροπίας δομής (πίνακας 10), ενώ δόθηκε έμφαση στη γωνία φόρτισης με την ελάχιστη τιμή της θλιπτικής αντοχής, δηλαδή $\beta=30^o$.

Στην περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου μέσου χρησιμοποιήθηκε τόσο το αρχικό όσο και το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας των Hoek & Brown για σταθερή τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής (GSI=50). Ο κυρίαρχος προσανατολισμός των αναλύσεων ήταν αυτός των 30° ενώ έμφαση δόθηκε και στη συμπεριφορά της βραχόμαζας για φόρτιση κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας ($\beta=90^o$).

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να επισημανθεί ότι στις αναλύσεις που ακολουθούν και αφορούν στο εγκάρσια ισότροπο μέσο λήφθηκε σοβαρά υπόψη το γράφημα 19 που παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.5. Με βάση αυτό, στην πλειοψηφία των πετρωμάτων ο δείκτης ανισοτροπίας της αντοχής (R_c) είναι διπλάσιος από τον δείκτη ανισοτροπίας της παραμορφωσιμότητας (R_E). Επομένως στις παρακάτω αναλύσεις ο λόγος των δύο δεικτών (R_c/ R_E) θεωρήθηκε ίσος με 2.

Αξίζει να σημειωθεί πως στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 v.5.0 για την περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου πετρώματος μπορούμε να εισάγουμε την γωνία ανισοτροπίας που θέλουμε δίνοντας την συμπληρωματική της γωνίας β (σε μοίρες). Αυτό συμβαίνει διότι ενώ έχει οριστεί εξ αρχής ως γωνία β η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο ανισοτροπίας, το συγκεκριμένο πρόγραμμα θεωρεί ως γωνία ανισοτροπίας αυτή που σχηματίζει η διεύθυνση του μέτρου ελαστικότητας E_1 ενός εγκάρσια ισότροπου πετρώματος (η οποία συμπίπτει με τη διεύθυνση του επιπέδου ανισοτροπίας), με τον άξονα x. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 είναι παράλληλη στον άξονα y, δηλαδή κάθετη στον άξονα x, η ζητούμενη γωνία από το πρόγραμμα για την περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου πετρώματος είναι η συμπληρωματική της γωνίας β.



Εικόνα 15 Προσδιορισμός της γωνίας β (στο πρόγραμμα PHASE2) για εγκάρσια ισότροπο μέσο

4.2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Έχοντας ως σκοπό να διεξαχθούν αναλύσεις οι οποίες θα βασίζονται σε πετρώματα που χαρακτηρίζονται από «εγγενή» ανισοτροπία και τα οποία μπορεί κάποιος να συναντήσει στο ύπαιθρο, αντλήθηκαν δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτό, τα εξαγόμενα συμπεράσματα από την διαδικασία που παρουσιάζεται στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας βασίζονται σε λογικές παραμέτρους βραχώδους υλικού.

Το άρθρο στο οποίο παρουσιάζονται στοιχεία για ένα «εγγενές» ανισότροπο πέτρωμα είναι των R. Gholami & V. Rasouli και έχει τίτλο *«Mechanical and Elastic Properties of Transversely Isotropic Slate»* (2013). Το πέτρωμα για το οποίο παρατίθενται στοιχεία στο συγκεκριμένο άρθρο είναι ένας σχιστόλιθος ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή του Ιράν και δείγματα αυτού πάρθηκαν από τα θεμέλια του φράγματος Sardasht. Τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλο εύρος στην τιμή της γωνίας ανισοτροπίας β, ενώ τα χαρακτηριστικά του πετρώματος εκτιμήθηκαν ύστερα από τη διενέργεια μονοαξονικών δοκιμών, τριαξονικών δοκιμών και δοκιμών Brazilian. Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή και η δυσκαμψία του πετρώματος μειωνόταν όταν η γωνία ανισοτροπίας β πλησίαζε τις 30º~40º.

Τα στοιχεία του παραπάνω πετρώματος παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 18 Δεδομένα πετρώματος (Σχιστόλιθος, R.Gholami & V. Rasouli, 2013)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
E_2 (GPa)	25
E_1 (GPa)	35
v_2	0,21
v_1	0,15
$\sigma_{ci} = \sigma_{c90}$ (MPa)	55
$\sigma_{c\beta min} = \sigma_{c30}$ (MPa)	12
m_i	7

Δίνοντας έμφαση στα δεδομένα του πετρώματος παρατηρήθηκε πως ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής του σχιστόλιθου ισούται με 4,6 (R_c = 55/12 = 4,6) ενώ ο δείκτης ανισοτροπίας της παραμορφωσιμότητας ισούται με 1,4 (R_E = 35/25 = 1,4). Δηλαδή, με βάση όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 3.5, οι δύο αυτοί δείκτες ανισοτροπίας δεν εμφανίζουν την ίδια τιμή στα περισσότερα πετρώματα και πιθανή ταύτιση των τιμών τους μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα αναλύσεων.

Στις αναλύσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, και στις οποίες θα γίνει η θεώρηση του βραχώδους μέσου ως εγκάρσια ισότροπου, τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα αφορούν την βραχόμαζα, και όχι το άρρηκτο πέτρωμα, μιας και το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown που εξετάζεται εστιάζει σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα. Επομένως θα πρέπει το μέτρο ελαστικότητας που θα χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων να έχει τροποποιηθεί μέσω μιας κατάλληλης σχέσης ώστε να αναφέρεται στη βραχόμαζα. Η σχέση αυτή έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.4 και έχει προταθεί από τους Hoek & Diederichs (2006)

$$\mathbf{E_m = E_i * \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right)}$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης, και με γνωστές τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E_1 και E_2 για το άρρηκτο πέτρωμα, υπολογίσθηκαν οι παράμετροι που αφορούν την βραχόμαζα E_{1m}, E_{2m} και G_m. Το μέτρο διάτμησης της βραχόμαζας G_m μπορεί να εκφραστεί βάσει των μέτρων ελαστικότητας E_{1m}, E_{2m} μέσω της σχέσης του Zienkiewicz (1968):

$$\frac{1}{G_m} = \frac{1}{E_{1m}} + \frac{1}{E_{2m}}$$

Σε όλες τις αναλύσεις, με εξαίρεση την σειρά Α όπου το μέσο θεωρήθηκε απολύτως ισότροπο, επιλέχθηκε ο γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI ίσος με 50 σαν μέση τιμή.

4.3 ΣΕΙΡΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Οι διάφορες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως σκοπό να ερμηνεύσουν την επιρροή της ανισοτροπίας (δομής και αντοχής) στις συγκλίσεις ανυποστήρικτης σήραγγας, καθώς επίσης και να αξιολογήσουν την χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown, με εφαρμογή σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα, έναντι του αρχικού. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αρκετές αναλύσεις με διαφορετικές παραλλαγές στις παραμέτρους του προγράμματος έτσι ώστε να καταλήξουμε σε όσο το δυνατό πιο ασφαλή συμπεράσματα. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται και περιγράφονται συνοπτικά οι σειρές αναλύσεων που εκτελέστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 19 Κωδικοποίηση και περιγραφή των σειρών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Σειρά Αναλύσεων	Περιγραφή
A	• Ισότροπο μέσο (isotropic) • Hoek-Brown (1980) • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του GSI (30,50,70) • Ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού
B	• Ισότροπο μέσο (isotropic) • Hoek-Brown τροποποιημένο (2013) • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c • Αναλύσεις για σταθερή τιμή του GSI (50) • Ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού • Γωνία ανισοτροπίας β=30º
C	• Εγκάρσια ισότροπο μέσο (transversely isotropic) • Hoek-Brown τροποποιημένο (2013) • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c και παραμορφωσιμότητας R_E • Σταθερή τιμή του GSI (50) • Γωνία ανισοτροπίας β=30º
D	• Εγκάρσια ισότροπο μέσο (transversely isotropic) • Hoek-Brown (1980) • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E • Σταθερή τιμή του GSI (50) • Γωνία ανισοτροπίας β=30º
E	• Εγκάρσια ισότροπο μέσο (transversely isotropic) • Hoek-Brown τροποποιημένο (2013) • Αναλύσεις για μεταβλητή τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E • Σταθερή τιμή του GSI (50) • Γωνία ανισοτροπίας β=90º

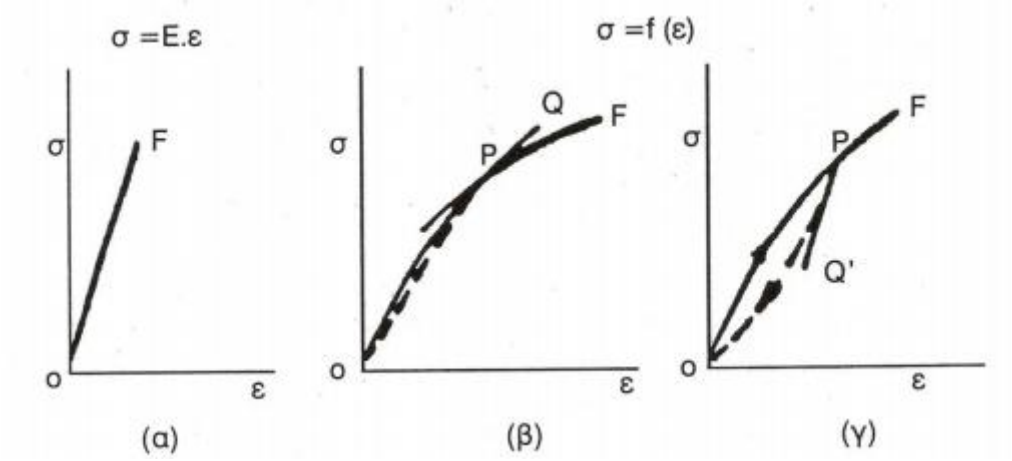
4.3.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

4.3.1.1 Ελαστική συμπεριφορά υλικού

Για να περιγραφεί η ελαστική συμπεριφορά ενός στερεού υλικού είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών του. Από αυτές στα πετρώματα μας ενδιαφέρουν κατά κύριο λόγο το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson ν. Το μέτρο ελαστικότητας (E) ορίζεται από τον νόμο του Hooke σαν ο λόγος της εξασκούμενης αξονικής τάσης προς την αξονική παραμόρφωση και αντιπροσωπεύει την δυσκαμψία του υλικού, ενώ έχει μονάδες τάσης (MPa ή GPa). Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το E τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το βραχώδες υλικό. Ο λόγος Poisson (ν), ορίζεται σαν ο λόγος της πλευρικής προς την αξονική παραμόρφωση του υλικού και είναι καθαρός αριθμός $\nu = -\frac{\varepsilon_{\pi\lambda\varepsilon\upsilon\rho\iota\kappa\acute{\eta}}}{\varepsilon_{\alpha\xi o\nu\iota\kappa\acute{\eta}}}$. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι μετά την επίδραση μιας αξονικής τάσης το υλικό διαστέλλεται πλευρικά και συγχρόνως συστέλλεται αξονικά.

Η πιο απλή μέθοδος για τη μελέτη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης ενός πετρώματος είναι η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης ενός κυλινδρικού δοκιμίου, που το μήκος του είναι μέχρι τρείς φορές τη διάμετρό του. Για κάθε εφαρμοζόμενη τάση στο δοκίμιο μετριέται η αξονική και η πλευρική παραμόρφωσή του, κυρίως με ειδικούς μετρητές (strain gauges) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δοκιμίου τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση, οπότε και καταγράφεται το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων (πλευρικών και αξονικών).

Για τα ιδανικά ελαστικά υλικά η καμπύλη τάσεων - αξονικών παραμορφώσεων μπορεί να πάρει τις μορφές που δίνονται στο γράφημα 20 (Jaeger and Cook, 1971)



Γράφημα 20 Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τα ιδανικά ελαστικά υλικά α) γραμμικό ελαστικό, β)τελείως ελαστικό, γ)ελαστικό με υστέρηση

α) Κατά προσέγγιση γραμμική τελειώνοντας απότομα στο σημείο θραύσης F του υλικού που εκφράζεται από τη σχέση $\sigma = \varepsilon * E$, όπου η σταθερά E είναι το μέτρο ελαστικότητας και ε η αξονική παραμόρφωση. Το υλικό αυτό θεωρείται ως γραμμικός ελαστικό.

β) Μη γραμμική της μορφής $\sigma = f(\varepsilon)$. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ένα σταθερό μέτρο ελαστικότητας, αλλά για κάθε τιμή της τάσης (σ) στο αντίστοιχο σημείο P η κλίση της εφαπτόμενης PQ της καμπύλης ονομάζεται εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t. Η κλίση της χορδής OP ονομάζεται χορδικό μέτρο ελαστικότητας E_s. Το υλικό αυτό περιγράφεται σαν τελείως ελαστικό.

Στις δύο παραπάνω μορφές όλες οι παραμορφώσεις είναι ανακτήσιμες και δεν δαπανάται ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης ή αποφόρτισης του δοκιμίου.

γ) Μη γραμμική της μορφής $\sigma = f(\varepsilon)$, με τη διαφορά ότι κατά την αποφόρτιση ακολουθεί διαφορετική πορεία από αυτή στη φόρτιση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και στην περίπτωση αυτή οι παραμορφώσεις είναι ανακτήσιμες αλλά δαπανάται ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης – αποφόρτισης του δοκιμίου. Η κλίση της εφαπτόμενης PQ' στην καμπύλη αποφόρτισης καλείται μέτρο αποφόρτισης. Ένα τέτοιο υλικό περιγράφεται απλά σαν ελαστικό.

4.3.1.2 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού

Στην περίπτωση αυτή η ελαστική συμπεριφορά των υλικών περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο εύρος έντασης. Πέρα από την κρίσιμη ένταση η δομή των υλικών επηρεάζεται και η ελαστική συμπεριφορά μεταβαίνει σε μετελαστική, η οποία συνήθως καλείται ελαστοπλασική συμπεριφορά. Κατά το στάδιο αυτό εκδηλώνονται μεγάλες παραμορφώσεις και η νέα κατάσταση που μεταβαίνουν τα υλικά είναι μη-αναστρεπτή, καθώς η μηχανική ενέργεια που προσδίδεται για να προκληθεί η ένταση αλλάζει μορφή μεταβαίνοντας σε θερμική. Η μετάβαση από την ελαστική συμπεριφορά στην μετελαστική καλείται «κατάσταση αστοχίας» ή διαρροή, ενώ οι περιοχές ενός στερεού που έχουν υπερβεί την κρίσιμη ένταση ονομάζονται πλαστικές ζώνες.

Γράφημα 21 Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για ελαστοπλαστικό υλικό

4.3.1.3 Αναλύσεις

Στην περίπτωση της προσομοίωσης για ισότροπη βραχόμαζα γίνεται διερεύνηση τόσο της ελαστικής όσο και της ελαστοπλαστικής συμπεριφορά του πετρώματος. Αντίθετα, για την περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου μέσου οι αναλύσεις που δύναται να εκτελεστούν, βάση του προγράμματος, αφορούσαν μόνο το ελαστικό μέσο και όχι το ελαστοπλαστκό. Η εξήγηση για το γεγονός αυτό έγκειται στο ότι η ίδια η δομή του εγκάρσια ισότροπου προσομοιώματος οδηγεί σε αστοχία του πετρώματος επί των επιπέδων ανισοτροπίας. Έτσι, όταν ξεπεραστεί ο ελαστικός κλάδος στην καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων η αστοχία θα επέλθει ακαριαία και το πέτρωμα δεν θα έχει την δυνατότητα να αρχίσει να πλαστικοποιείται. Για τον παραπάνω λόγο το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 προσομοιάζει την συμπεριφορά της εγκάρσιας ισότροπης βραχόμαζας ως ελαστική

4.3.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΕΣΟ

Οι δύο πρώτες σειρές αναλύσεων (Α, Β) αφορούν το ισότροπο μέσο και θα χρησιμοποιηθούν ως αναλύσεις αναφοράς και σύγκρισης με τις υπόλοιπες αναλύσεις όπου η «εγγενής» ανισοτροπία της βραχόμαζας προσεγγίζεται με το εγκάρσια ισότροπο προσομοίωμα.

Στην πρώτη ανάλυση που πραγματοποιήσαμε (σειρά Α) δεν ελήφθη καθόλου υπόψη η ανισοτροπία του πετρώματος. Το μέσο θεωρήθηκε ως απολύτως ισότροπο και οι παράμετροι που εισήχθησαν στο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown αναφέρθηκαν στο αρχικό. Θέλοντας να εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την σημαντικότητα της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η βραχόμαζα όταν εντός αυτής επρόκειτο να διανοιχθεί ανυποστήρικτη σήραγγα, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο η κατάσταση αυτή επηρεάζει τις συγκλίσεις, επιλέχθηκαν οι αναλύσεις που θα εκτελεστούν να αναφερθούν σε ένα εύρος τιμών του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI (30, 50, 70).

Στην δεύτερη σειρά αναλύσεων (σειρά Β) έγινε μια πρώτη προσέγγιση της «εγγενούς» ανισοτροπίας με τη βοήθεια του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown. Παρόλο που το προσομοίωμα που μελετήθηκε είναι ισότροπο, οι παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας που εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 αφορούν το τροποποιημένο κριτήριο. Έτσι, μέσω των διαγραμμάτων που έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αντλήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων $m_{b,an}$ και s_{an}, ενώ χρησιμοποιήθηκε η ελάχιστη τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta min}$ του πετρώματος, καθώς γίνεται αναφορά σε γωνία ανισοτροπίας ίση με 30º. Με τον τρόπο αυτό η ανισοτροπία της αντοχής λήφθηκε έμμεσα υπόψη, αφού οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην σειρά αυτή έγιναν για διάφορες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c.

Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις αναλύσεων επετράπη στην βραχόμαζα να συμπεριφερθεί τόσο ελαστικά όσο και ελαστοπλαστικά με σκοπό να αντιληφθούμε πως η πλαστικοποίηση κάποιων εδαφικών στοιχείων επηρεάζει τις αναπτυσσόμενες συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας.

4.3.2.1 Αναλύσεις Σειράς Α

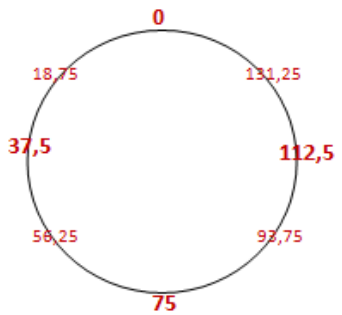
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του σχιστόλιθου καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην σειρά αναλύσεων Α.

Πίνακας 20 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς Α

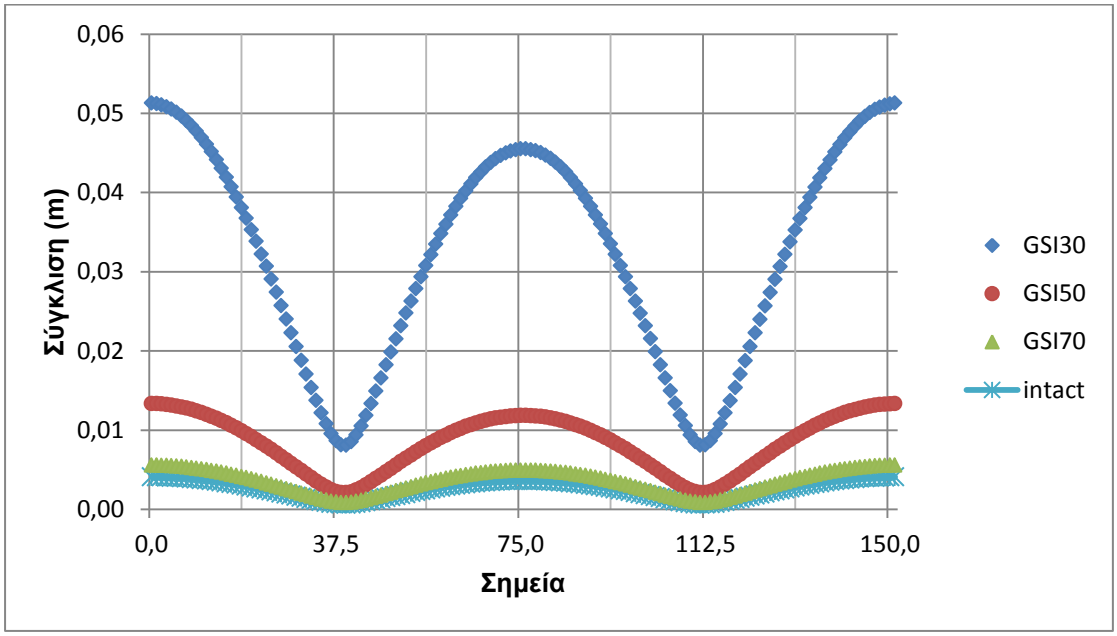
Δεδομένα	**σ_{ci} (MPa)**	55	55	55
	GSI	30	50	70
	m_i	7	7	7
	D	0	0	0
	E_i (GPa)	25	25	25
	β (º)	-	-	-
Αποτελέσματα	**m_b**	0,575	1,173	2,397
	s	0,000419	0,003866	0,035674
	a	0,5	0,5	0,5
	$\sigma_{c\beta}$ (MPa)	-	-	-
	E_m (GPa)	2	7,68	18,32

Σημείωση: τονισμένοι σημειώνονται οι παράμετροι που εισάγονται στο Phase2.

Στην παρούσα σειρά αναλύσεων μελετήθηκε τόσο η ελαστική όσο και η ελαστοπλαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας για κάθε τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Σε κάθε μία ανάλυση που πραγματοποιήθηκε βασικός στόχος ήταν να υπολογισθούν οι συγκλίσεις που αναπτύχθηκαν στο ανυποστήρικτο τοίχωμα της σήραγγας, και συγκρίνοντας τα διαγράμματα σύγκλισης – περιμετρικής απόστασης να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή της ανισοτροπίας. Στα διαγράμματα που έχουν δημιουργηθεί, για κάθε μία περίπτωση που μελετήθηκε από τις πέντε σειρές αναλύσεων, χρήσιμο είναι να τονιστεί το γεγονός πως η περιμετρική απόσταση της σήραγγας παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα x με τη μορφή σημείων. Συγκεκριμένα ξεκινώντας από την στέψη της σήραγγας (σημείο 0, απόσταση 0m), κινούμαστε αριστερόστροφα (σημείο 37,5, απόσταση 7,954m) μέχρι και το δάπεδο της σήραγγας (σημείο 75, απόσταση 15,9m) και έπειτα (σημείο 112,5, απόσταση 23,86m) καταλήγουμε ξανά στο αρχικό σημείο της στέψης (σημείο 0). Τα παραπάνω φαίνονται σχηματικά και στην εικόνα 16 που ακολουθεί, όπου παρουσιάζονται και ενδιάμεσα σημεία.



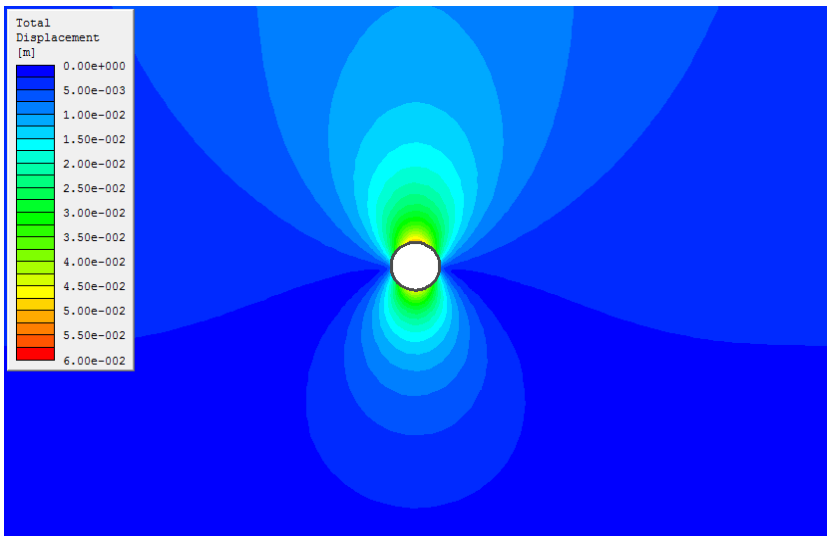
Εικόνα 16 Χαρακτηριστικά σημεία της διατομής της σήραγγας



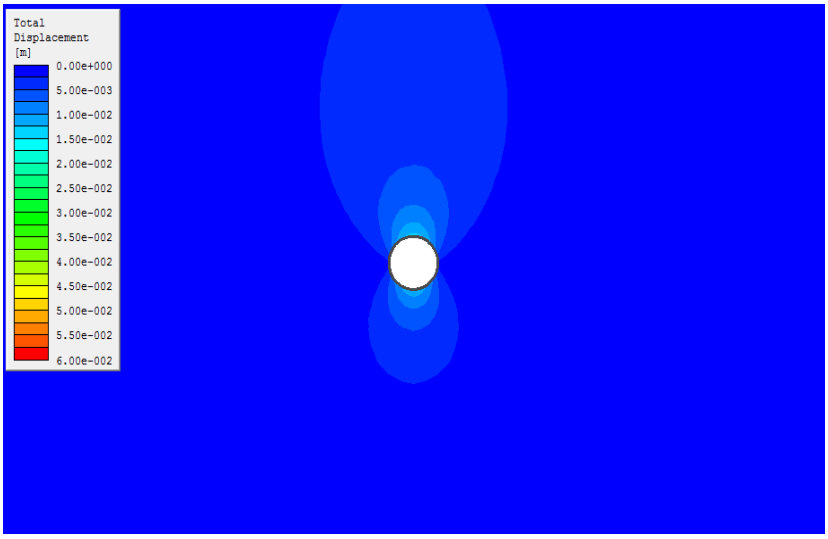
Γράφημα 22 Ανάλυση Α για ελαστκό μέσο - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του GSI

Στο παραπάνω γράφημα 22 παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις της ανυποστήρικτης σήραγγας για ένα εύρος τιμών του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Όπως ήταν αναμενόμενο καθώς μεταβαίνουμε από μικρές προς μεγάλες τιμές του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI, δηλαδή καθώς η ποιότητα της βραχόμαζας αυξάνει, οι μετακινήσεις στο τοίχωμα της σήραγγας τείνουν να μειωθούν. Ενδεικτικό είναι το γεγονός πως η μέγιστη σύγκλιση για τιμή του GSI ίση με 50 είναι της τάξης των 0,013m ενώ καθώς η τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής μειώνεται σε 30, η μέγιστη σύγκλιση τετραπλασιάζεται (0,052m).

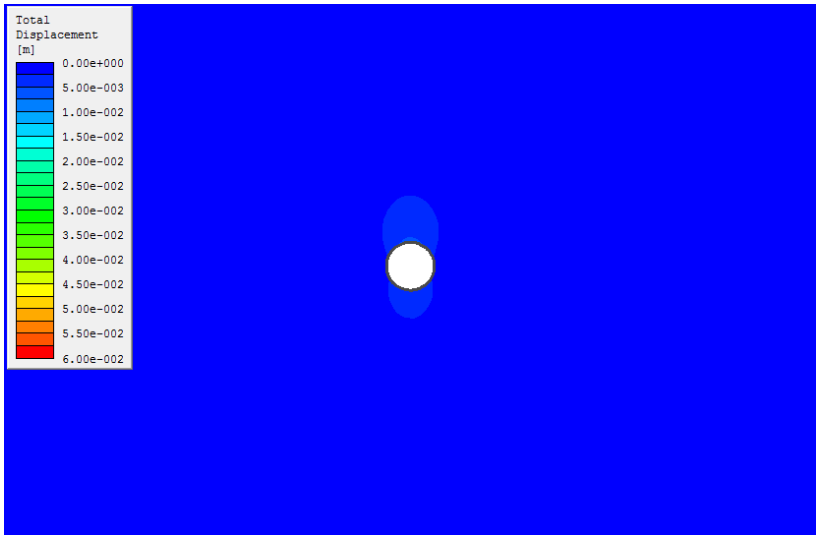
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των συνολικών μετακινήσεων πέριξ της σήραγγας για κάθε τιμή του GSI. Σε όλες τις εικόνες έχει χρησιμοποιηθεί στο υπόμνημα η ίδια μέγιστη και ελάχιστη τιμή μετακίνησης προκειμένου να είναι εύκολα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Όπως και στο διάγραμμα έτσι και στις εικόνες είναι εμφανής η μείωση των μετακινήσεων για αύξηση της τιμής του γεωλογικού δείκτη αντοχής, καθώς και το γεγονός πως οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στη στέψη και στο δάπεδο της σήραγγας. Ακόμη, καθώς η ποιότητα της βραχόμαζας μειώνεται ο βολβός των μετακινήσεων τείνει να επεκταθεί και επομένως επηρεάζονται και πιο απομακρυσμένα σημεία.



Εικόνα 17 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Συνολικές μετακινήσεις - GSI 30

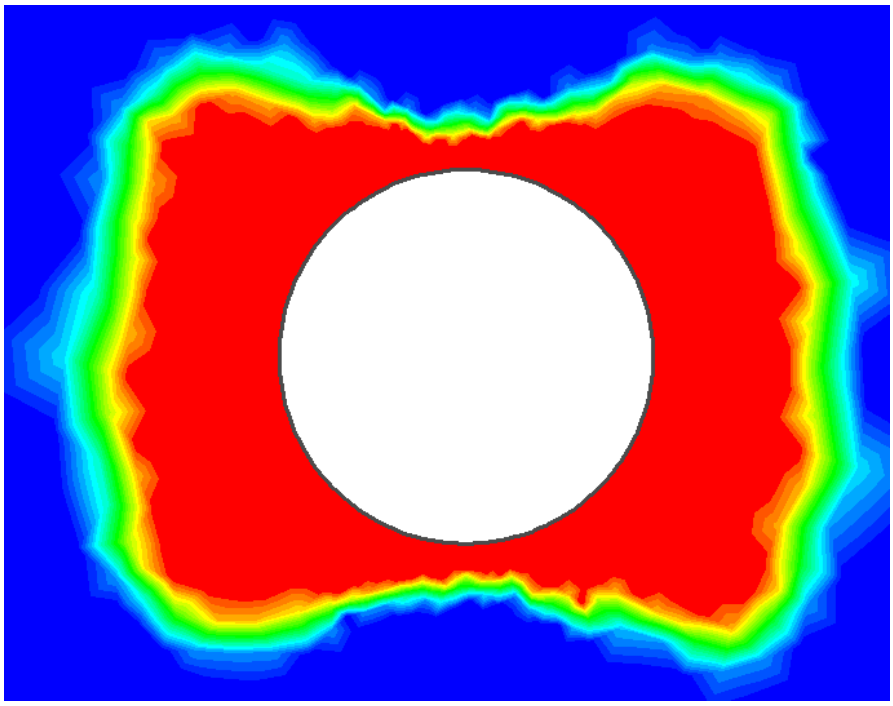


Εικόνα 18 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Συνολικές μετακινήσεις - GSI50

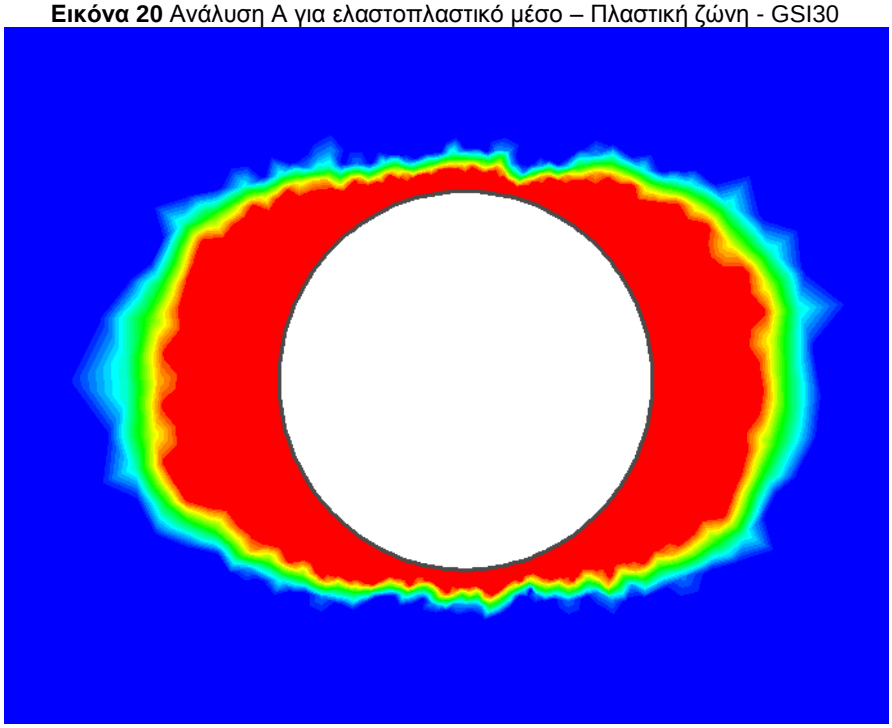


Εικόνα 19 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Συνολικές μετακινήσεις - GSI70

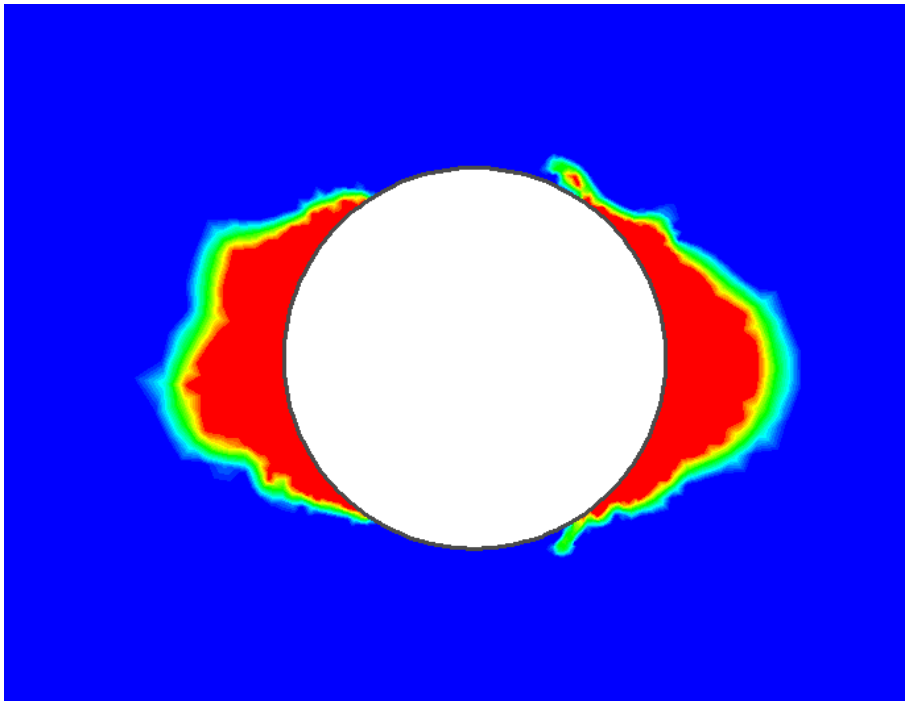
Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η μορφή της πλαστικής ζώνης για κάθε τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Είναι εμφανής η μείωση της πλαστικής ζώνης καθώς η τιμή του GSI αυξάνει, γεγονός που δικαιολογείται από την αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του πετρώματος. Ακόμη παρατηρείται συγκέντρωση των σημείων διαρροής στα σημεία 37,5 και 112,5 της περιμέτρου της σήραγγας καθώς εκεί αναπτύσσονται επαυξημένες μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 (πλέον εφαπτομενικές λόγω της στροφής του τασικού πεδίου).



Εικόνα 20 Ανάλυση Α για ελαστοπλαστικό μέσο – Πλαστική ζώνη - GSI30

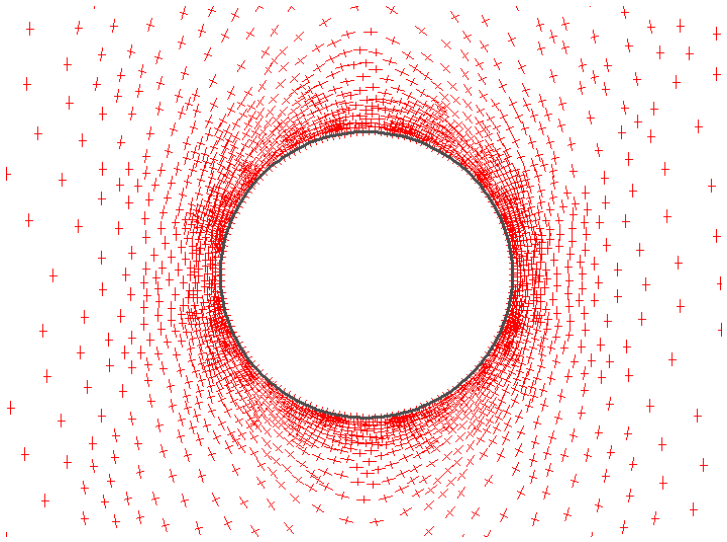


Εικόνα 21 Ανάλυση Α για ελαστοπλαστικό μέσο - Πλαστική ζώνη - GSI50



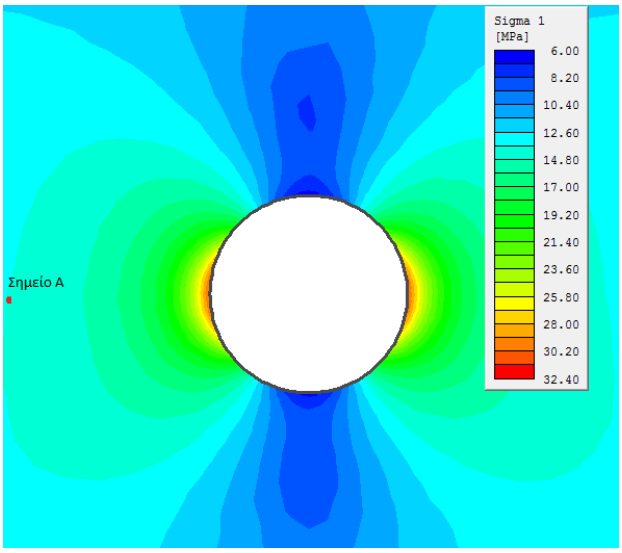
Εικόνα 22 Ανάλυση Α για ελαστοπαστικό μέσο - Πλαστική ζώνη - GSI70

Όσων αφορά τις κατανομές των τάσεων είναι γνωστό ότι υπάρχει παραμόρφωση του εντατικού πεδίου γύρω από σήραγγα κυκλικής διατομής . Έτσι, στην εικόνα 23 εμφανίζεται η στροφή του τασικού πεδίου πέριξ της σήραγγας.



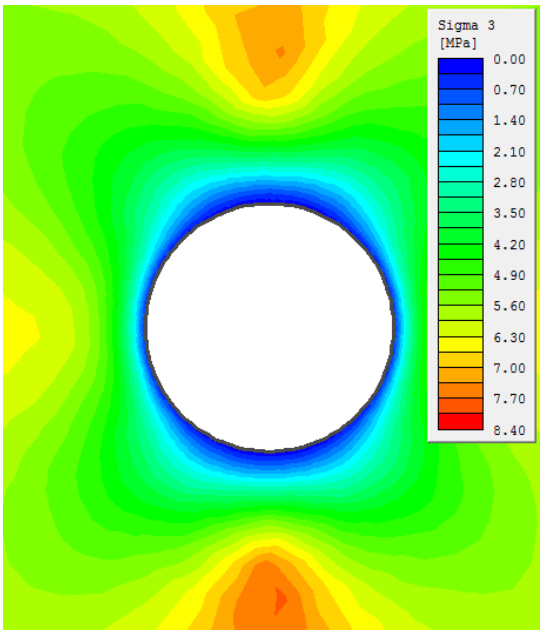
Εικόνα 23 Στροφή του τασικού πεδίου γύρω από σήραγγα κυκλικής διατομής

Η κατανομή των κύριων τάσεων σ_1 δίνει συμμετρικούς βολβούς, όπου οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα σημεία 37,5 και 112,5 της σήραγγας. Είναι εμφανές πως καθώς απομακρυνόμαστε από τη σήραγγα το έδαφος δεν επηρεάζεται πλέον από την ύπαρξη του υπόγειου ανοίγματος και η εντατική κατάσταση που επικρατεί στα απομακρυσμένα αυτά σημεία είναι η αρχική (για παράδειγμα στο σημείο Α ισχύει σ_1=500m*0.025KN/m^3=12.5MPa).



Εικόνα 24 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 - GSI50

Όσων αφορά τις ελάχιστες κύριες τάσεις σ_3 είναι γνωστό ότι στην περίμετρο της σήραγγας αυτές μηδενίζονται, εφόσον δεν νοούνται ακτινικές τάσεις. Η κατανομή των τάσεων σ_3 ακολουθεί την γνωστή κατανομή, μια ζώνη δηλαδή που περιβάλει την σήραγγα. Όμοια με την μέγιστη κύρια τάση σ_1, μακριά από τη σήραγγα η εντατική κατάσταση είναι η αρχική.



Εικόνα 25 Ανάλυση Α για ελαστικό μέσο - Ελάχιστες κύριες τάσεις σ_3 - GSI50

4.3.2.2 Αναλύσεις Σειράς Β

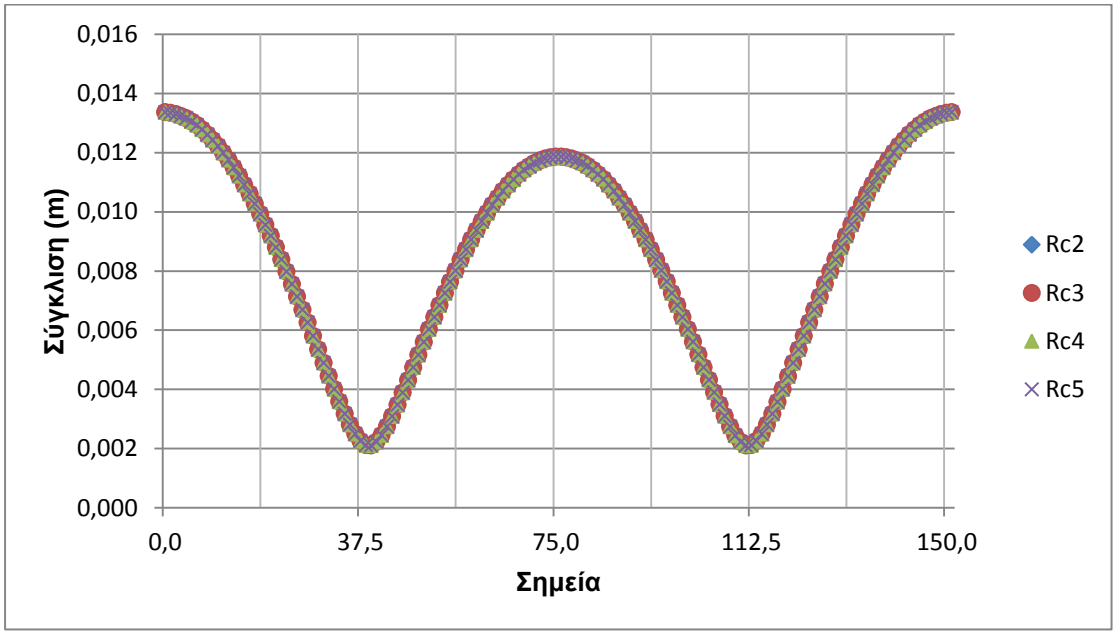
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του σχιστόλιθου καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην σειρά αναλύσεων Β.

Πίνακας 21 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς Β

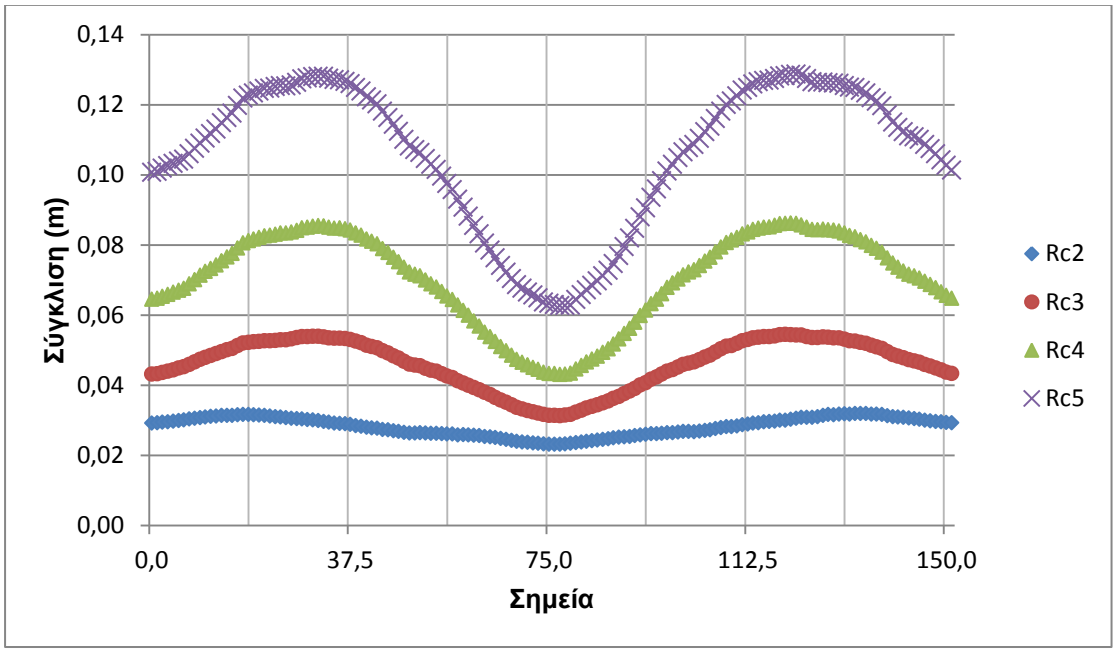
Δεδομένα	**σ_{ci} (MPa)**	55	55	55	55
	GSI	50	50	50	50
	m_i	7	7	7	7
	D	0	0	0	0
	E_i (GPa)	25	25	25	25
	β (º)	30	30	30	30
		R_c=2	**R_c=3**	**R_c=4**	**R_c=5**
Αποτελέσματα	**m_b**	0,65	0,42	0,3	0,25
	S	0,001933	0,00128	0,00103	0,00077
	A	0,5	0,5	0,5	0,5
	$\sigma_{c\beta}$ (MPa)	27,5	18,33	13,75	11
	E_m (GPa)	7,68	7,68	7,68	7,68

Στην σειρά αναλύσεων Β εφαρμόσθηκε το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (2013) σε ισότροπο μέσο. Η ανισοτροπία εισήχθη στο προσομοίωμα μέσω του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c, όπου μελετήθηκε ένα εύρος τιμών του (από R_c=2 για χαμηλή ανισοτροπία έως R_c=5 για υψηλή). Έτσι για κάθε μία τιμή του δείκτη R_c υπολογίστηκε τόσο η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του πετρώματος για φόρτιση υπό γωνία β ίση με 30º ως προς τα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας , όσο και η τιμή των παραμέτρων $m_{b,an}$, s_{an} με τη βοήθεια των γραφημάτων 12 - 16. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ίδια τιμή του GSI. Συγκεκριμένα ετέθη GSI ίσο με 50, ως μια μέση αντιπροσωπευτική τιμή η οποία αντιστοιχεί σε μία μέτριας ποιότητας βραχόμαζα.

Επειδή το μέσο στην σειρά αναλύσεων Β είναι ισότροπο, υπάρχει η δυνατότητα να διεξαχθούν αναλύσεις σε βραχόμαζα που συμπεριφέρεται τόσο ελαστικά όσο και ελαστοπλαστικά. Στην πρώτη περίπτωση, όπου η βραχόμαζα δεν έφθανε μέχρι την κατάσταση της αστοχίας, η μεταβολή στην τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c δεν οδηγούσε σε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς την σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από την μικρή επιρροή που ασκεί η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του πετρώματος ($\sigma_{c\beta}$), όταν αυτό συμπεριφέρεται ελαστικά. Αντίθετα, όταν επετράπη στο πέτρωμα να συμπεριφερθεί ελαστοπλαστικά, τυχών μεταβολή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c οδηγούσε σε διαφορετικά αποτελέσματα συγκλίσεων. Αυτό συνέβη διότι κυρίαρχο ρόλο κατά την ελαστοπλαστική συμπεριφορά ενός πετρώματος διαδραματίζει η αντοχή του ($\sigma_{c\beta}$). Επομένως, τυχών αύξηση στην τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c συνεπάγεται και μείωση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, και άρα αύξηση της τιμής των συγκλίσεων της σήραγγας. Τα παραπάνω προκύπτουν και από τα γραφήματα 23, 24 που ακολουθούν.



Γράφημα 23 Ανάλυση Β για ελαστικό μέσο - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c



Γράφημα 24 Ανάλυση Β για ελαστοπλαστικό μέσο - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c

4.3.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΙΣΟΤΡΟΠΟ ΜΕΣΟ

Στις τρείς τελευταίες σειρές αναλύσεων (C, D, E) το προσομοίωμα θεωρήθηκε ως εγκάρσια ισότροπο. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει να εισαχθεί με άμεσο τρόπο η ανισοτροπία της δομής του πετρώματος στις αναλύσεις. Οι πληροφορίες σχετικά με το πέτρωμα που χρειάζεται να εισαχθούν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αφορούν τόσο την παράλληλη με το επίπεδο ανισοτροπίας διεύθυνση, όσο και την κάθετη (π.χ. E_1 και E_2).

Στην τρίτη σειρά αναλύσεων (σειρά C) χρησιμοποιήθηκε το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown, ενώ θεωρήθηκε πως τα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας της βραχόμαζας σχηματίζουν γωνία β ίση με 30º ως προς την διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1. Αντίστοιχα και στην πέμπτη σειρά αναλύσεων (σειρά E) έγινε χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας, αλλά με τη θεώρηση οριζόντιων επιπέδων ανισοτροπίας (β=90º). Τέλος, στην τέταρτη σειρά αναλύσεων (σειρά D) μελετήθηκε η εφαρμογή του αρχικού κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα όπου θεωρήθηκε γωνία β=30º. Σε όλες τις αναλύσεις η συμπεριφορά της βραχόμαζας είναι ελαστική, λόγω της εγκάρσιας ισότροπης δομής.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται μία προς μία οι προαναφερθέντες σειρές αναλύσεων με κάποια χρήσιμα συμπεράσματα , ενώ στο τέλος του κεφαλαίου 4 γίνεται σύγκριση μεταξύ των πέντε σειρών αναλύσεων και των διαφορών που εμφανίζουν.

4.3.3.1 Αναλύσεις Σειράς C

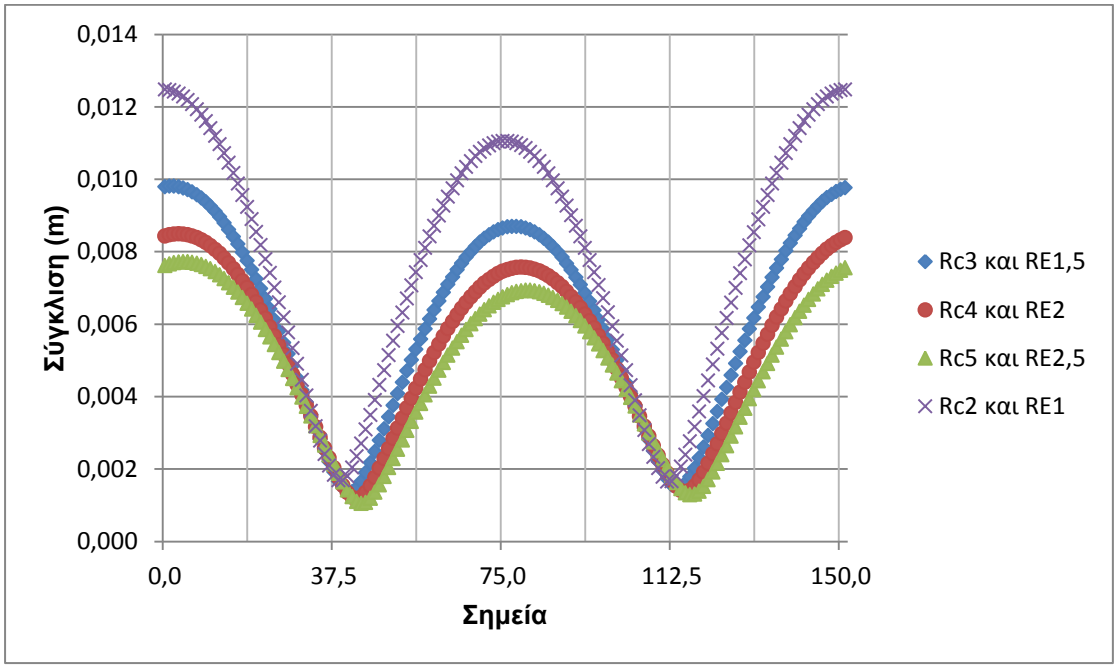
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του σχιστόλιθου καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην σειρά αναλύσεων C.

Πίνακας 22 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς C

Δεδομένα	**σ_{ci} (MPa)**	55	55	55	55
	GSI	50	50	50	50
	m_i	7	7	7	7
	D	0	0	0	0
	E_{2i} (GPa)	25	25	25	25
	E_{1i} (GPa)	25	16,67	12,5	10
	β (º)	30	30	30	30
		R_c=2, R_E=1	**R_c=3, R_E=1,5**	**R_c=4, R_E=2**	**R_c=5, R_E=2,5**
Αποτελέσματα	**m_b**	0,65	0,42	0,3	0,25
	s	0,001933	0,00128	0,00103	0,00077
	a	0,5	0,5	0,5	0,5
	$\sigma_{c\beta}$ (MPa)	27,5	18,33	13,75	11
	E_{2m} (GPa)	7,68	7,68	7,68	7,68
	E_{1m} (GPa)	7,68	11,52	15,36	19,2
	v_2	0,21	0,21	0,21	0,21
	v_1	0,21	0,14	0,105	0,084
	G_m (GPa)	3,835	4,6	5,12	5,48

Στην συγκεκριμένη σειρά αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε τόσο ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c, λόγω της εφαρμογής του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας, όσο και ο δείκτης ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E, λόγω της εγκάρσια ισότροπης δομής του πετρώματος. Έχοντας σαν βάση την παράγραφο 3.4 καθώς και το γράφημα 19, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε γενικές γραμμές ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c τείνει να είναι διπλάσιος του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E. Για τον λόγο αυτό στις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην σειρά αναλύσεων C, επιλέχθηκε ο λόγος της τιμής των δύο παραμέτρων (R_c / R_E) να ισούται με 2, όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην παράγραφο 4.2.1

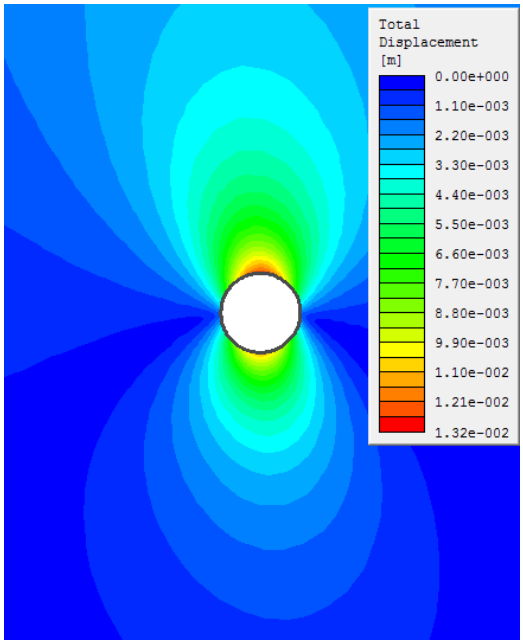
Στο γράφημα 25 παρουσιάζονται οι συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για ένα εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Είναι εμφανές πως καθώς η τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E αυξάνεται (αντίστοιχα και του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c), οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις μειώνονται, γεγονός που δικαιολογείται από την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E_{1m} της βραχόμαζας, στην παράλληλη με το επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας διεύθυνση.



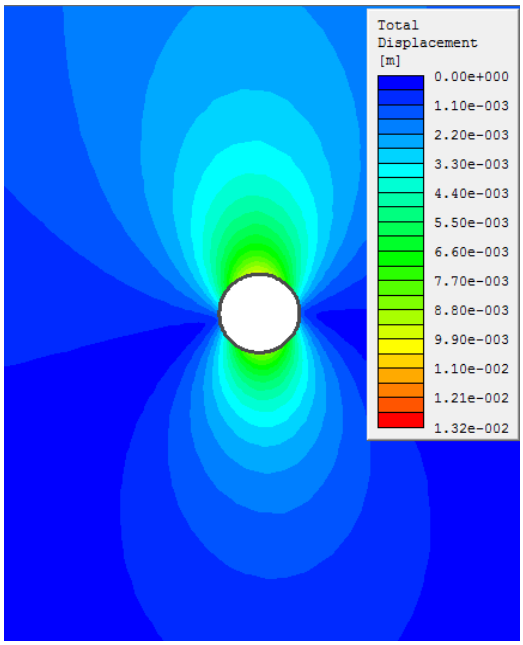
Γράφημα 25 Ανάλυση C - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας και αντοχής

Έπειτα παρουσιάζεται η κατανομή των συνολικών μετακινήσεων πέριξ της σήραγγας για κάθε ζεύγος τιμών των δεικτών ανισοτροπίας αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Σε όλες τις εικόνες έχει χρησιμοποιηθεί στο υπόμνημα η ίδια μέγιστη και ελάχιστη τιμή μετακίνησης προκειμένου να είναι εύκολα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Όπως και στο διάγραμμα, έτσι και στις εικόνες είναι εμφανής η μείωση των μετακινήσεων για αύξηση της τιμής του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E και αντοχής R_c. Επομένως, καθώς η τιμή των δύο αυτών δεικτών ανισοτροπίας αυξάνεται, παρατηρείται συρρίκνωση του βολβού των

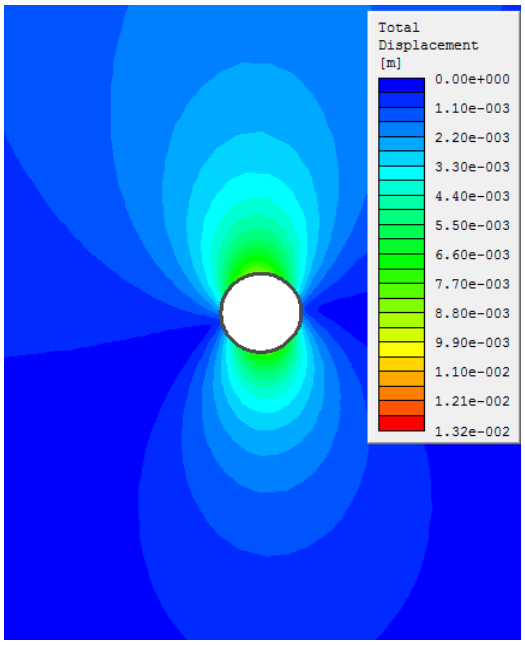
μετακινήσεων. Ακόμη είναι σημαντικό να επισημανθεί η στροφή που εμφανίζει ο βολβός των μετακινήσεων λόγω της γωνίας ανισοτροπίας που εμφανίζει το εγκάρσια ισότροπο προσομοίωμα της σειράς C, και η οποία ισούται με 30º. Μάλιστα η στροφή αυτή είναι πιο έντονη όταν αυξάνεται η τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E καθώς τότε μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας E_1 (παράλληλα στο επίπεδο ανισοτροπίας) και E_2 (κάθετα στο επίπεδο ανισοτροπίας), και κατ' επέκταση η επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας ενισχύεται.



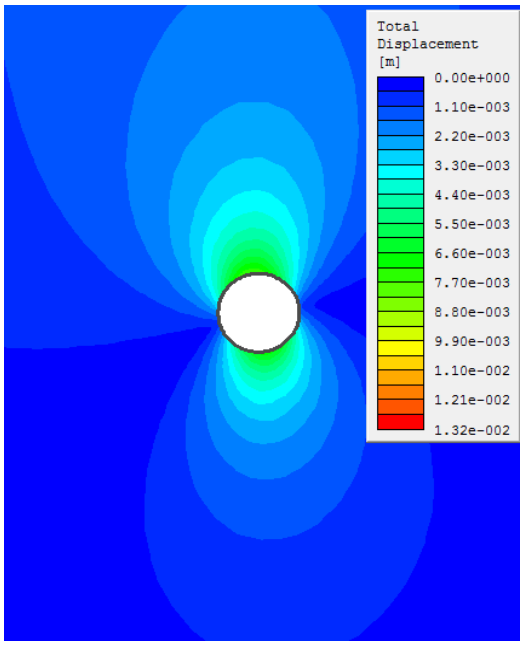
Εικόνα 26 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=1 & R_c=2



Εικόνα 27 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=1,5 & R_c=3

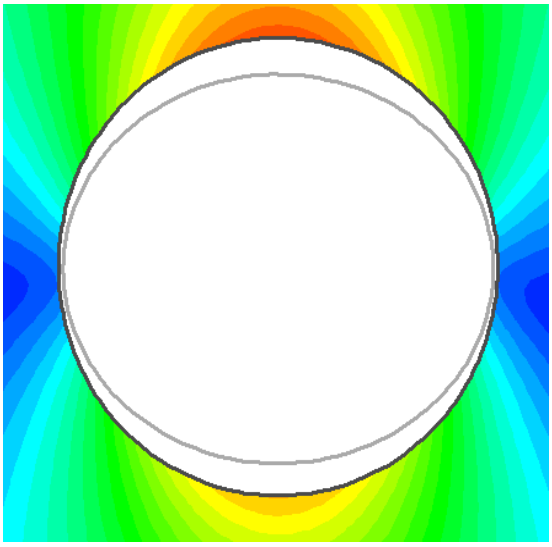


Εικόνα 28 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2 & R_c=4

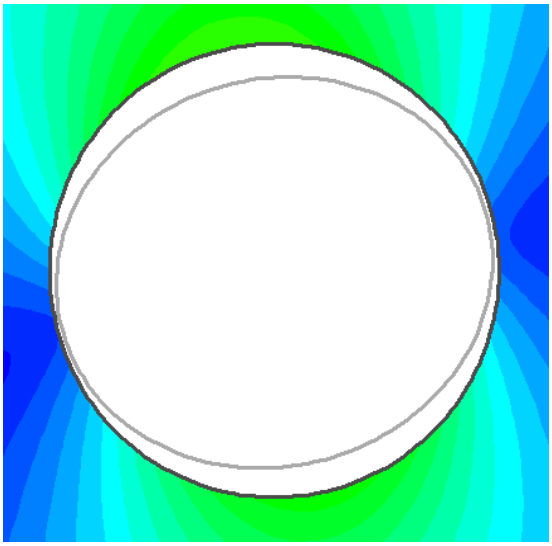


Εικόνα 29 Ανάλυση C - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2,5 & R_c=5

Στη συνέχεια εμφανίζεται η τελική παραμορφωμένη διατομή της σήραγγας για την περίπτωση όπου το μέτρο ελαστικότητας στην παράλληλη διεύθυνση με το επίπεδο ανισοτροπίας (E_1) συμπίπτει με εκείνο στην κάθετη διεύθυνση (E_2) -δηλαδή R_E=1, ισότροπο- καθώς και στην τελική περίπτωση που μελετήθηκε, σύμφωνα με την οποία ο δείκτης ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E ισούται με 2,5. Γίνεται αντιληπτό από τις εικόνες που ακολουθούν πως καθώς αυξάνει η διαφορά μεταξύ των δύο μέτρων ελαστικότητας E_1 και E_2, δηλαδή καθώς αυξάνει ο δείκτης ανισοτροπίας της παραμορφωσιμότητας R_E, η επιρροή του εγκάρσια ισότροπου προσομοιώματος και της γωνία ανισοτροπίας β γίνεται πλέον εμφανής.



Εικόνα 30 Ανάλυση C - Παραμορφωμένη διατομή σάραγγας - R_E=1 & R_c=2



Εικόνα 31 Ανάλυση C - Παραμορφωμένη διατομή σήραγγας - R_E=2,5 & R_c=5

Από τις παραπάνω εικόνες είναι φανερό πως σε ένα εγκάρσια ισότροπο μέσο η μέγιστη σύγκλιση της σήραγγας εμφανίζεται στα σημεία στα οποία τα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας εφάπτονται στην κυκλική διατομή της σήραγγας. Επομένως για την περίπτωση της τρίτης σειράς αναλύσεων (σειρά C), όπου τα επίπεδα ανισοτροπίας σχηματίζουν γωνία ίση με 30º με την διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1, αναμένονται οι μέγιστες τιμές συγκλίσεων να σημειωθούν στα σημεία 12,5 και 87,5 της περιμέτρου.

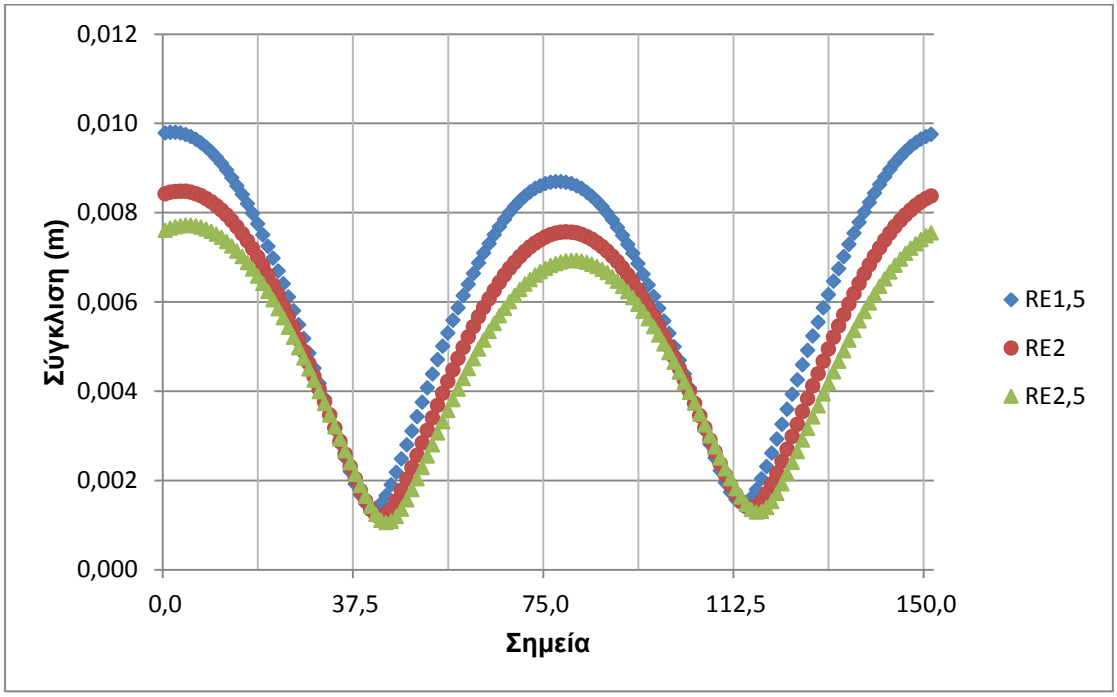
4.3.3.2 Αναλύσεις Σειράς D

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του σχιστόλιθου καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην σειρά αναλύσεων D.

Πίνακας 23 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις τις σειράς D

Δεδομένα	**σ_{ci} (MPa)**	55	55	55
	GSI	50	50	50
	m_i	7	7	7
	D	0	0	0
	E_{2i} (GPa)	25	25	25
	E_{1i} (GPa)	16,67	12,5	10
	β (º)	30	30	30
		R_E=1,5	**R_E=2**	**R_E=2,5**
Αποτελέσματα	**m_b**	1,173	1,173	1,173
	s	0,003866	0,003866	0,003866
	a	0,5	0,5	0,5
	$\sigma_{c\beta}$ (MPa)	-	-	-
	E_{2m} (GPa)	7,68	7,68	7,68
	E_{1m} (GPa)	11,52	15,36	19,2
	v_2	0,21	0,21	0,21
	v_1	0,14	0,105	0,084
	G_m (GPa)	4,6	5,12	5,48

Στη σειρά αναλύσεων D εφαρμόσθηκε το αρχικό κριτήριο αστοχίας των Hoek & Brown σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα, όπου η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 σχημάτιζε γωνία ίση με 30º με την επιφάνεια «εγγενούς» ανισοτροπίας. Η βασική διαφορά της σειράς αυτής σε σχέση με την σειρά αναλύσεων C έγκειται στην χρήση του αρχικού κριτηρίου αστοχίας έναντι του τροποποιημένου. Λόγω της εγκάρσιας ισότροπης δομής της βραχόμαζας υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της για ένα εύρος τιμών του. Σύμφωνα και με το γράφημα 26 που δίνεται στη συνέχεια, αύξηση του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας συνεπάγεται και μείωση των συγκλίσεων στο τοίχωμα της σήραγγας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο εγκάρσια ισότροπο προσομοίωμα η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ελαστικά, και κατ' επέκταση το μέτρο ελαστικότητας είναι αυτό που διαμορφώνει το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων.



Γράφημα 26 Ανάλυση D - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας

4.3.3.3 Αναλύσεις Σειράς Ε

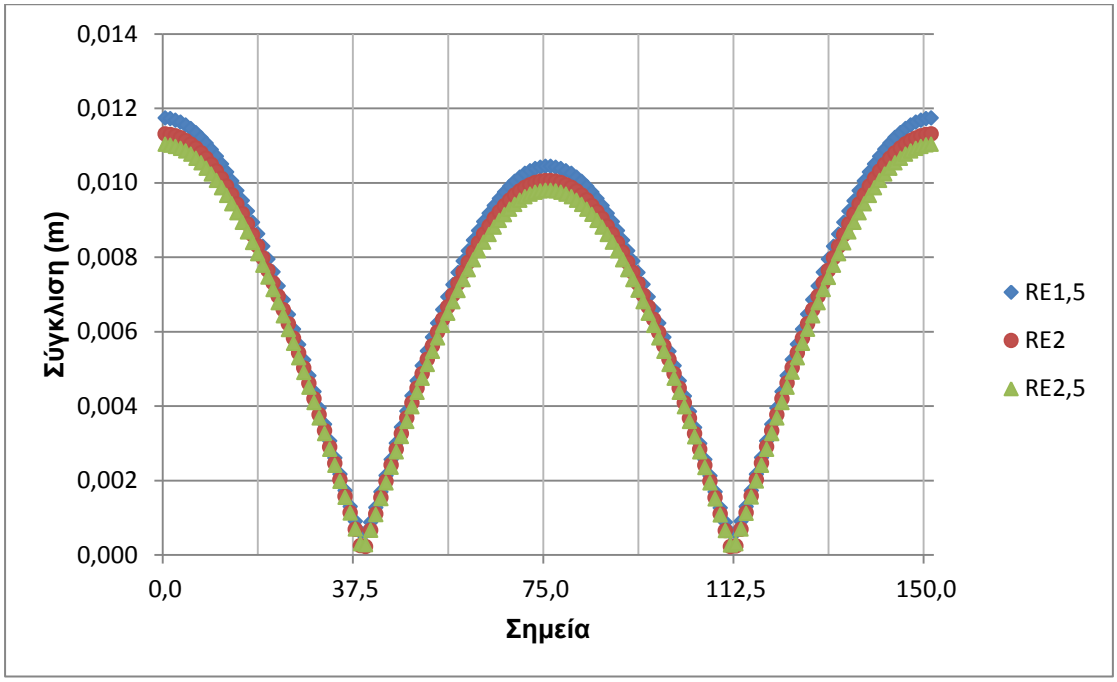
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του σχιστόλιθου καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην σειρά αναλύσεων Ε.

Πίνακας 24 Ιδιότητες του υλικού ως δεδομένα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις της σειράς Ε

Δεδομένα	**σ_{ci} (MPa)**	55	55	55
	GSI	50	50	50
	m_i	7	7	7
	D	0	0	0
	E_{2i} (GPa)	25	25	25
	E_{1i} (GPa)	16,67	12,5	10
	β (º)	90	90	90
		R_E=1,5	**R_E=2**	**R_E=2,5**
Αποτελέσματα	**m_b**	1,173	1,173	1,173
	s	0,003866	0,003866	0,003866
	a	0,5	0,5	0,5
	$\sigma_{c\beta}$ (MPa)	-	-	-
	E_{2m} (GPa)	7,68	7,68	7,68
	E_{1m} (GPa)	11,52	15,36	19,2
	v_2	0,21	0,21	0,21
	v_1	0,14	0,105	0,084
	G_m (GPa)	4,6	5,12	5,48

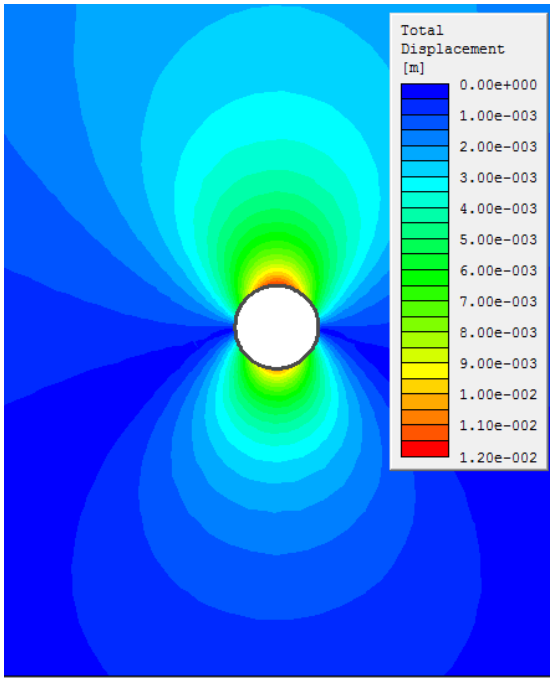
Στην συγκεκριμένη σειρά αναλύσεων θεωρήθηκε πως η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 είναι κάθετη στο επίπεδο ανισοτροπίας, δηλαδή η γωνία β είναι ίση με 90º. Στην περίπτωση αυτή το τροποποιημένο κριτήριο αστοχία συμπίπτει με το αρχικό, καθώς η παράμετρος K_β, η οποία εισέρχεται στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας με σκοπό να περιγράψει την επιρροή της ανισοτροπίας, ισούται με την μονάδα. Όπως στις δύο προηγούμενες σειρές αναλύσεων, έτσι και στην σειρά Ε, λόγω της εγκάρσια ισότροπης δομής της βραχόμαζας επιλέχθηκαν κάποιες χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την γωνία β=90º.

Στο γράφημα που παρουσιάζεται στη συνέχεια εμφανίζονται οι αναπτυσσόμενες συγκλίσεις στην περίμετρο της σήραγγας για τρείς χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη ανισοτροπίας της παραμορφωσιμότητας. Είναι εμφανές πως η μεταβολή του συγκεκριμένου δείκτη R_E δεν συνεπάγεται σπουδαίες διαφορές στις τιμές της σύγκλισης. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πως για τις δύο ακραίες τιμές του δείκτη που εξετάστηκαν, (R_E=1,5 και R_E=2,5) η διαφορά είναι της τάξης των 0,0007m, δηλαδή πρακτικά αμελητέα. Σημαντικό είναι επίσης ότι όπως και στη γωνία β ίση με 30º έτσι και σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη σύγκλιση εμφανίζεται στα σημεία της περιμέτρου στα οποία τα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας είναι εφαπτόμενα στην διατομή της σήραγγας (σημεία 0 και 75). Ακόμη παρατηρείται μηδενισμός των συγκλίσεων στα σημεία 37,5 και 112,5, στα οποία τα επίπεδα ανισοτροπίας είναι κάθετα στην περίμετρο.

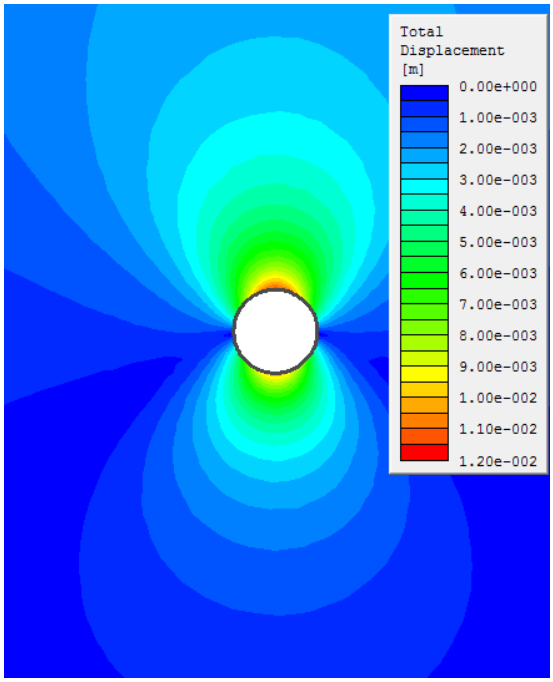


Γράφημα 27 Ανάλυση Ε - Συγκλίσεις στο τοίχωμα της σήραγγας για εύρος τιμών του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας

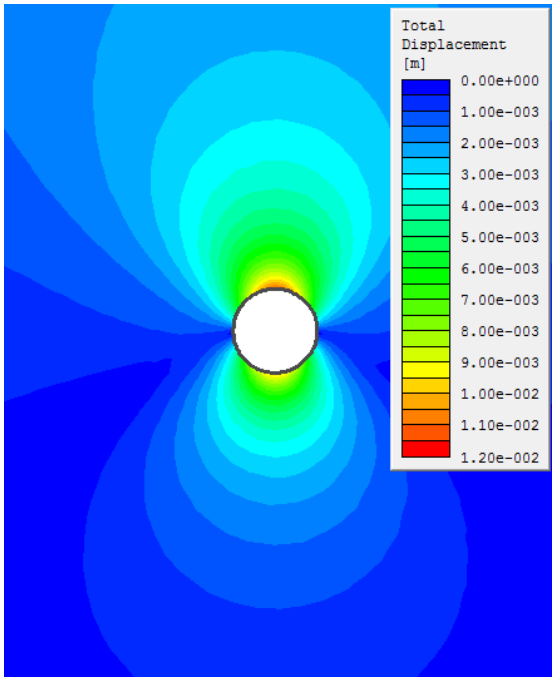
Οι εικόνες που ακολουθούν δείχνουν την κατανομή των μετακινήσεων γύρω από την σήραγγα και την μικρή επιρροή που έχει η μεταβολή της τιμής του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E ,για γωνία β ίση με 90º, στις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις.



Εικόνα 32 (αριστερά) Ανάλυση Ε - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=1,5



Εικόνα 33 (δεξιά) Ανάλυση Ε - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2



Εικόνα 34 Ανάλυση Ε - Συνολικές μετακινήσεις - R_E=2,5

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Η ενότητα αυτή εστιάζει στην σύγκριση των διαφόρων σειρών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.3. Δόθηκε έμφαση στην σύγκλιση ή απόκλιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις διαφορετικές θεωρήσεις που έγιναν προκειμένου να προσεγγιστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το θέμα της «εγγενούς» ανισοτροπίας στα πετρώματα.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εστιάζουν σε δύο κύριους άξονες οι οποίοι σχετίζονται με τον τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος της ανισοτροπίας. Ο πρώτος αναφέρεται στην χρήση του αρχικού κριτηρίου των Hoek & Brown (1980) με τη θεώρηση τόσο του ισότροπου, όσο και του εγκάρσια ισότροπου προσομοιώματος. Λόγω της αδυναμίας χρήσης ενός κριτηρίου αστοχίας που λαμβάνει άμεσα υπόψη του την ανισοτροπία, η χρήση του αρχικού κριτηρίου αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της συμπεριφοράς ενός ανισότροπου πετρώματος. Ο δεύτερος άξονας σχετίζεται με τη χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown για ισότροπο και εγκάρσια ισότροπο μέσο, και αποτελεί μια «εναλλακτική» προσέγγιση της ανισότροπης φύσης του πετρώματος.

4.4.1 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Α – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Β

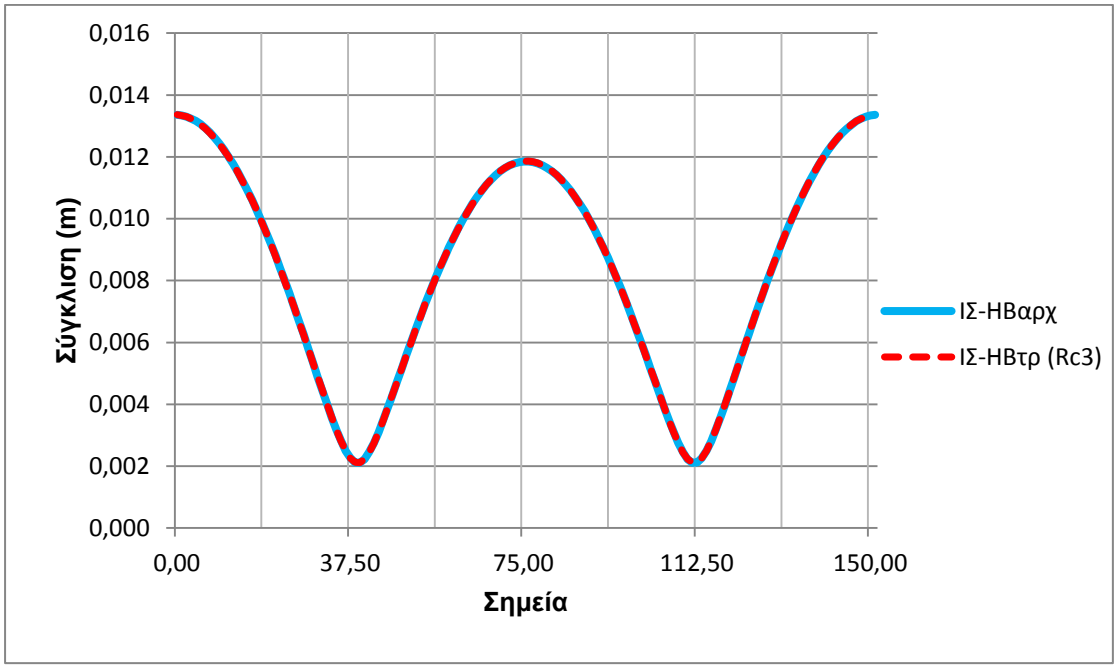
Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του **αρχικού** κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown (Σειρά Α) και του **τροποποιημένου** κριτηρίου αστοχίας (Σειρά Β) για ένα **ισότροπο** μέσο.

Στο γράφημα που ακολουθεί (γράφημα 28), όπου η συμπεριφορά της βραχόμαζας θεωρήθηκε ελαστική, είναι εμφανής η ταύτιση των αποτελεσμάτων από την χρήση των δύο κριτηρίων. Παρόλη την μεταβολή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής του πετρώματος R_c στην σειρά Β, δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στις

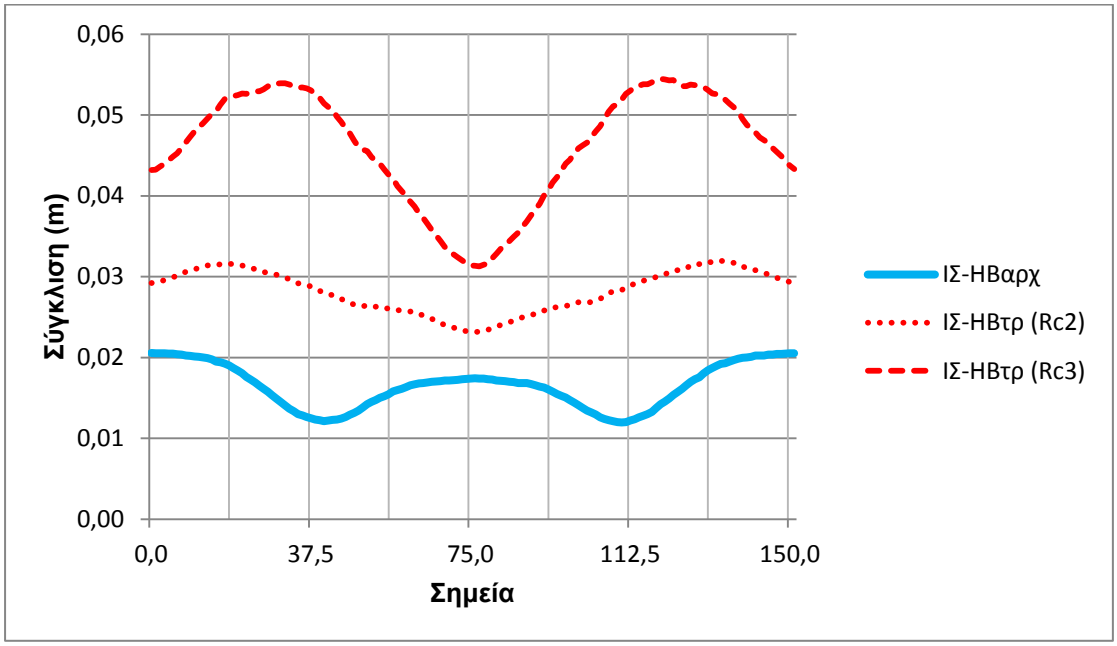
αναπτυσσόμενες συγκλίσεις. Η μεταβολή του δείκτη R_c συνεπάγεται και αλλαγή στην τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$, η οποία όμως δεν διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην απόκριση της βραχόμαζας κατά την ελαστική ανάλυση. Επομένως για την περίπτωση της ελαστικής ανάλυσης οι δύο σειρές αναλύσεων δίνουν ταυτόσημα αποτελέσματα.

Αντίθετα, σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4.3.3.2 και με βάση το γράφημα 29, όταν μελετήσουμε την ελαστοπλαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας, τυχών αύξηση του δείκτη R_c θα οδηγήσει σε αξιοσημείωτη μεταβολή στις τιμές της σύγκλισης. Η αύξηση στην τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής σημαίνει μείωση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του πετρώματος, που έχει ως αποτέλεσμα το εδαφικό στοιχείο να αστοχεί σε μικρότερη τάση και η σήραγγα να αναπτύσσει μεγαλύτερες συγκλίσεις.

Επομένως η διαφορά των αποτελεσμάτων των δύο σειρών αναλύσεων είναι εμφανής μόνο για ελαστοπλαστική ανάλυση. Η χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας (Σειρά Β) έναντι του αρχικού (Σειρά Α) για βραχόμαζα που συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά, οδηγεί μέσω του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής - ο οποίος χαρακτηρίζει στην συγκεκριμένη περίπτωση το ανισότροπο πέτρωμα - σε μεγαλύτερες τιμές συγκλίσεων, τις οποίες οφείλουμε να λάβουμε υπόψη μας κατά τον σχεδιασμό μιας σήραγγας.



Γράφημα 28 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές αναλύσεων Α και Β για ελαστική συμπεριφορά βραχόμαζας



Γράφημα 29 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές αναλύσεων Α και Β για ελαστοπλαστική συμπεριφορά βραχόμαζας

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ:

ΙΣ = Ισότροπο ΕΓΚ = Εγκάρσια Ισότροπο

ΗΒαρχ = Αρχικό κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown (1980)

ΗΒτρ = Τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown

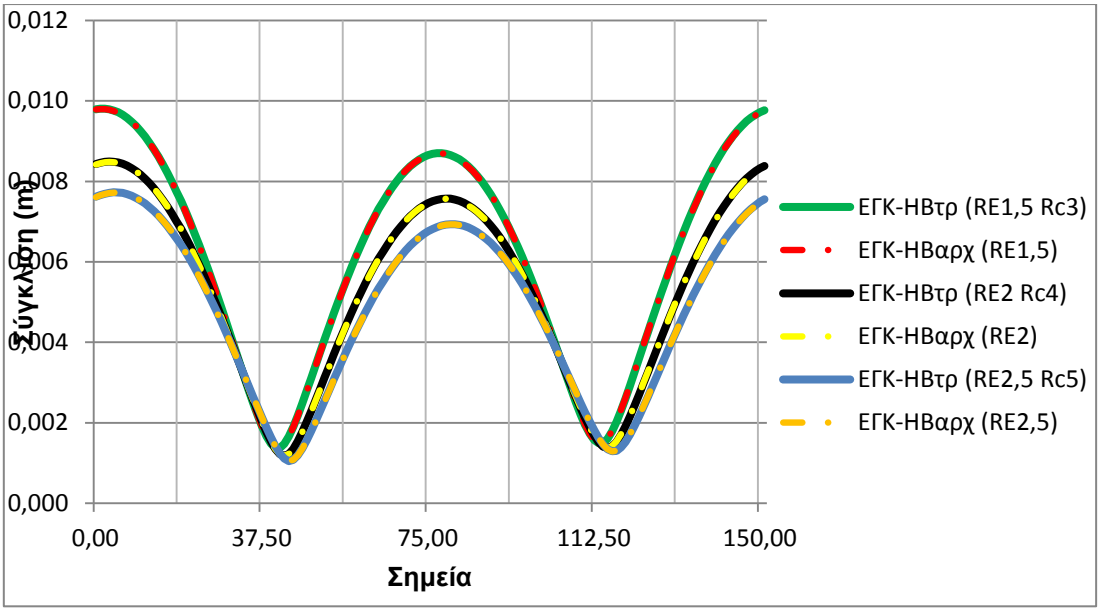
4.4.2 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ D

Οι δύο αυτές σειρές αναλύσεων εστιάζουν στο **εγκάρσια ισότροπο** προσομοίωμα κάνοντας χρήση τόσο του **αρχικού** κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown (Σειρά D), όσο και του **τροποποιημένου** (Σειρά C). Λόγω της εγκάρσια ισότροπης δομής της βραχόμαζας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 μας επιτρέπει να θεωρήσουμε μόνο ελαστική συμπεριφορά του πετρώματος, καθώς θεωρεί πως μετά τον ελαστικό κλάδο του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων του βραχώδους υλικού επέρχεται η αστοχία, ως μετακίνηση των τεμαχών επάνω στο επίπεδο της εγκάρσιας ισοτροπίας. Επομένως δεν υπάρχει περιθώριο ανάπτυξης πλαστικοποιημένων στοιχείων στην βραχόμαζα. Αυτός είναι και ο κυρίαρχος λόγος για τον οποίο οι δύο σειρές αναλύσεων, όπως θα παρατηρείται και στο γράφημα 30, μας δίνουν τις ίδιες τιμές σύγκλισης της σήραγγας για την ίδια τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E.

Είναι σημαντικό να τονισθεί πως για να είναι λογικά τα αποτελέσματα που θέτουμε σε σύγκριση, έχει ληφθεί υπόψη το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε στην παράγραφο 3.5 με βάση το οποίο ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής R_c είναι στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδόν διπλάσιος από τον δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E. Έτσι συσχετίστηκαν οι δύο παράμετροι για την σειρά

αναλύσεων C (π.χ. R_E=1,5 => R_c=3) και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που έγινε αφορούσε στην ίδια τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E της σειράς D (π.χ. R_E=1,5).

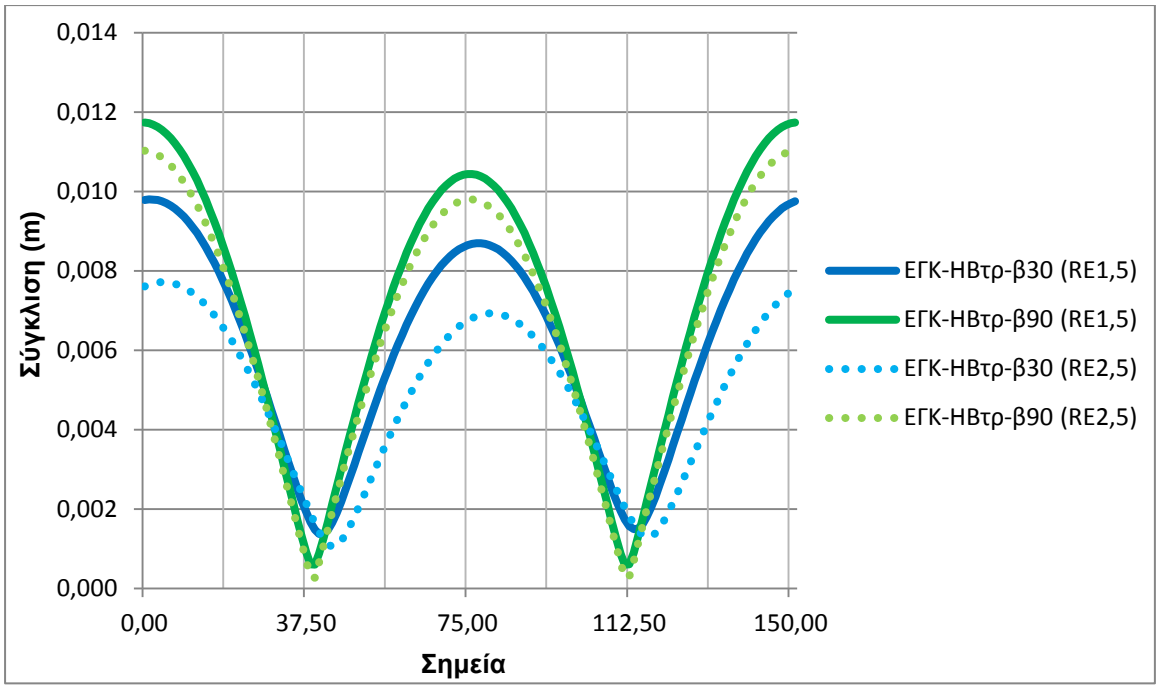
Υποθέτοντας πως στο εγκάρσια ισότροπο προσομοίωμα η βραχόμαζα έχει την δυνατότητα να αναπτύξει πλαστική συμπεριφορά, θα περιμέναμε διαφορετικές τιμές συγκλίσεων από τις δύο σειρές αναλύσεων ακόμη και για την ίδια τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E. Στην περίπτωση αυτή και στην ανάλυση C, όπου γίνεται χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown, η μεταβολή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c (η οποία συμβαδίζει με τον δείκτη R_E) θα οδηγούσε σε μείωση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του πετρώματος και επομένως σε αύξηση των συγκλίσεων της σήραγγας.



Γράφημα 30 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές αναλύσεων C και D

4.4.3 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ E

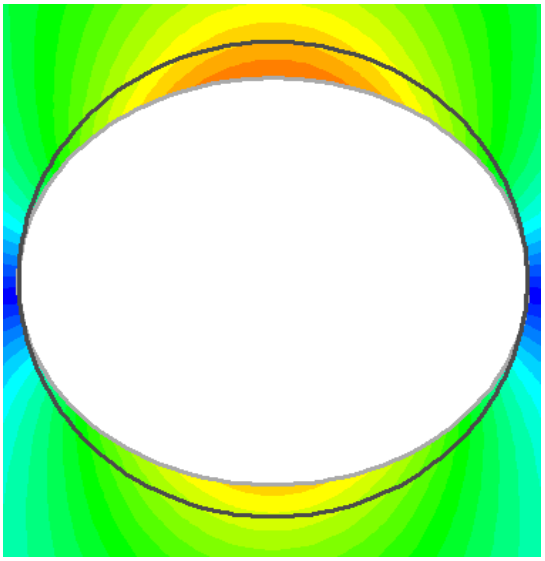
Σκοπός της συγκεκριμένης σύγκρισης είναι να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την σπουδαιότητα της **γωνίας β** που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο ανισοτροπίας και πώς αυτή επηρεάζει το μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων.



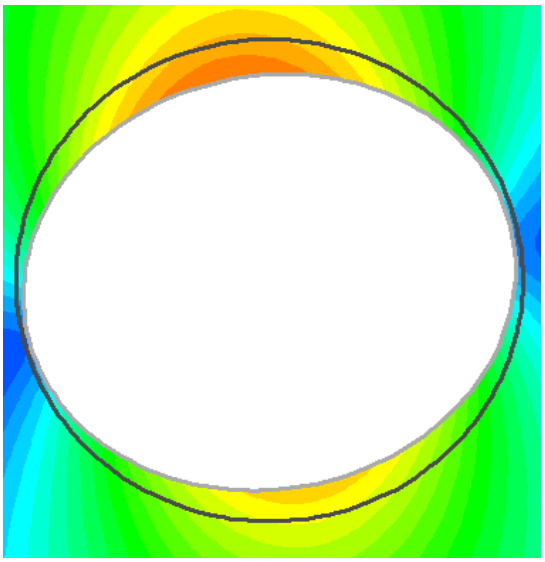
Γράφημα 31 Σύγκριση των συκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές C και E

Κατά τη διάνοιξη σήραγγας σε στρωσιγενή βραχόμαζα (όπως και στην περίπτωση της εγκάρσια ισότροπης δομής) οι μετατοπίσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα κατά την περίμετρο της σήραγγας αλλά επηρεάζονται από την ύπαρξη των επιφανειών ανισοτροπίας. Σύμφωνα με τους Fortsakis et al. (2012) κάθε στρώμα ακολουθεί λειτουργία καμπτώμενης δοκού, αυξάνοντας τις συγκλίσεις στις περιοχές της σήραγγας όπου τα στρώματα είναι πρακτικά εφαπτόμενα στην περίμετρο. Παρόμοια συμπεριφορά αναπτύσσει η βραχόμαζα και στην περίπτωση της εγκάρσιας ισότροπης δομής, όπου τα στρώματα ορίζονται από τις επιφάνειες της ανισοτροπίας.

Παρατηρώντας το γράφημα 31 γίνεται εμφανής η επιρροή της γωνίας β στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα είναι αντιληπτό πως όταν η γωνία β ισούται με 90° (οριζόντια επίπεδα) η σύγκλιση λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με εκείνη των 30°. Ακόμη, με βάση και τις εικόνες 34, 35 αντιλαμβάνεται κανείς πως η μέγιστη σύγκλιση εμφανίζεται στα σημεία όπου τα επίπεδα ανισοτροπίας εφάπτονται στην διατομή της σήραγγας. Έτσι για τη γωνία ανισοτροπίας β=30° το σημείο που μετακινείται περισσότερο είναι το 12,5 (και το αντιδιαμετρικό του), ενώ στην περίπτωση των οριζόντιων επιπέδων ανισοτροπίας η στέψη είναι εκείνη που εμφανίζει τη μέγιστη σύγκλιση.



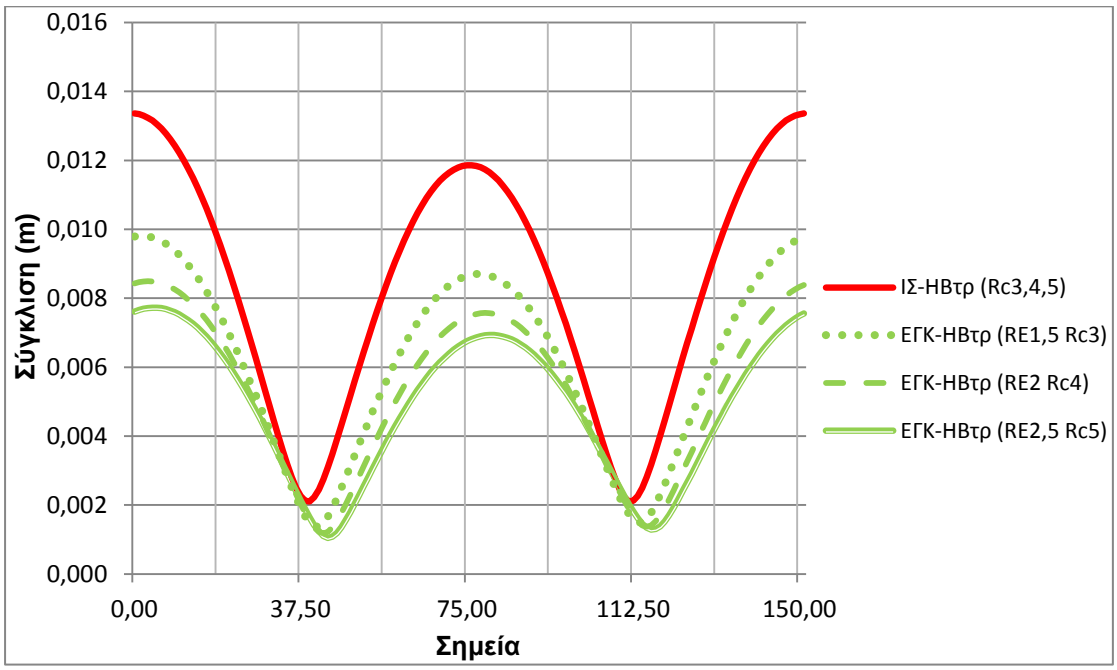
Εικόνα 35 Ανάλυση Ε, β=90º - Παραμόρφωση διατομής σήραγγας - R_E=2,5



Εικόνα 36 Ανάλυση C, β=30º - Παραμόρφωση διατομής σήραγγας - R_E=2,5

4.4.4 ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Β – ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ C

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση του **τροποποιημένου** κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown για **ισότροπη** και **εγκάρσια** ισότροπη βραχόμαζα. Σκοπός της συγκεκριμένης σύγκρισης είναι η ερμηνεία της σημασίας του προσομοιώματος των αναλύσεων και κατά πόσο αυτό προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά της βραχόμαζας.



Γράφημα 32 Σύγκριση των συγκλίσεων που προκύπτουν από τις σειρές Β και C

Στο γράφημα 32 είναι εμφανής η μείωση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων της σήραγγας καθώς μεταβαίνουμε από το ισότροπο στο εγκάρσια ισότροπο προσομοίωμα. Παρατηρώντας το γράφημα φαίνεται πώς η μέγιστη διαφοροποίηση των συγκλίσεων προκύπτει στα σημεία όπου οι επιφάνειες «εγγενούς» ανισοτροπίας εφάπτονται στη διατομή της σήραγγας. Αντίθετα στα σημεία όπου η επιφάνεια των επιπέδων είναι κάθετη στη διατομή οι τιμές των δύο μοντέλων συγκλίνουν, γεγονός που καταδεικνύει την επιρροή της γωνίας ανισοτροπίας β. Οι προαναφερθέντες διαφοροποιήσεις στις τιμές των συγκλίσεων οφείλονται στην κάμψη που αναπτύσσεται στα στρώματα που βρίσκονται μεταξύ των επιφανειών ανισοτροπίας (κοντά στα σημεία 12,5 και 87,5), καθώς και στην δυνατότητα σχετικής ολίσθησης στην επιφάνειά τους. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός πως η θεώρηση του ανισότροπου πετρώματος ως ισότροπου κατά την μελέτη με το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας, μας δίνει μεγαλύτερες συγκλίσεις σε σχέση με την θεώρηση του προσομοιώματος ως εγκάρσια ισότροπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διπλωματική εργασία εστιάζουν στη σημαντικότητα και την επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας στη συμπεριφορά των πετρωμάτων, και προέκυψαν τόσο από την έρευνα του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown όσο και από τις σειρές αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία που πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση διάνοιξης σήραγγας σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα.

Στην εισαγωγή της παρούσας έρευνας θεωρήθηκε απαραίτητο να προσδιοριστεί ο όρος «ανισοτροπία πετρωμάτων» και να εντοπιστούν τα πετρώματα στα οποία είναι αναμενόμενη η παρουσία της. Η ανισοτροπία είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των μεταμορφωμένων και ιζηματογενών στρωσιγενών πετρωμάτων και οφείλει την ύπαρξή της στη διαδικασία γένεσης τους. Ακόμη το πέτρωμα που χαρακτηρίζεται ως «εγγενώς» ανισότροπο παρουσιάζει ιδιότητες, όπως μηχανικές, δυναμικές, φυσικές κ.λπ., που μεταβάλλονται ανάλογα με τη διεύθυνση καταπόνησης.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας δεδομένα τριαξονικών δοκιμών από τη βιβλιογραφία, παρατηρήθηκε η επιρροή που ασκεί η «εγγενής» ανισοτροπία στην αντοχή του πετρώματος για μεταβλητό προσανατολισμό των επιπέδων ανισοτροπίας (β). Η μονοαξονική θλιπτική αντοχής ($\sigma_{c\beta}$) μεταβάλλεται με τη γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 με το επίπεδο «εγγενούς» ανισοτροπίας. Παρατηρήθηκε πως η γωνία στην οποία παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της αντοχής είναι συνήθως αυτή των 30°, ενώ αντίθετα η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται για φόρτιση κάθετα στα επίπεδα «εγγενούς» ανισοτροπίας.

Με βάση την ανάλυση των δεδομένων δοκιμών προέκυψε η αντιστρόφως ανάλογη σχέση που συνδέει τον δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c με την παράμετρο $K_{\beta min}$ όπως παρουσιάζεται στο γράφημα 4. Το συμπέρασμα αυτό καταδεικνύει τη σημασία της παραμέτρου $K_{\beta min}$ για την επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας, που έχει εισαχθεί στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown που έχει προταθεί από τον Σαρόγλου (2007) και αργότερα από τους Saroglou & Tsiambaos (2008). Γίνεται αντιληπτό πως όσο λιγότερο ανισότροπο είναι ένα πέτρωμα τόσο πιο κοντά στη μονάδα θα είναι η τιμή της παραμέτρου $K_{\beta min}$, και κατ' επέκταση το τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown μεταπίπτει στην αρχική του μορφή. Άλλωστε και το γράφημα 5 ενισχύει την παραπάνω άποψη καθώς παρουσιάζει πως η μεταβολή στην τιμή της παραμέτρου K_β είναι συνάρτηση του προσανατολισμού (β°).

Επιπλέον παρατηρώντας το γράφημα 6 είναι εμφανές ότι η επίδραση της «εγγενούς» ανισοτροπίας στην αντοχή του πετρώματος κατά την αστοχία είναι μικρότερη όσο αυξάνει η πλευρική τάση (σ_3). Το γράφημα αυτό παρουσιάζει την μείωση του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής ενός πετρώματος με ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής τάσης. Η πλευρική τάση δεν επιτρέπει την αστοχία του πετρώματος κατά το επίπεδο ανισοτροπίας και επομένως δυσκολεύει την αστοχία του εργαστηριακού δοκιμίου που υπόκεινται σε τριαξονική δοκιμή.

Ακόμη με βάση το γράφημα 19 προκύπτει τι συμπέρασμα ότι στην πλειοψηφία των πετρωμάτων ο δείκτης ανισοτροπίας της παραμορφωσιμότητας (R_E) είναι ίσος ή μικρότερος από τον δείκτη ανισοτροπίας της αντοχής (R_c), με ελάχιστες εξαιρέσεις. Επομένως θεωρώντας κανείς πως οι δύο δείκτες ανισοτροπίας ταυτίζονται σε ένα πέτρωμα, ενδεχόμενος να οδηγηθεί σε λανθασμένα αποτελέσματα κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός ανισότροπου πετρώματος. δηλαδή οι δύο δείκτες δεν πρέπει να ταυτίζονται.

Επίσης είναι σημαντικό να επισημανθεί πως η θεώρηση του εγκάρσια ισότροπου μοντέλου είναι ευρέως αποδεκτή για την ανάλυση σε ιζηματογενή και απλά μεταμορφωμένα πετρώματα. Για την περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου μέσου έχει γίνει αναφορά στο υποκεφάλαιο 3.6 στη χρήση ενός τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown (Σαρόγλου, 2013), το οποίο έχει εφαρμογή σε βραχόμαζα που εμφανίζει εγκάρσια ισότροπη συμπεριφορά.

Στο κριτήριο αυτό εισάγονται οι παράμετροι $m_{b,an}$ και S_{an} , των οποίων η τιμή μειώνεται καθώς η δομή της βραχόμαζας και η ποιότητα των επιφανειών ανισοτροπίας γίνεται πτωχή (δηλαδή κινούμαστε προς τα κάτω και προς τα δεξιά στον πίνακα GSI για τα μεταμορφωμένα πετρώματα). Η τιμή των παραμέτρων αυτών μπορεί εύκολα να υπολογιστεί μέσω των γραφημάτων που παρουσιάζονται στην ενότητα 3.3 και τα οποία προέκυψαν για ένα εύρος τιμών του:

- ✓ Δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c
- ✓ του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI
- ✓ της παραμέτρου m_i

Επομένως μέσω των γραφημάτων αυτών μπορούμε για οποιοδήποτε ανισότροπη βραχόμαζα να υπολογίσουμε την τιμή των παραμέτρων $m_{b,an}$ και S_{an}. Οι συγκεκριμένες παράμετροι εισάγουν την επιρροή της «εγγενούς» ανισοτροπίας στο τροποποιημένο κριτήριο αστοχίας Hoek & Brown για τη βραχόμαζα.

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της εγκάρσια ισότροπης βραχόμαζας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PHASE2 (Rocscience Ltd). Τα προσομοιώματα που εξετάστηκαν αφορούσαν σε ισότροπο και εγκάρσια ισότροπο μέσο, ενώ έγινε χρήση του αρχικού και του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown.

Όσων αφορά στα συμπεράσματα στα οποία οδηγηθήκαμε μέσω των αναλύσεων, είναι σημαντικό να επισημανθεί η ιδιαίτερη βαρύτητα της ποιότητας της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη σήραγγας εντός αυτής. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η τιμή του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI, οι μετακινήσεις στα τοιχώματα της σήραγγας τείνουν να μειωθούν, ο βολβός των μετακινήσεων πέριξ της σήραγγας και η ακτίνα της πλαστικής ζώνης περιορίζεται.

Ακόμη, ιδιαίτερα σημαντική είναι η σύγκριση των δύο κριτηρίων αστοχίας:

- ✓ Του κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown (1980), και
- ✓ Του τροποποιημένου για εφαρμογή σε εγκάρσια ισότροπη βραχόμαζα (Σαρόγλου 2013).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε πως για ελαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας, οι τιμές των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων ταυτίζονται, και επομένως δεν διαφοροποιείται η συμπεριφορά με τη χρήση των δύο διαφορετικών κριτηρίων.

Επίσης τα δύο κριτήρια αστοχίας εφαρμόστηκαν τόσο σε ισότροπο όσο και σε εγκάρσια ισότροπο μέσο. Στην περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου, όπου το πέτρωμα μπορεί να συμπεριφερθεί μόνο ελαστικά, τα δύο κριτήρια έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα καθώς στην ελαστική ανάλυση κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζει το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας, Em, και όχι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή αυτής.

Αντίθετα, στην περίπτωση του ισότροπου μέσου και για πλαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας, όπου μέσω του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c μεταβαλλόταν η τιμή της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c\beta}$ του πετρώματος, η χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας οδήγησε σε μεγαλύτερες τιμές αναπτυσσόμενων συγκλίσεων. Συμπερασματικά, η διαφορά των δύο κριτηρίων αστοχίας είναι εμφανής μόνο για ελαστοπλαστική ανάλυση ισότροπου μέσου.

Σε συνέχεια με βάση την παραπάνω παρατήρηση, εντοπίσθηκε πως η μεταβολή στην τιμή του δείκτη ανισοτροπίας αντοχής R_c (με χρήση του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας) δεν οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα συγκλίσεων στην περίπτωση ανάλυσης με ελαστική συμπεριφορά. Αντίθετα, στην περίπτωση της ελαστοπλαστικής ανάλυσης, η αύξηση του δείκτη R_c συνεπάγεται μείωση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και επομένως αύξηση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται από το γεγονός πως ο δείκτης ανισοτροπίας αντοχής και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο όταν η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά, (η βραχόμαζα μπορεί να οδηγηθεί σε αστοχία σε αντίθεση με την ελαστική ανάλυση, όπου δεν επέρχεται αστοχία).

Επιπρόσθετα, όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4, η θεώρηση του εγκάρσια ισότροπου μέσου δίνει την δυνατότητα να ληφθεί άμεσα υπόψη η επιρροή της ανισοτροπίας μέσω των μέτρων ελαστικότητας E_1 και E_2 που χαρακτηρίζουν τα επίπεδα εγκάρσιας ισοτροπίας. Μέσω των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι μεταβολή στην τιμή του δείκτη ανισοτροπίας παραμορφωσιμότητας R_E οδηγεί σε διαφοροποίηση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από την μεταβολή της τιμής των μέτρων ελαστικότητας E_1 ή E_2, καθώς αλλάζει ο δείκτης RE. Έτσι, στην περίπτωση όπου τα επίπεδα ανισοτροπίας σχηματίζουν γωνία β=30º με την διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1, κυρίαρχο ρόλο στην συμπεριφορά της βραχόμαζας διαδραματίζει το μέτρο ελαστικότητας E_1 , καθώς είναι παράλληλο στο επίπεδο ανισοτροπίας, και άρα τυχών αύξηση της τιμής αυτού με

ταυτόχρονα σταθερή τιμή του μέτρου παραμορφωσιμότητας E_2, θα οδηγήσει σε μείωση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων. Αντίθετα στην περίπτωση κατά την οποία τα επίπεδα ανισοτροπίας έχουν προσανατολισμό β=90º, οι τιμές των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων δεν διέφεραν αισθητά για τυχών μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας E_1, καθώς η διεύθυνση του είναι κάθετη στον άξονα της φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή, κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζει το μέτρο ελαστικότητας E_2, του οποίου η διεύθυνση είναι κάθετη στα επίπεδα ανισοτροπίας και άρα παράλληλη στο άξονα της φόρτισης, και τυχών μείωση της τιμής του θα συμβάλλει στην αύξηση των αναπτυσσόμενων συγκλίσεων. Είναι λοιπόν εμφανές πως το μέτρο ελαστικότητας που επηρεάζει πιο έντονα την συμπεριφορά της εγκάρσιας ισότροπης βραχόμαζας είναι αυτό που βρίσκεται πιο «κοντά» στον άξονα της φόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ajalloeian R, Lashkaripour R.G., 2000, *Strength anisotropies in mudrocks*. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 59. p 195-199.

Allirot D., Boehler J.P. & Sawczuk A., 1977, *Irreversible Deformations of an anisotropic rock under hydrostatic pressure.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.14, pp. 77-83.

Behrestaghi M.H.N., Rao K.S. and Ramamurthy, T., 1996, *Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India*, Engineering Geology 44, pp. 183-201.

Berry P., Crea G., Martino D. & Ribacchi R., 1974, *The influence of fabric on the deformability of anisotropic rocks. Advances in Rock Mechanics*. Proc. of 3rd Int. Congr. Rock Mech., Denver, Vol.2, pp. 105-110.

Bozorgzadeh N., Harrison J. P., 2014, *Heteroscedasticity of axial strength of transversely anisotropic rock*, Geotechnique Letters Vol. 4, p.322-329

Brosch F.J., Schachner K., Blumel M., Fasching A. & Fritz H., 2000*, Preliminary investigation results on fabrics and related physical properties of an anisotropic gneiss*. Journal of Structural Geology, Vol. 22, 1773-1787

Diyuan Li, Louis Ngai Yuen Wong, Gang Liu, Xiaoping Zhang, 2012, *Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression,* Engineering Geology Vol.126, p.46-66

Fortsakis P., Nikas V., Marinos V., Marinos P., 2012, *Anisotropic behavior of stratified rock masses in tunneling*, Engineering Geology Vol. 141-142, p.74-83

Gatelier N., Pellet F., Loret B., 2002, *Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial loading.* Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol.39, pp. 335-354.

Gholami & Rasouli, 2013, *Mechanical and Elastic Properties of Transversely Isotropic Slate,* Rock Mech Rock Eng (2014) 47:1763–1773

Hakala M., Kuula H., Hudson J., 2005, *Strength and Strain Anisotropy of Olkiluoto Mica greiss.* Posiva

Hoek E., Brown E.T., 1997, *Practical estimates of rock mass strength,* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, No8, p. 1165-1186

Hoek E., Karzulovic A., 2000, *Rock mass properties for surface mines*, Published in Slope Stability in Surface Mining, p. 59-70

Hoek, E. & Brown, E.T., 1980, *"Underground Excavations in Rock".* Institution of Mining and Metallurgy, London.

J.-W. Cho, H. Kim, S. Jeon, K.B. Min, 2012, *Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist,* International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 50 158–169

Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W., 2007, *Fundamental of Rock Mechanics,* Blackwell Publishing

Mohamed A. Ismael, Hassan F. Iman, Yasser El-Shayeb, 2014, *A simplified approach to directly consider intact rock anisotropy in Hoek-Brown failure criterion,* Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 6, p.486-492

Mojtaba Asadi, Mohammad Hossein Bagheripour, 2014, *Modified criteria for sliding and non-sliding failure of anisotropic jointed rocks,* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 73, p. 95-101

Pomeroy C.D., Hobbs D.W. & Mahmoud A., 1971, *The effect of weakness-plane orientation on the fracture of Barnsley Hards by triaxial compression*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 8, p. 227-238. Pergamon Press.

Read S.A.L., Perrin N.D. & Brown I.R., 1987, *Measurement and analysis of laboratory strength and deformability characteristics of schistose rock*. Proc. of 6th Int. Congr. Rock Mechanics, Vol.1, Montreal, p.233-238.

Rocscience Inc., 1998 - 2001, *PHASE2 Model Program Reference Manual,* p. 132

Rocscience Ltd., *PHASE2 Software Manual*

Saeidi O., Vaneghi R.G., Rasouli V., Gholami R., Torabi S.R., 2013, *A modified failure criterion for transversely isotropic rocks*, Geoscience Frontiers xxx, p. 1-11

Saroglou H., Tsiambaos G., 2008, *A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45, p. 223-234

Saroglou, H., 2013, *Engineering behaviour of anisotropic rocks. Global View of Engineering Geology and the Environment* – Proc. of the Int. Symposium and 9th Asian Regional Conference of IAEG, Beijing, China (invited lecture).

Singh M., Samadhiya N. K., Kumar A., Kumar V., Singh B., 2015, *A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks,* Rock Mech Rock Eng, Springer-Verlag Wien 2015

Zhang X., Yang F., Yang J., 2010, *Experimental Study on Anisotropic Strenght Properties of Sandstones*, Vol 15, p. 1325-1335

Κούκης Γ., Σαμπατακάκης Ν., 2007, *Γεωλογία Τεχνικών Έργων,* Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Νίκου Δ., 2014, *Διάνοιξη Σήραγγας σε περιβάλλον Ασθενούς Βραχόμαζας με Ισχυρό Υπερκείμενο Στρώμα,* Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.

Σαρόγλου Χ., 2007, *Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις γεωτεχνικές ιδιότητες του βράχου,* Διδακτορική διατριβή σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Γεωτεχνικής

Σαρόγλου Χ., Μαρίνος Π., Τσιαμπάος Γ., 2004, *Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Η επίδραση της ανισοτροπίας,* Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, (Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2004)

Σαρόγλου Χ., Μαρίνος Π., Τσιαμπάος Γ., 2006, *Ταξινόμηση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων με βάση τον βαθμό ανισοτροπίας τους,* 5^{ο} Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Γεωτεχνικής, (Ξάνθη, 2006)

Τζιάλλας Γ., 2010, *Μηχανικά Χαρακτηριστικά & Γεωτεχνική Συμπεριφορά Ετερογενούς Βραχόμαζας,* Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.

Τσιαμπάος Γ., 2009, *Νεότερες απόψεις για τις παραμέτρους μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων,* Ελληνική Επιστημονική Εταιρία Εδαφομηχανικής & Γεωτεχνικής Μηχανικής

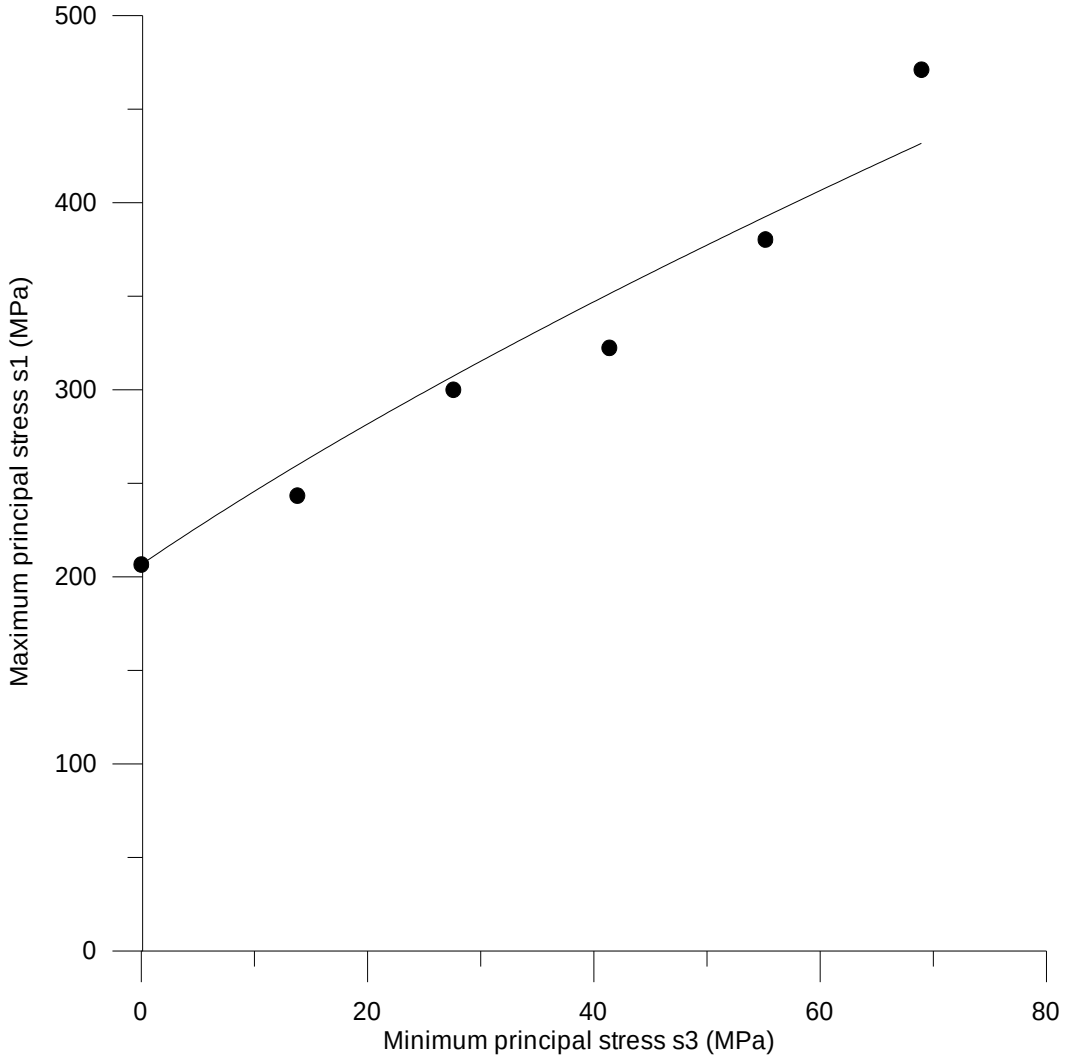
Τσιαμπάος Γ., Καββαδάς Μ., 2014, *Βραχομηχανική Σήραγγες - Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος,* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Χριστοφίδης Γ., 2002, *Σημειώσεις Ορυκτολογίας – Ασκήσεις,* Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

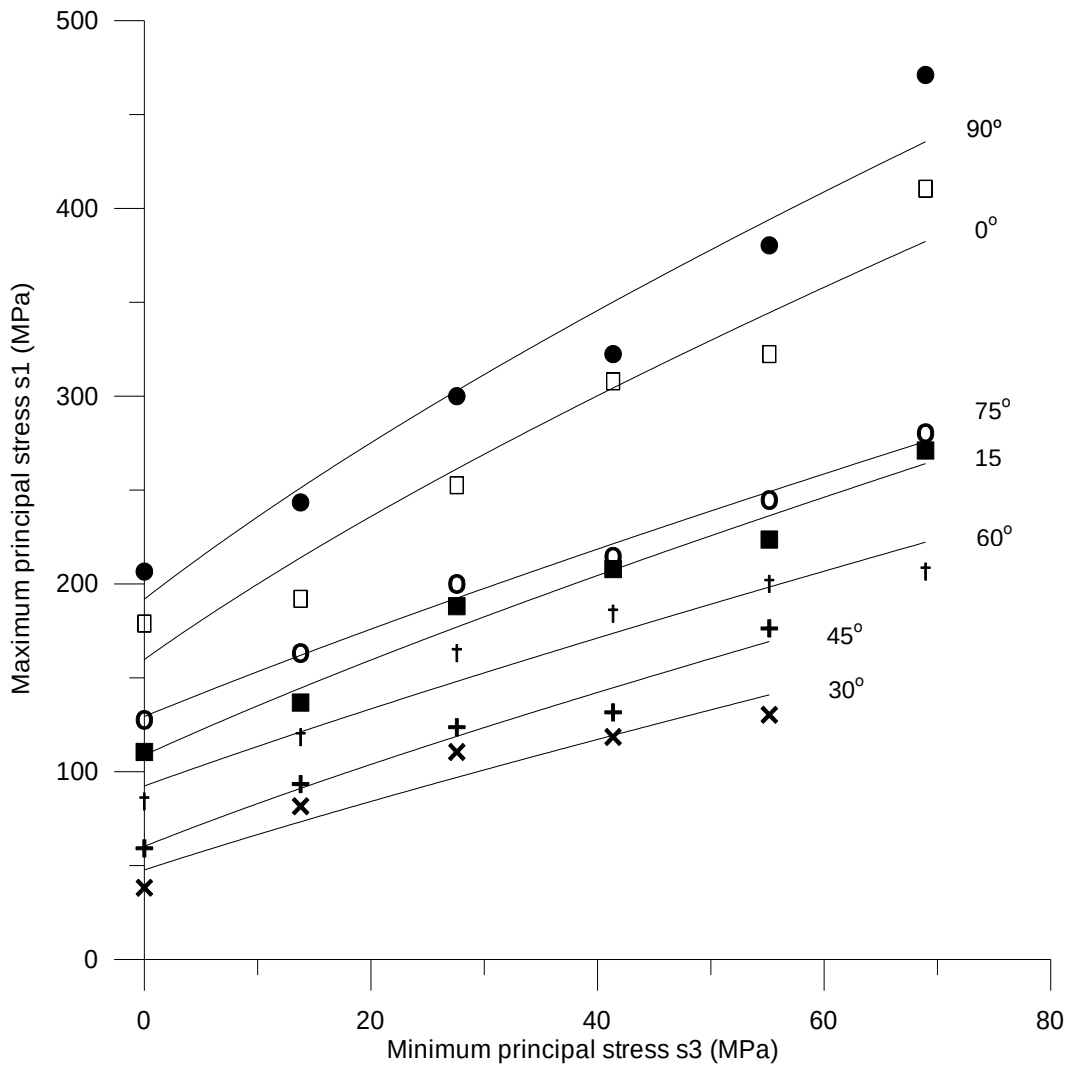
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α’

Στο παράρτημα Α εμφανίζονται τα γραφήματα που προέκυψαν από την διαδικασία της καλύτερης προσαρμογής (best fitting) του τροποποιημένου κριτηρίου αστοχίας, των Σαρόγλου και Τσιαμπάου (2008), στα εργαστηριακά δεδομένα τριαξονικών δοκιμών που εκτελεστήκαν σε πετρώματα τα οποία χαρακτηρίζονται από «εγγενή» ανισοτροπία. Μέσω της διαδικασίας αυτής επετεύχθη ο προσδιορισμός τόσο της σταθεράς m_i όσο και της παραμέτρου K_β. Για κάθε ένα πέτρωμα παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές της παραμέτρου Kβ σε κάθε γωνία β, ενώ στο τέλος του παραρτήματος παρατίθεται ένας επιπρόσθετος πίνακας με τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών σε κάθε πέτρωμα, τα οποία αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία.

Σχιστόλιθος Penhryn (Attewell & Sandford 1974)



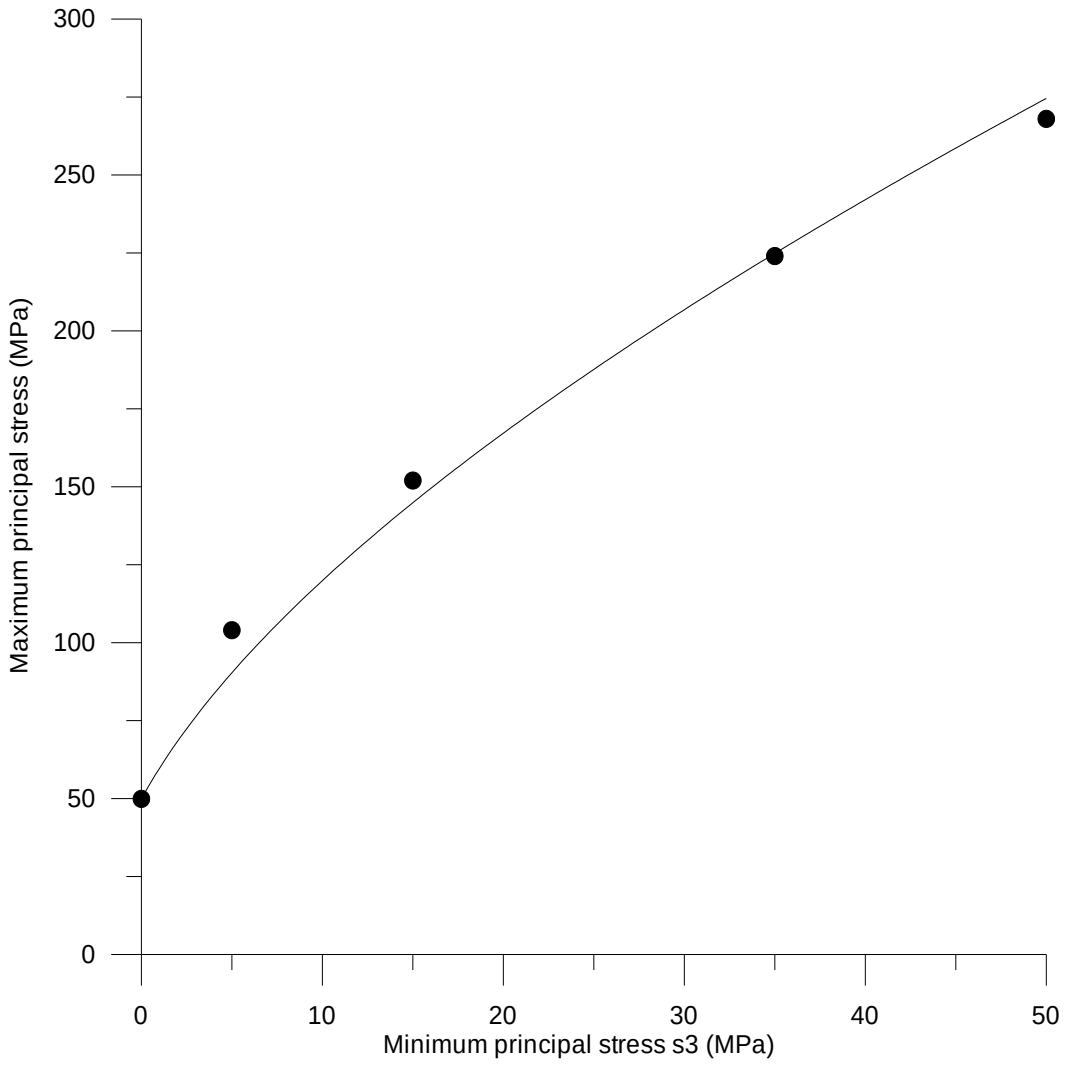
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=6,24)



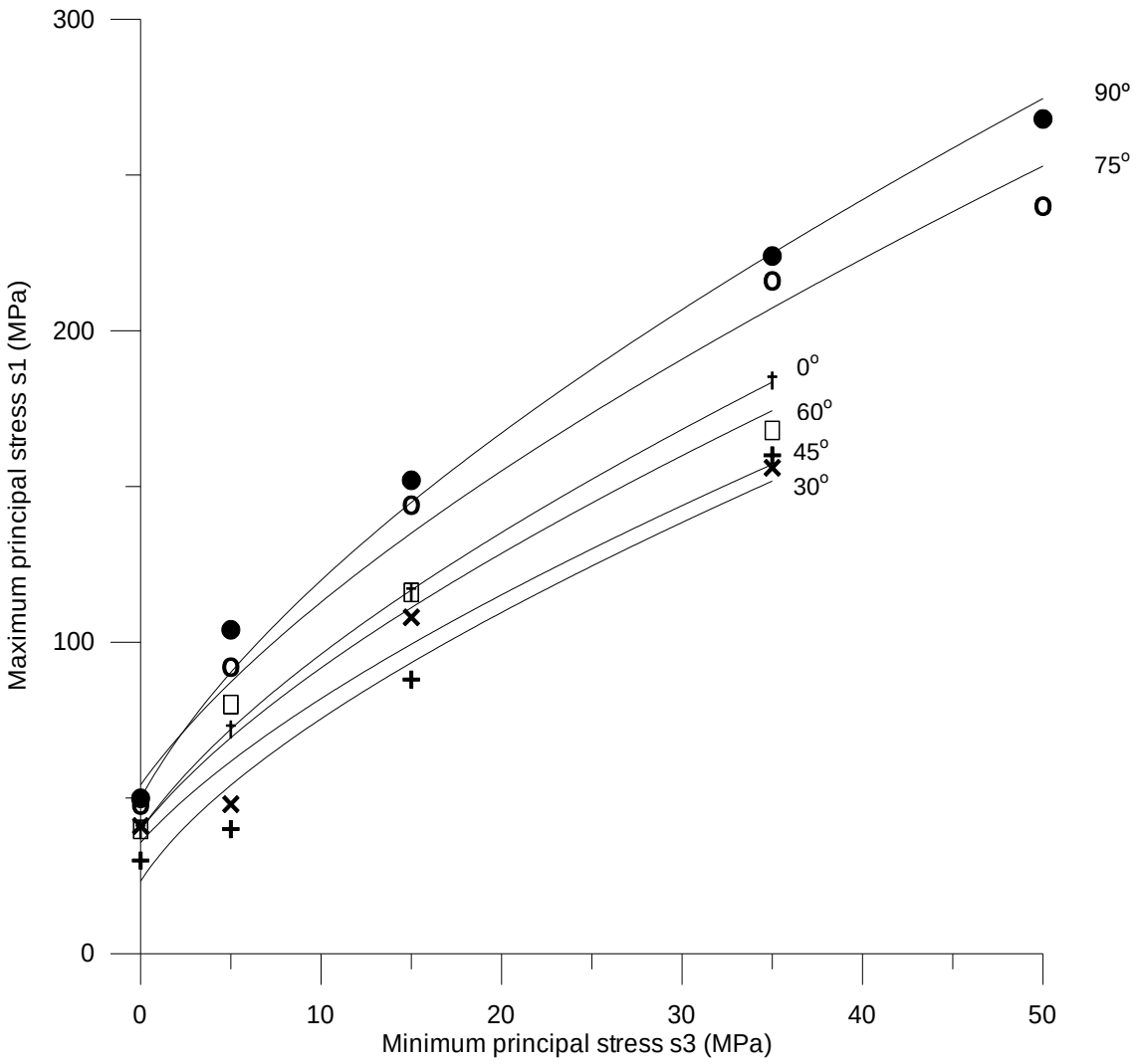
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	1,06
15	0,56
30	0,31
45	0,45
60	0,38
75	0,47
90	1

Βιοτιτικός σχιστόλιθος (Behrestaghi 1996)



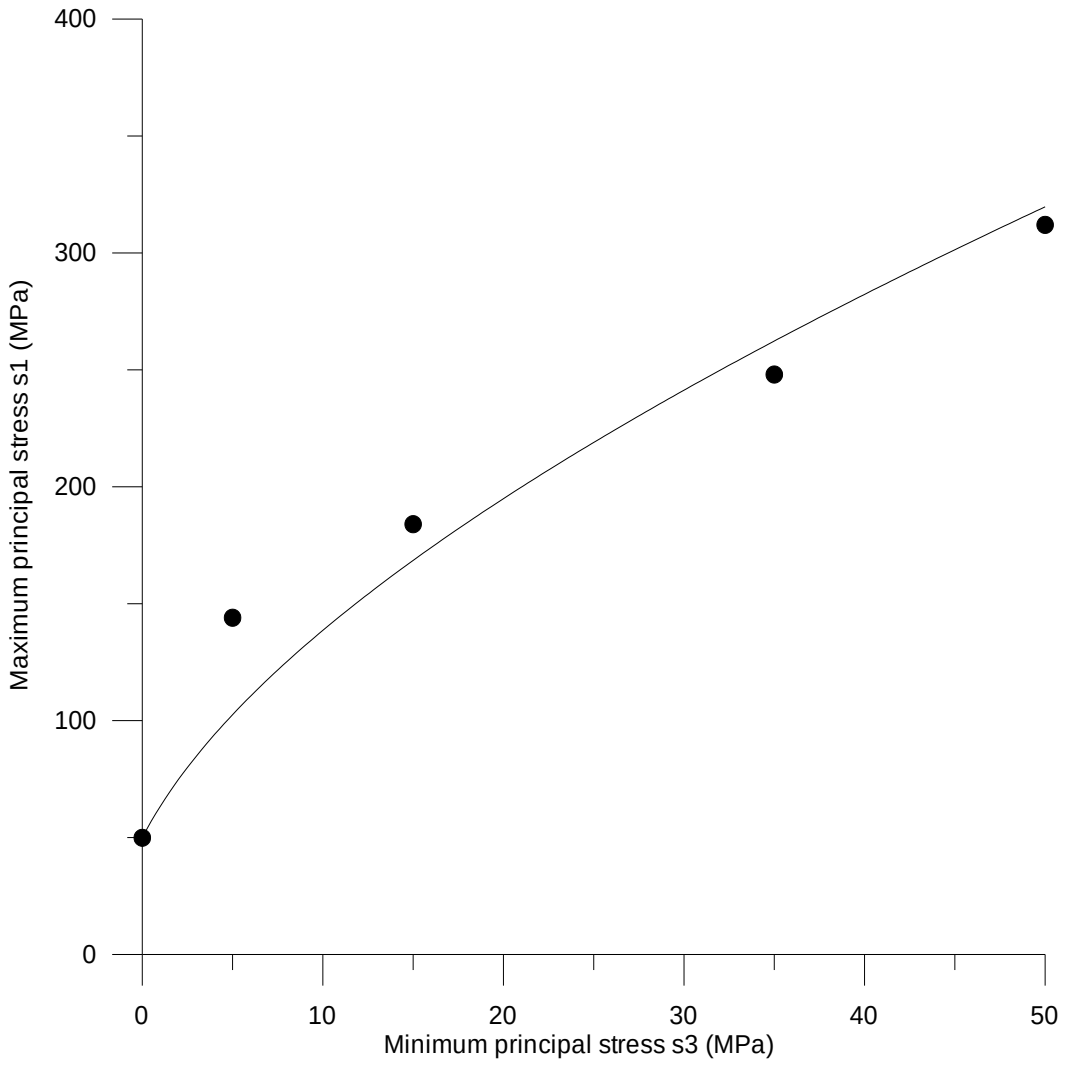
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=19,2)



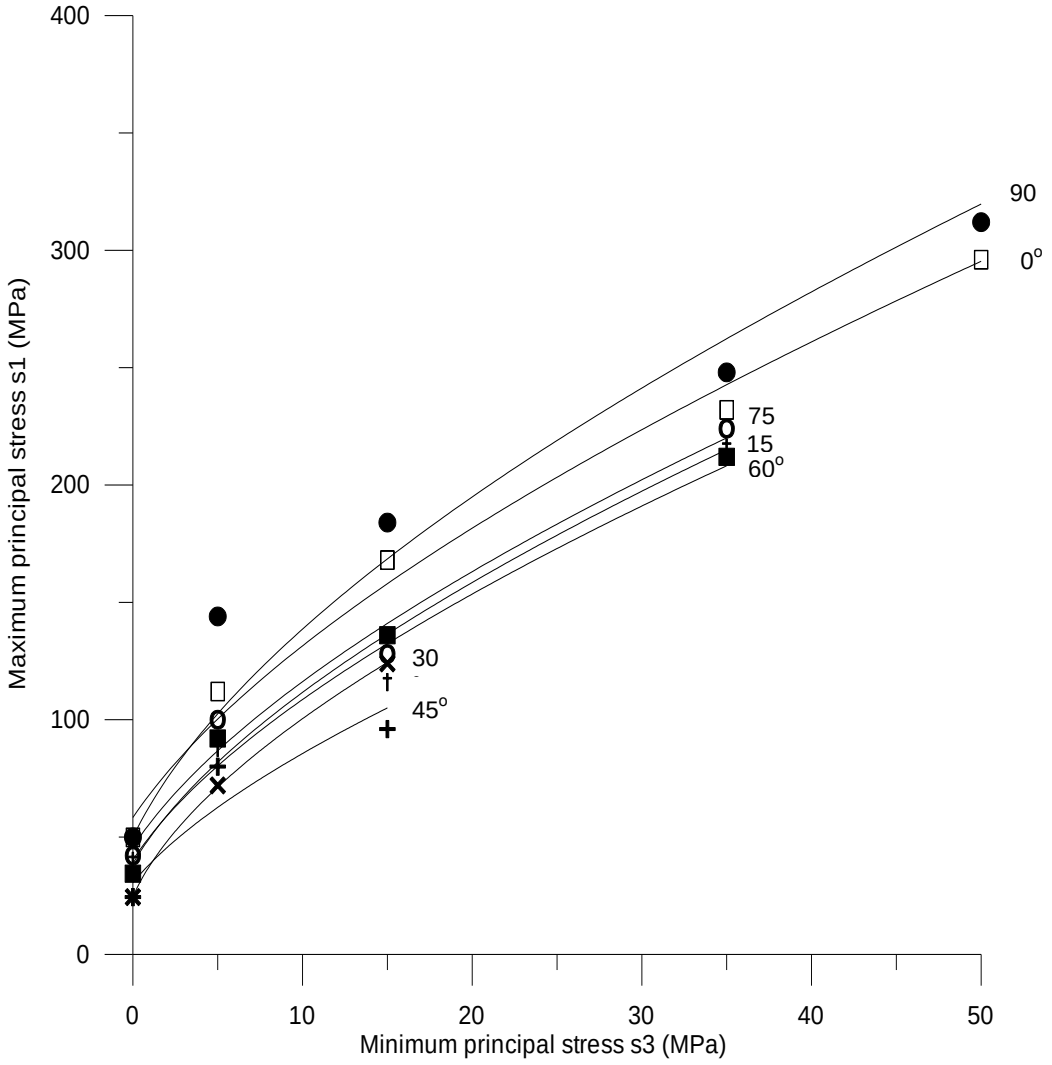
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	0,66
15	-
30	0,57
45	0,83
60	0,77
75	0,74
90	1

Χαλαζιακός μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος (Behrestaghi 1996)



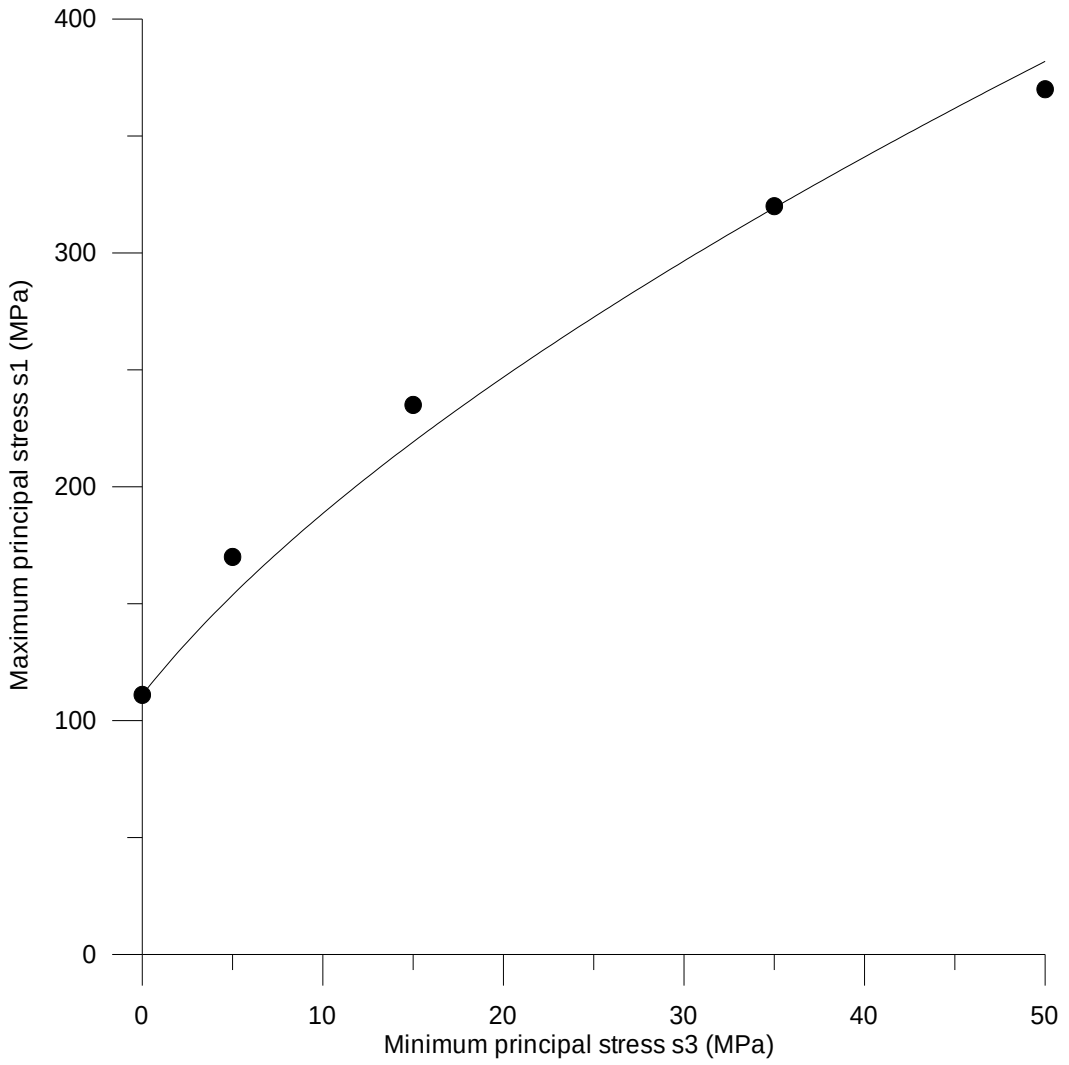
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=28,16)



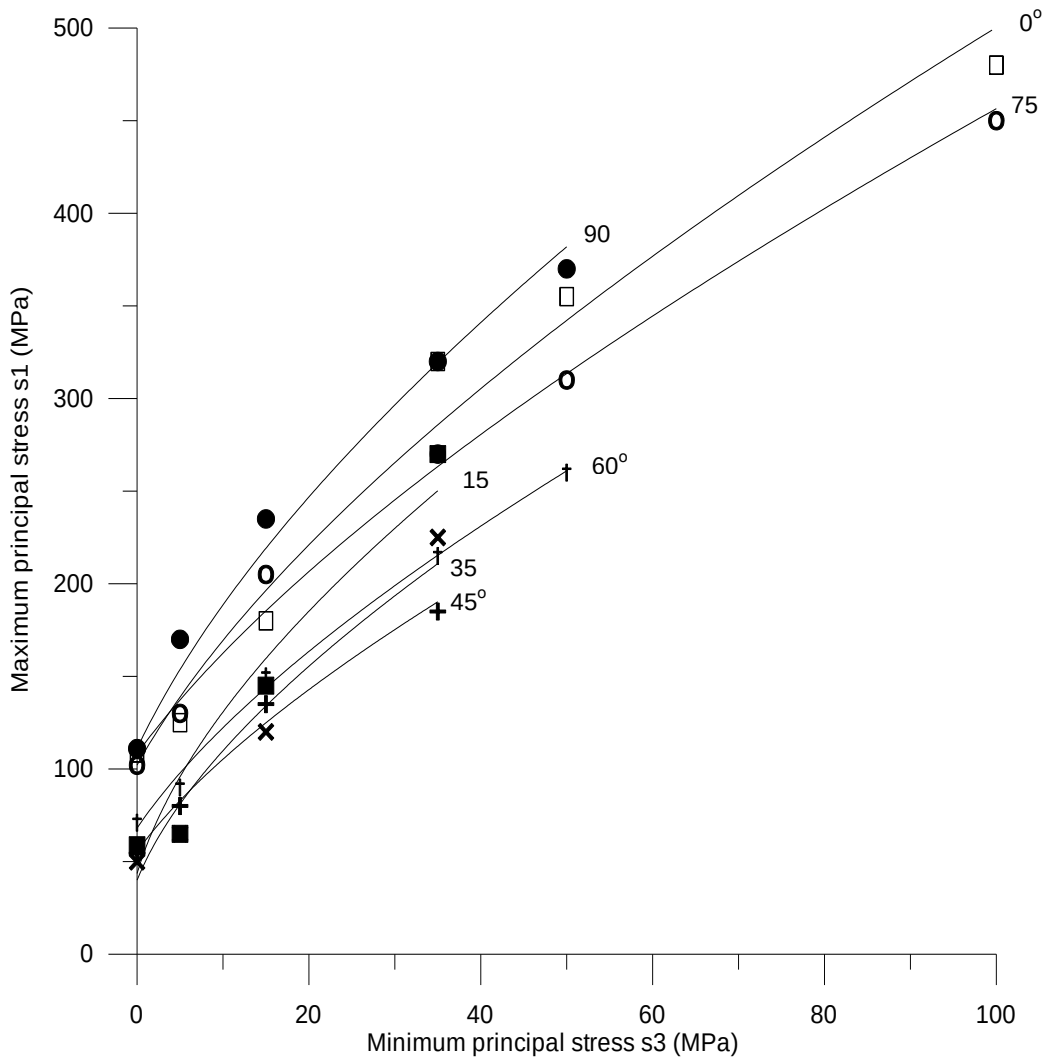
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	0,69
15	0,81
30	1,09
45	0,56
60	0,71
75	0,72
90	1

Χλωριτικός σχιστόλιθος (Behrestaghi 1996)



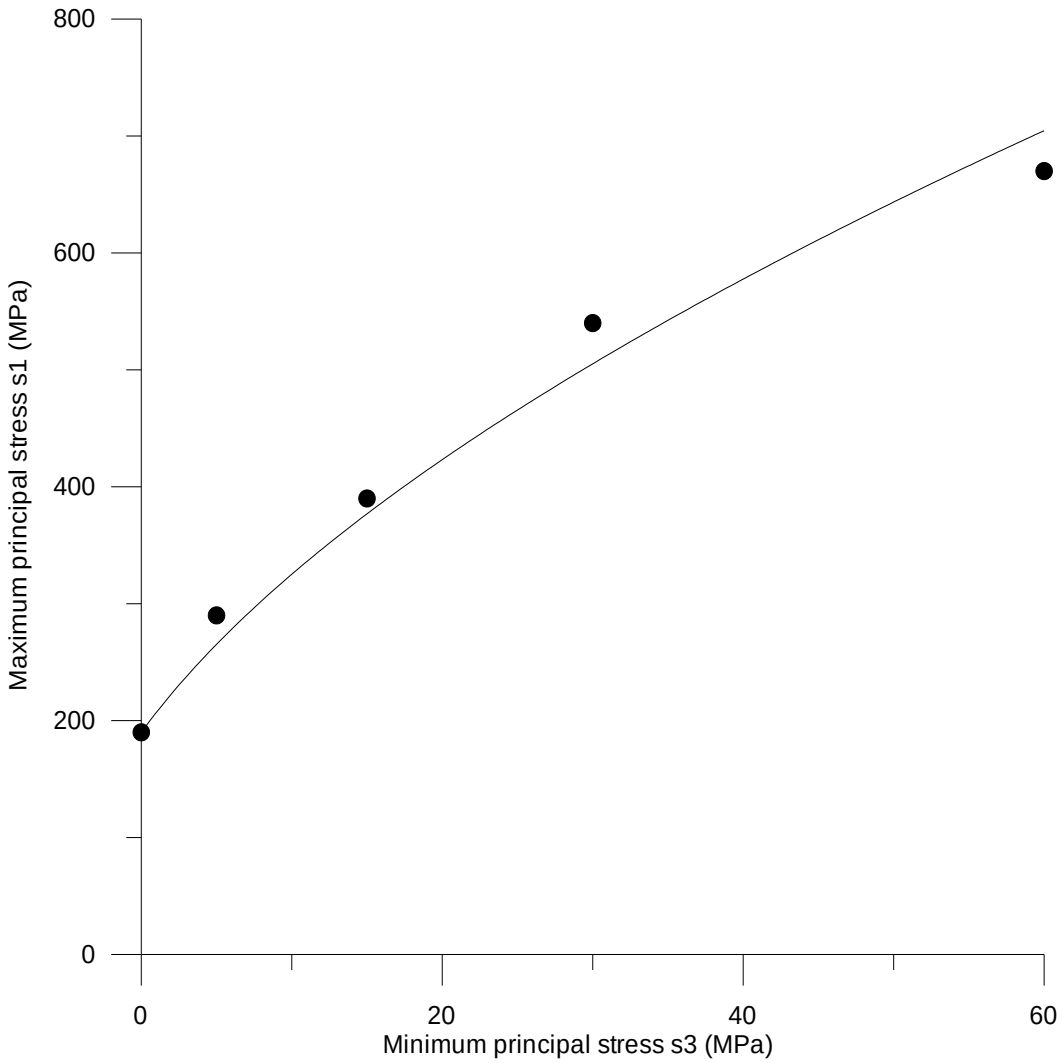
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=17,03)



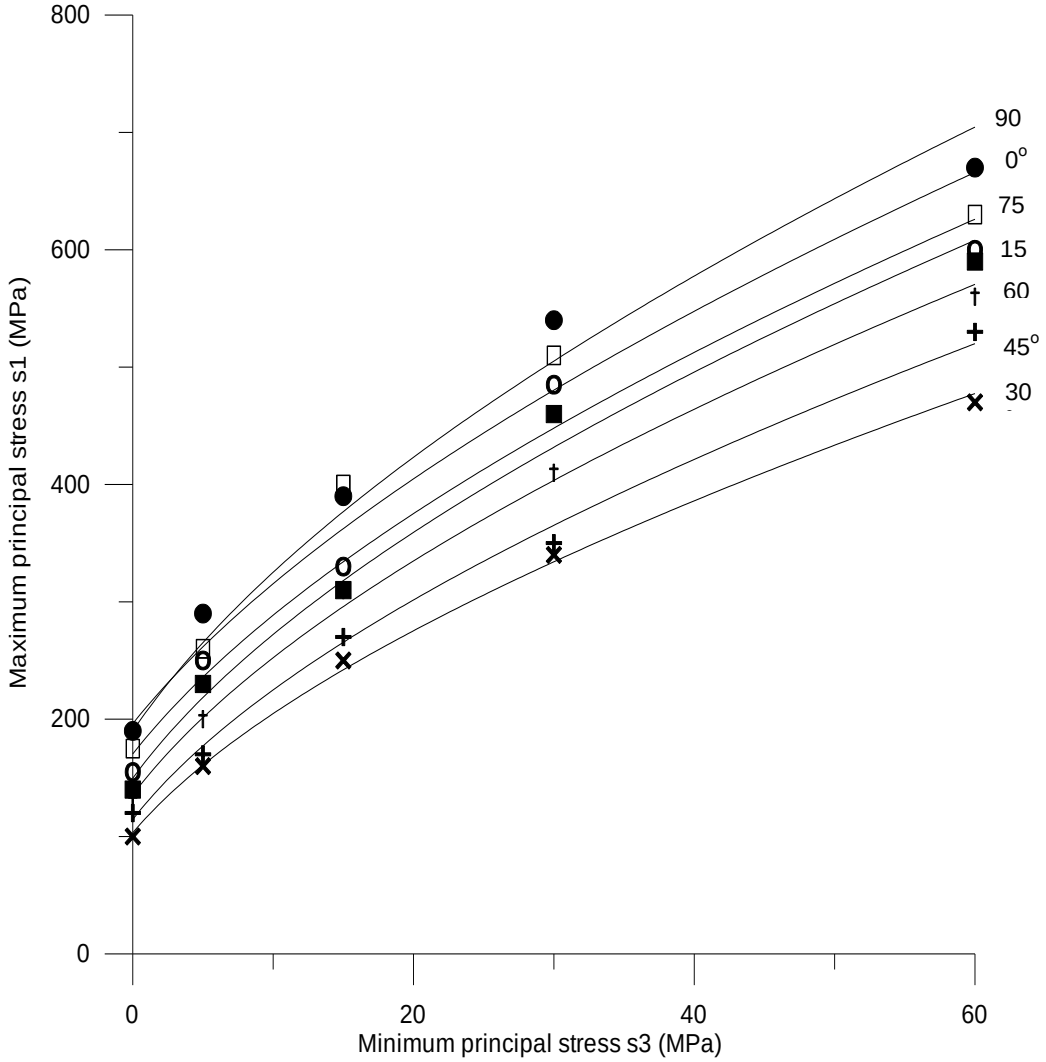
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	0,86
15	1,70
35	1,23
45	0,63
60	0,69
75	0,64
90	1

Χαλαζίτης (Kumar 2006)



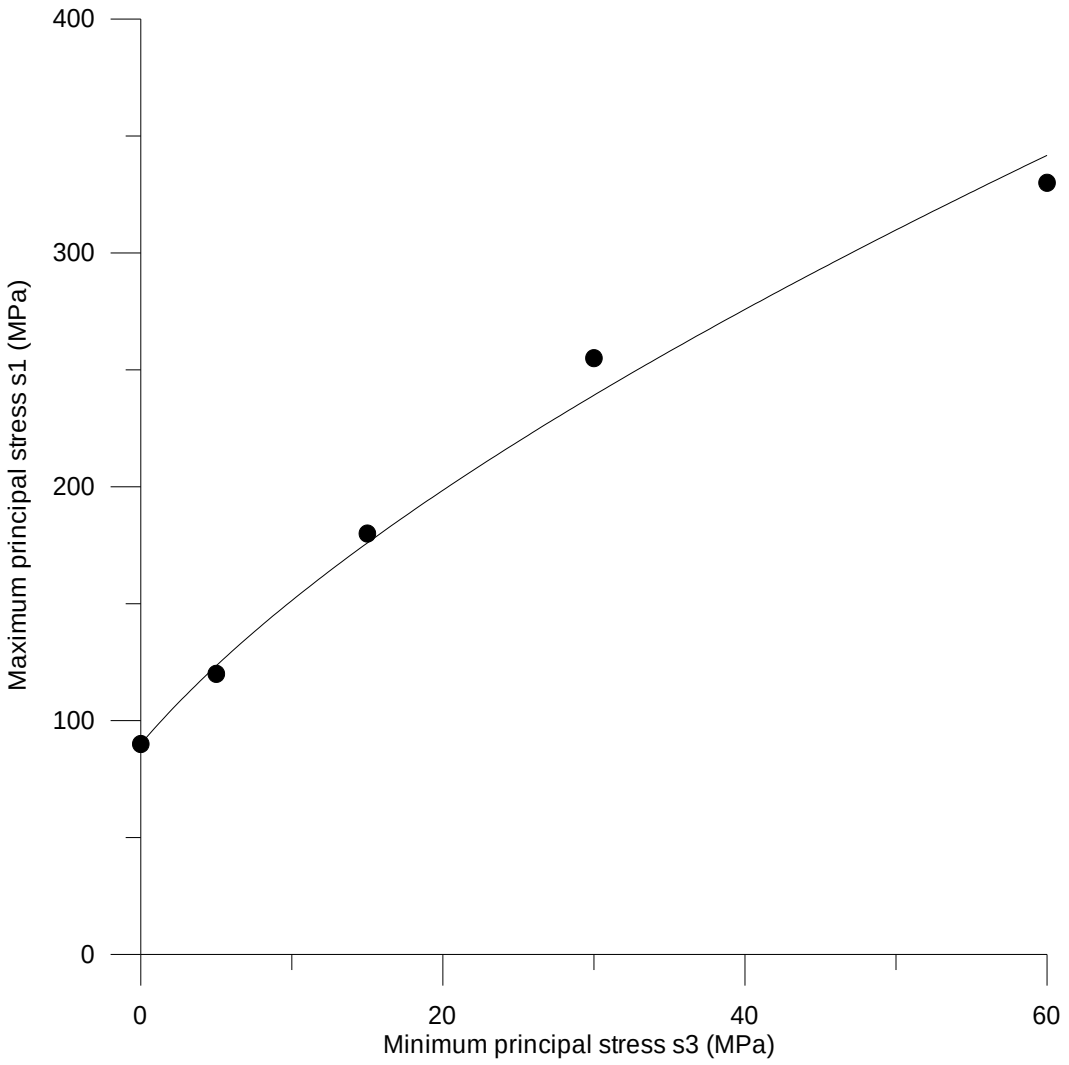
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=33,3)



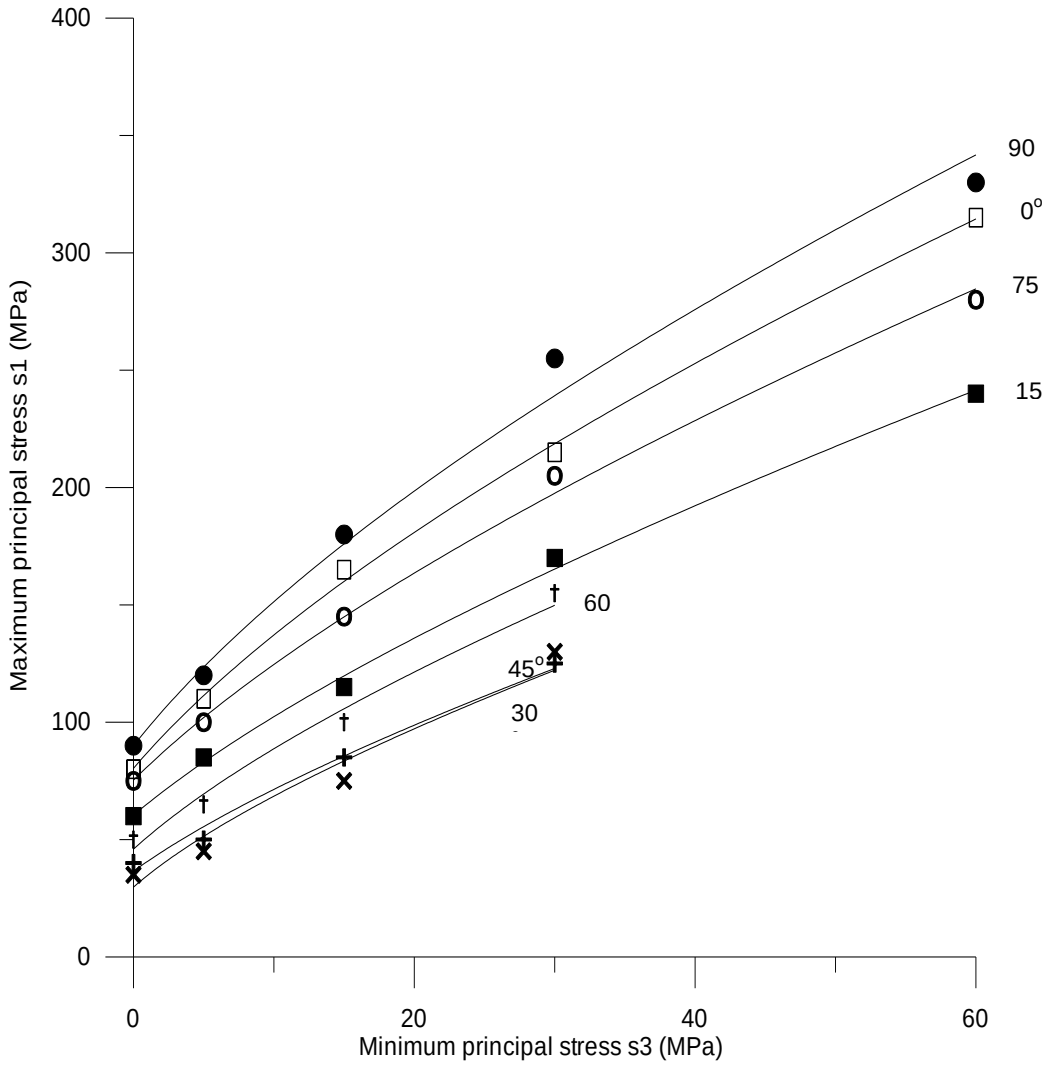
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	0,84
15	0,93
35	0,79
45	0,87
60	0,89
75	0,86
90	1

Φυλλίτης (Kumar 2006)



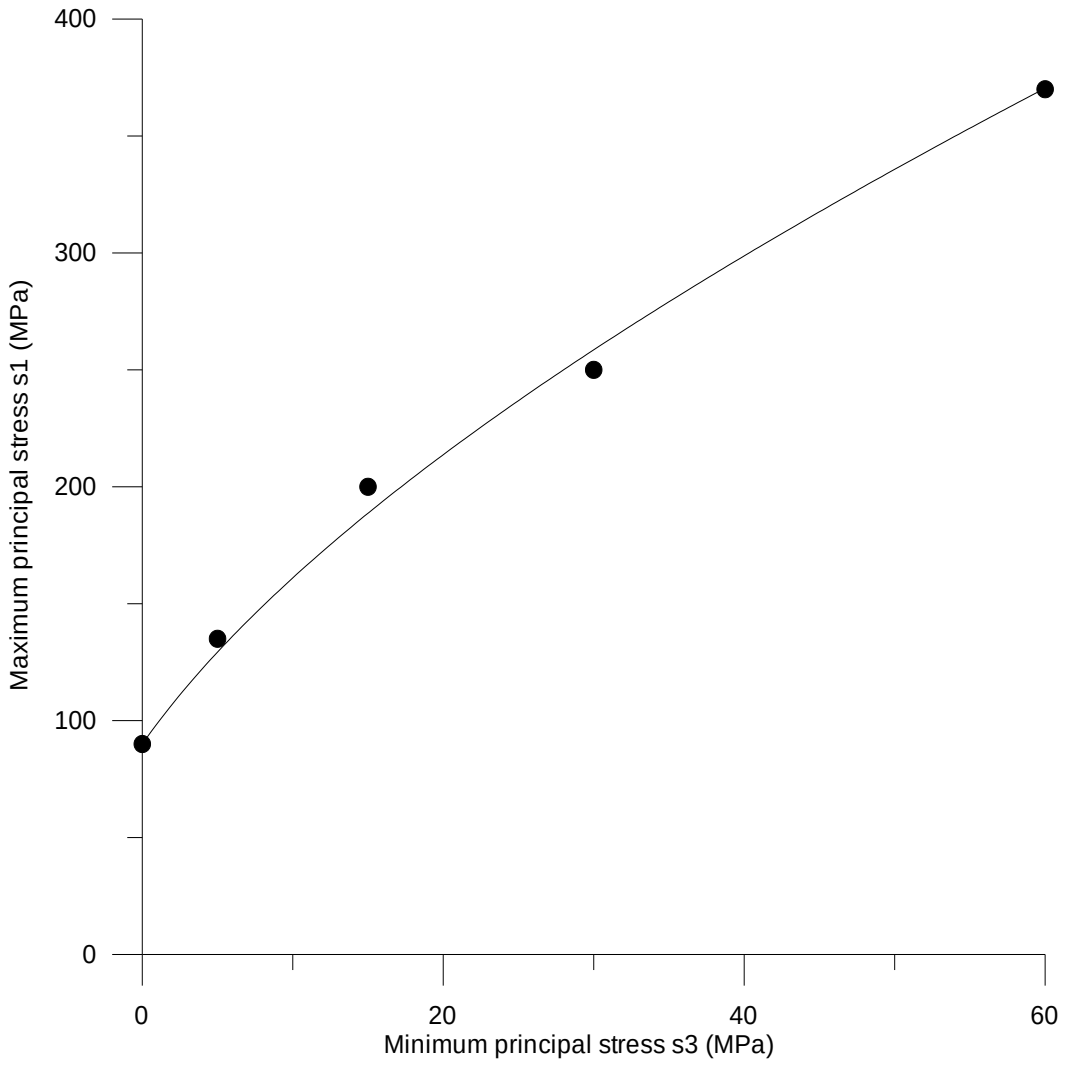
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=13,2)



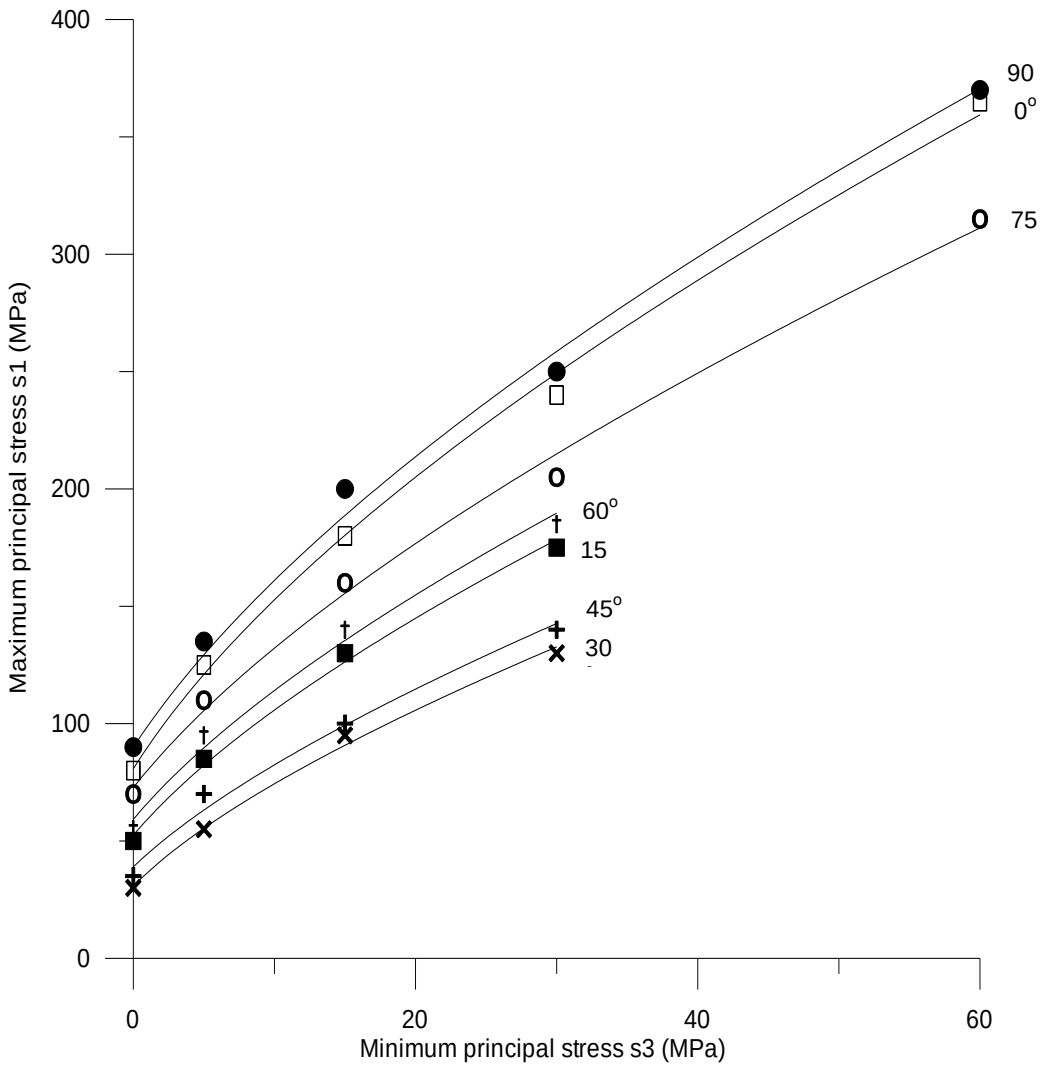
Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	0,92
15	0,62
35	0,64
45	0,50
60	0,67
75	0,75
90	1

Σχιστόλιθος (Kumar 2006)



Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για τον προσδιορισμό του mi (mi=16,3)



Διαδικασία κατάλληλης προσαρμογής (best fitting) για την εύρεση της παραμέτρου Kβ

Γωνία β (μοίρες)	Τιμή Kβ
0	1,05
15	0,75
35	0,64
45	0,58
60	0,76
75	0,81
90	1

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Σχιστόλιθος Penrhyn Attewell & Sandford 1974													
β=0°		**β=15°**		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**	
σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
0	178,9	0	110,5	0	38,2	0	59,2	0	84,2	0	127,6	0	206,6
13,79	192,1	13,79	136,8	13,79	81,6	13,79	93,4	13,79	118,4	13,79	163,2	13,79	243,4
27,58	252,6	27,58	188,2	27,58	110,5	27,58	123,7	27,58	163,2	27,58	200	27,58	300
41,37	307,9	41,37	207,9	41,37	118,5	41,37	131,6	41,37	184,2	41,37	214,5	41,37	322,4
55,16	322,4	55,16	223,7	55,16	130,3	55,16	176,3	55,16	200	55,16	244,7	55,16	380,3
68,95	410,5	68,95	271,1					68,95	206,6	68,95	280,3	68,95	471,1

Φυλλίτης Kumar 2006													
β=0°		**β=15°**		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**	
σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
0	80	0	60	0	35	0	40	0	50	0	75	0	90
5	110	5	85	5	45	5	50	5	65	5	100	5	120
15	165	15	115	15	75	15	85	15	100	15	145	15	180
30	215	30	170	30	130	30	125	30	155	30	205	30	255
60	315	60	240							60	280	60	330

Χαλαζίτης Kumar 2006													
β=0°		**β=15°**		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**	
σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
0	175	0	140	0	100	0	120	0	130	0	155	0	190
5	260	5	230	5	160	5	170	5	200	5	250	5	290
15	400	15	310	15	250	15	270	15	310	15	330	15	390
30	510	30	460	30	340	30	350	30	410	30	485	30	540
60	630	60	590	60	470	60	530	60	560	60	600	60	670

Σχιστόλιθος Kumar 2006													
β=0°		**β=15°**		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**	
σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
0	80	0	50	0	30	0	35	0	55	0	70	0	90
5	125	5	85	5	55	5	70	5	95	5	110	5	135
15	180	15	130	15	95	15	100	15	140	15	160	15	200
30	240	30	175	30	130	30	140	30	185	30	205	30	250
60	365									60	315	60	370

Σχιστόλιθος, Βιοτιτικός Behrestaghi 1996													
β=0°		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**			
σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1		
0	39,9	0	41	0	29,9	0	39,9	0	47,7	0	49,9		
5	80	5	48	5	40	5	72	5	92	5	104		
15	116	15	108	15	88	15	116	15	144	15	152		
35	168	35	156	35	160	35	184	35	216	35	224		
								50	240	50	268		

Σχιστόλιθος, Χαλαζιακός μαρμαρυγιακός Behrestaghi 1996													
β=0°		**β=15°**		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**	
σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1	σ3	σ1
0	49,9	0	34,4	0	24,4	0	24,4	0	39,9	0	42,1	0	49,9
5	112	5	92	5	72	5	80	5	88	5	100	5	144
15	168	15	136	15	124	15	96	15	116	15	128	15	184
35	232	35	212					35	216	35	224	35	248
50	296											50	312

Σχιστόλιθος, Χλωριτικός Behrestaghi 1996													
β=0°		**β=15°**		**β=30°**		**β=45°**		**β=60°**		**β=75°**		**β=90°**	
σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3	σ_1
0	108,7	0	58,8	0	49,9	0	54,3	0	71	0	102	0	111
5	125	5	65	5	65	5	80	5	90	5	130	5	170
15	180	15	145	15	120	15	135	15	150	15	205	15	235
35	320	35	270	35	225	35	185	35	215	35	270	35	320
50	355							50	260	50	310	50	370
100	480									100	450		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΄Β

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται μία ενδεικτική παρουσίαση:

- Των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα PHASE2
- Των συνολικών μετακινήσεων
- Της παραμορφωμένης διατομής

Για:

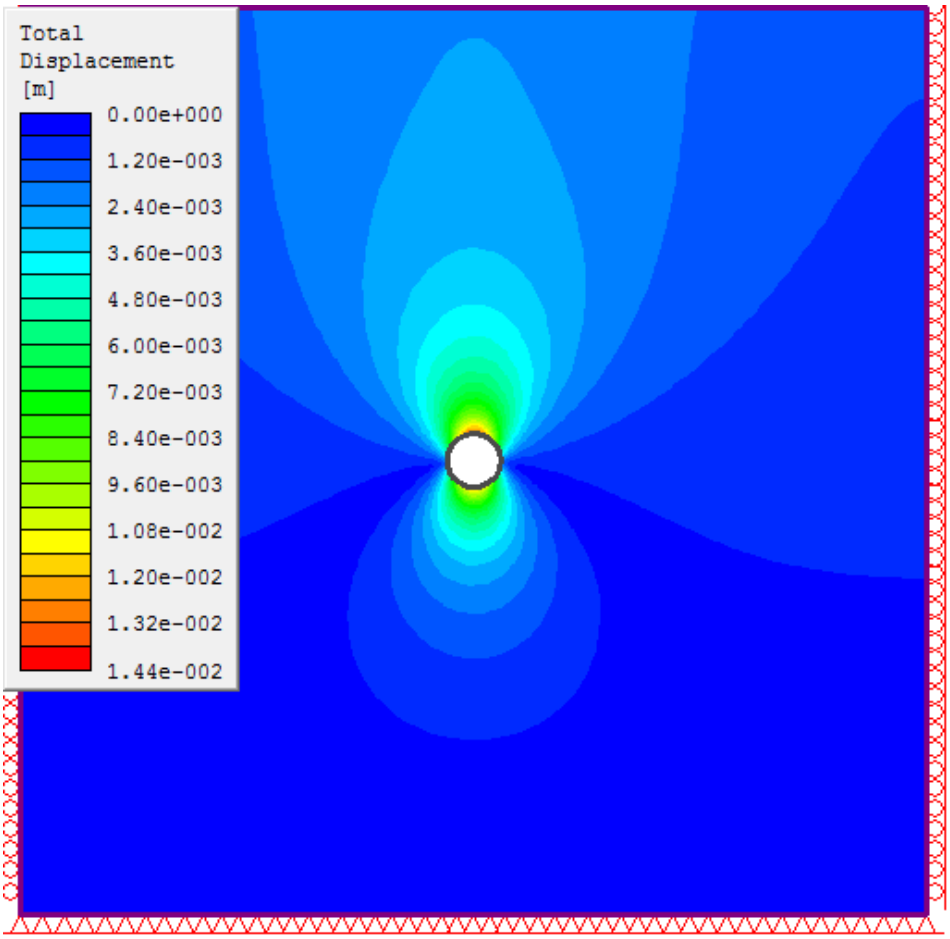
- Ελαστική συμπεριφορά βραχόμαζας
- GSI=50

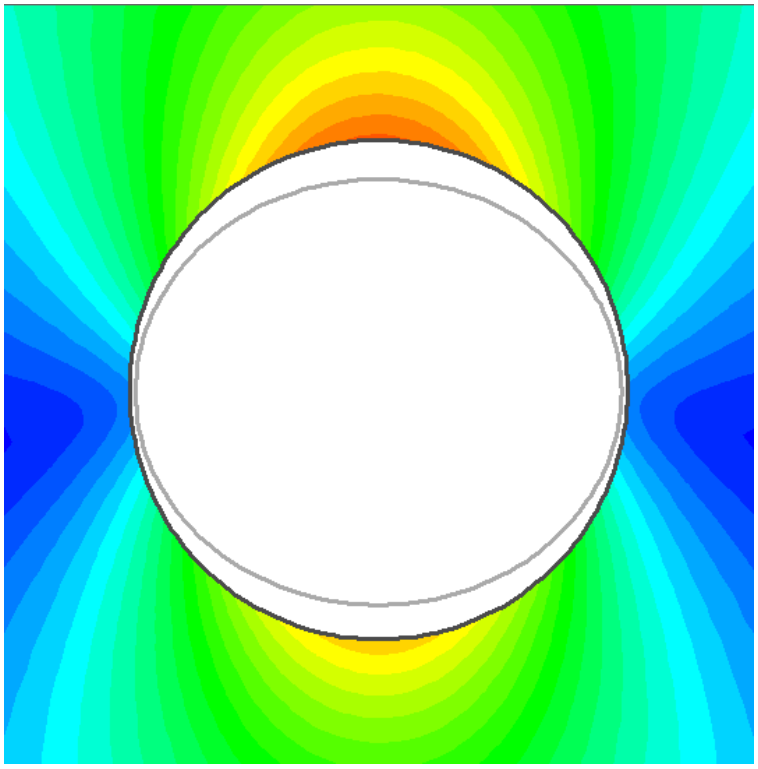
Για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- **Περίπτωση 1:** ισότροπο μέσο, Hoek-Brown 1980 (Σειρά A)
- **Περίπτωση 2:** ισότροπο μέσο, Hoek-Brown τροποποιημένο 2013, R_c=5, β=30º (Σειρά B)
- **Περίπτωση 3:** εγκάρσια ισότροπο μέσο, Hoek-Brown τροποποιημένο 2013, R_c=5 και R_E=2.5, β=30º (Σειρά C)
- **Περίπτωση 4:** εγκάρσια ισότροπο μέσο, Hoek-Brown 1980, R_E=2.5, β=30º (Σειρά D)
- **Περίπτωση 5:** εγκάρσια ισότροπο μέσο, Hoek-Brown τροποποιημένο 2013, R_E=2.5, β=90º (Σειρά E)

Σε όλες τις περιπτώσεις έχει χρησιμοποιηθεί στο υπόμνημα η ίδια μέγιστη και ελάχιστη τιμή μετακίνησης προκειμένου να είναι εύκολα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1


Total
Displacement
[m]
0.00e+000
1.20e-003
2.40e-003
3.60e-003
4.80e-003
6.00e-003
7.20e-003
8.40e-003
9.60e-003
1.08e-002
1.20e-002
1.32e-002
1.44e-002



Phase2 Analysis Information

Project Settings

Project Name: Project1
Number of Stages: 2
Analysis Type: Plane Strain
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Solver Type: Gaussian Elimination

Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 500 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m^3
Stress ratio (horizontal:vertical in-plane): 0.5
Stress ratio (horizontal:vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on stage 1: 13514
Number of nodes on stage 1: 6858
Number of elements on stage 2: 10904
Number of nodes on stage 2: 5627

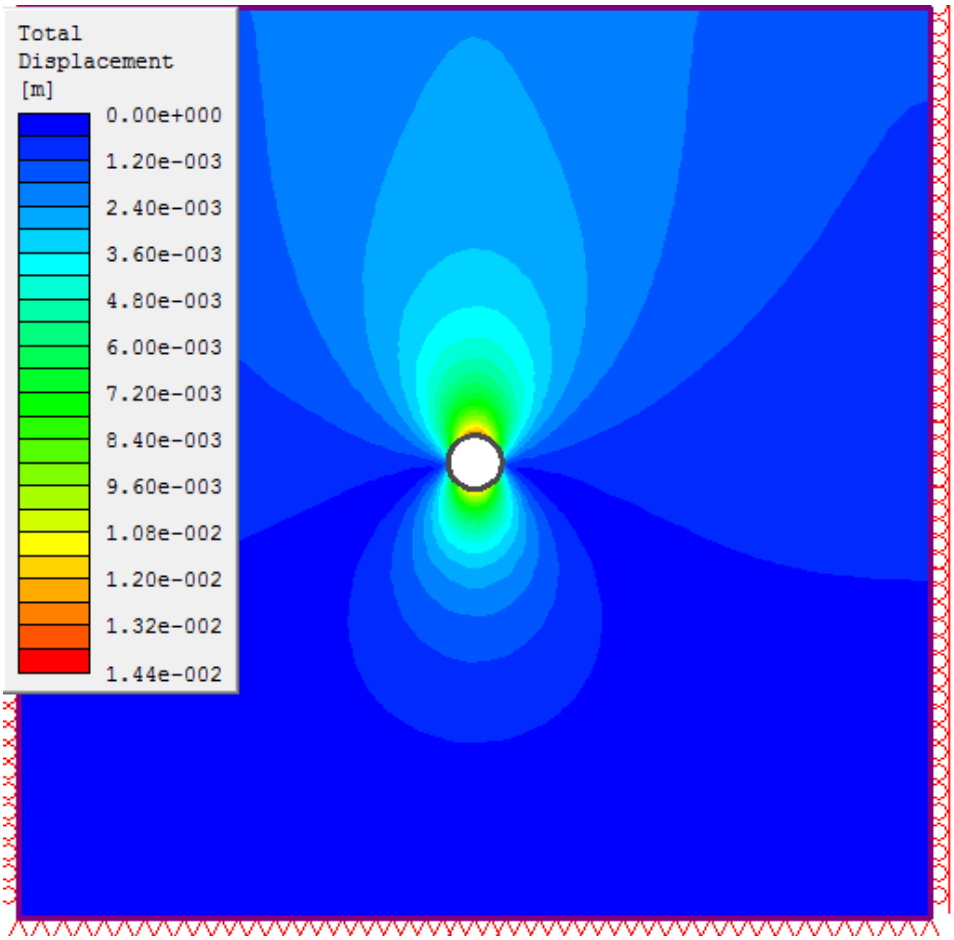
Mesh Quality

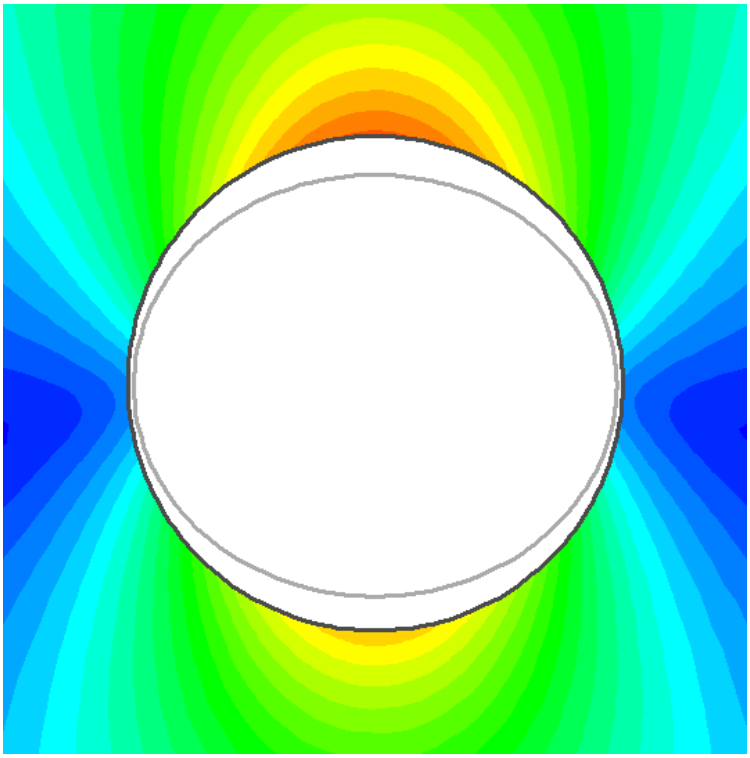
All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: slate
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight 0.025
Material type: isotropic
Young's modulus 7680 MPa
Poisson's ratio 0.21
Failure criterion: Hoek-Brown
Compressive strength 55 MPa
m parameter: 1.173, s parameter: 0.003866, Material type: Elastic

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2


Total
Displacement
[m]
0.00e+000
1.20e-003
2.40e-003
3.60e-003
4.80e-003
6.00e-003
7.20e-003
8.40e-003
9.60e-003
1.08e-002
1.20e-002
1.32e-002
1.44e-002



Phase2 Analysis Information

Project Settings

Project Name: Project1
Number of Stages: 2
Analysis Type: Plane Strain
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Solver Type: Gaussian Elimination

Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 500 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m^3
Stress ratio (horizontal:vertical in-plane): 0.5
Stress ratio (horizontal:vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on stage 1: 13438
Number of nodes on stage 1: 6820
Number of elements on stage 2: 10828
Number of nodes on stage 2: 5589

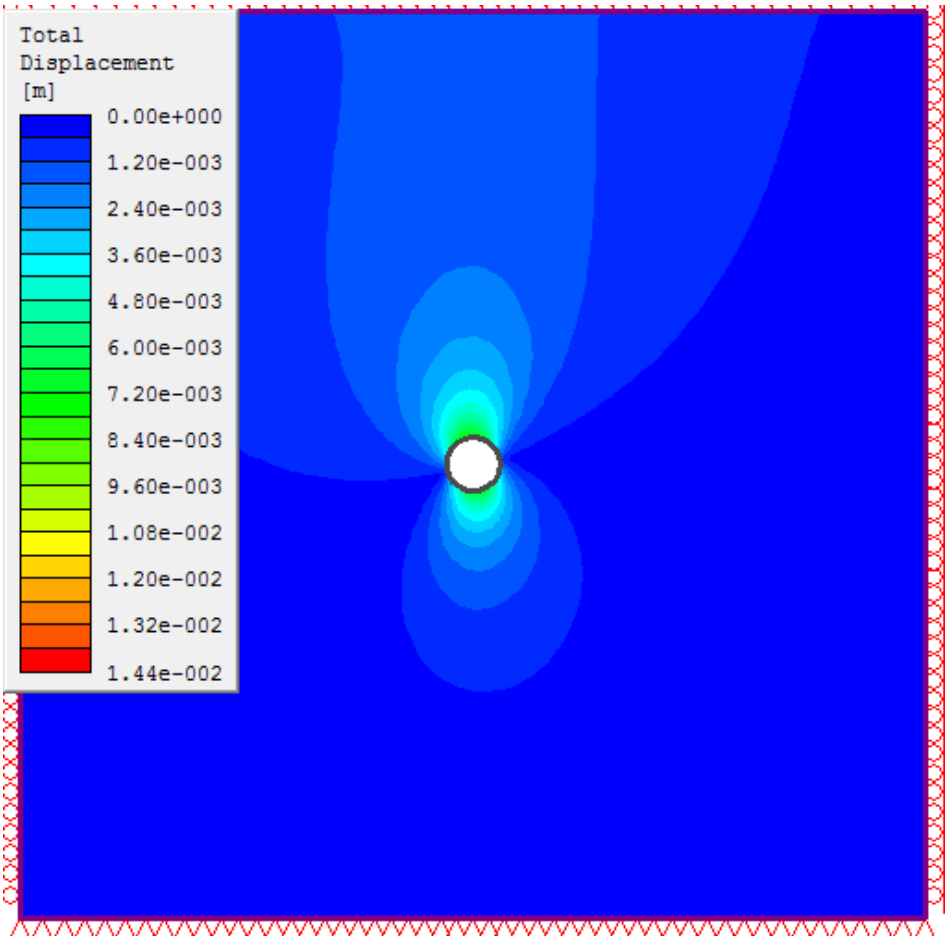
Mesh Quality

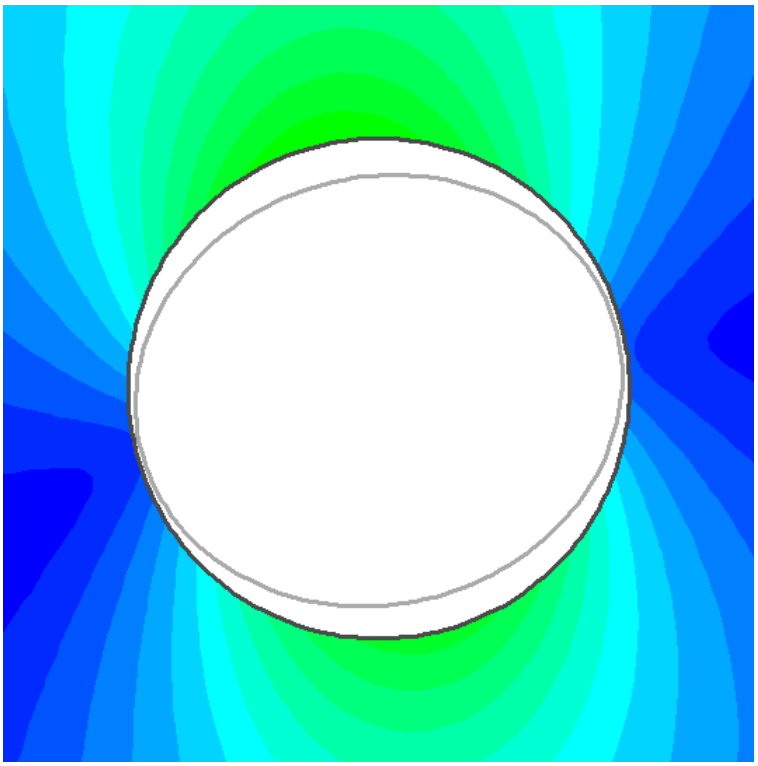
All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: slate
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight 0.025
Material type: isotropic
Young's modulus 7680 MPa
Poisson's ratio 0.21
Failure criterion: Hoek-Brown
Compressive strength 11 MPa
m parameter: 0.25, s parameter: 0.00077, Material type: Elastic

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3


Total
Displacement
[m]
0.00e+000
1.20e-003
2.40e-003
3.60e-003
4.80e-003
6.00e-003
7.20e-003
8.40e-003
9.60e-003
1.08e-002
1.20e-002
1.32e-002
1.44e-002



Phase2 Analysis Information

Project Settings

Project Name: Project1
Number of Stages: 2
Analysis Type: Plane Strain
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Solver Type: Gaussian Elimination

Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 500 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m^3
Stress ratio (horizontal:vertical in-plane): 0.5
Stress ratio (horizontal:vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on stage 1: 13764
Number of nodes on stage 1: 6983
Number of elements on stage 2: 11154
Number of nodes on stage 2: 5752

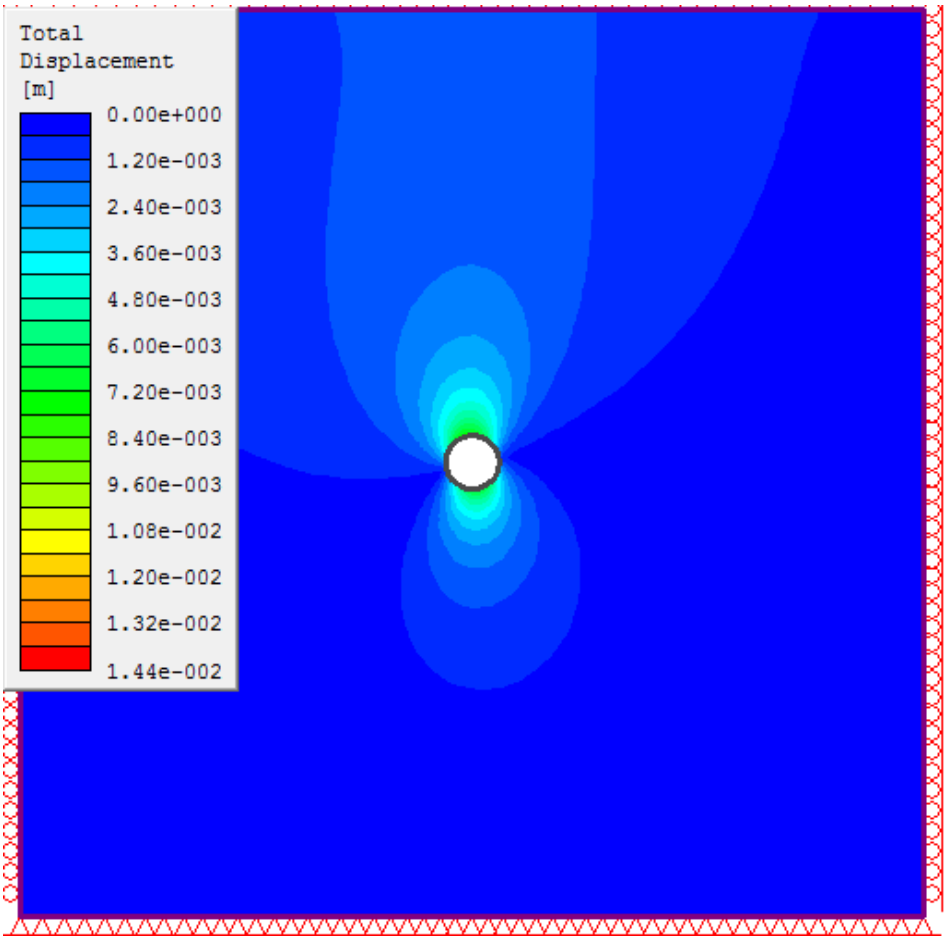
Mesh Quality

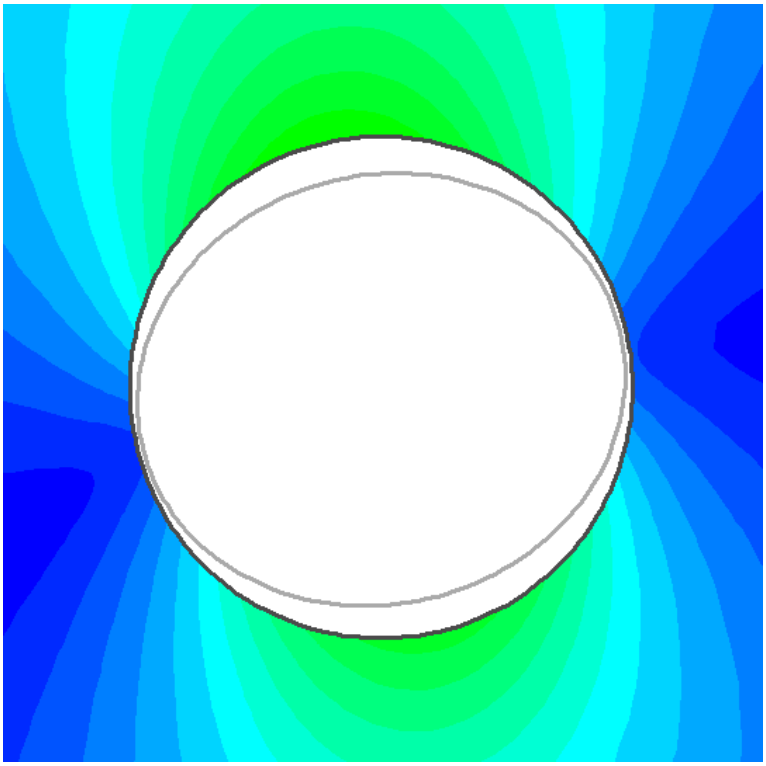
All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: Material 1
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight 0.025
Material type: transversely isotropic
Shear modulus (G12): 5480 MPa
Angle: 60 degrees (counter-clockwise from horizontal to E1)
Young's modulus (E1 and Ez): 19200 MPa
Young's modulus (E2): 7670 MPa
Poisson's ratio (v12): 0.084
Poisson's ratio (v and v1z): 0.21
Failure criterion: Hoek-Brown
Compressive strength 11 MPa
m parameter: 0.25, s parameter: 0.00077, Material type: Elastic

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4


Total
Displacement
[m]
0.00e+000
1.20e-003
2.40e-003
3.60e-003
4.80e-003
6.00e-003
7.20e-003
8.40e-003
9.60e-003
1.08e-002
1.20e-002
1.32e-002
1.44e-002



Phase2 Analysis Information

Project Settings

Project Name: Project1
Number of Stages: 2
Analysis Type: Plane Strain
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Solver Type: Gaussian Elimination

Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 500 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m^3
Stress ratio (horizontal:vertical in-plane): 0.5
Stress ratio (horizontal:vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on stage 1: 13512
Number of nodes on stage 1: 6857
Number of elements on stage 2: 10902
Number of nodes on stage 2: 5626

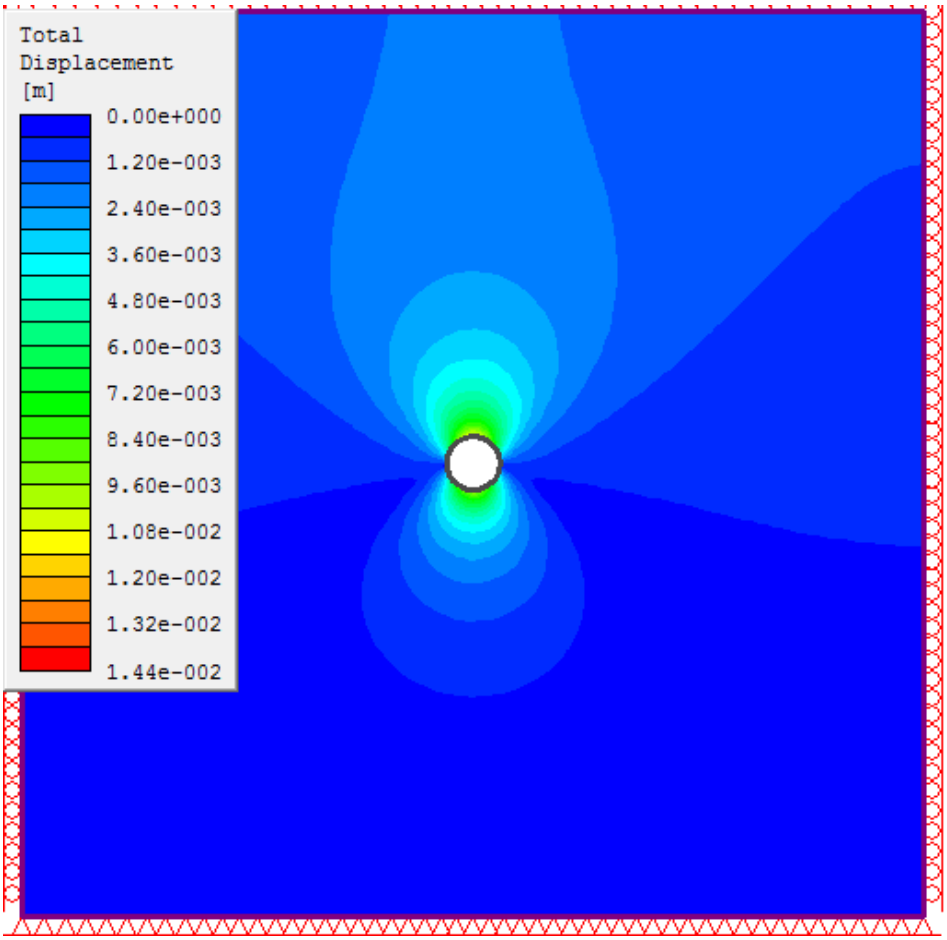
Mesh Quality

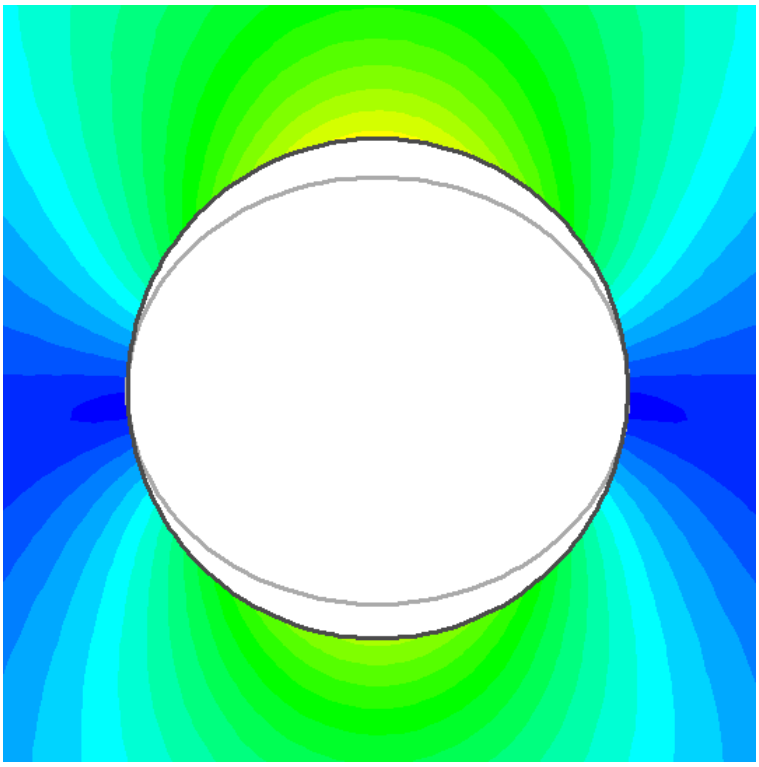
All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: slate
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight 0.025
Material type: transversely isotropic
Shear modulus (G12): 5480 MPa
Angle: 60 degrees (counter-clockwise from horizontal to E1)
Young's modulus (E1 and Ez): 19200 MPa
Young's modulus (E2): 7670 MPa
Poisson's ratio (v12): 0.084
Poisson's ratio (v and v1z): 0.21
Failure criterion: Hoek-Brown
Compressive strength 55 MPa
m parameter: 1.173, s parameter: 0.003866, Material type: Elastic

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5


Total
Displacement
[m]
0.00e+000
1.20e-003
2.40e-003
3.60e-003
4.80e-003
6.00e-003
7.20e-003
8.40e-003
9.60e-003
1.08e-002
1.20e-002
1.32e-002
1.44e-002



Phase2 Analysis Information

Project Settings

Project Name: Project1
Number of Stages: 2
Analysis Type: Plane Strain
Maximum Number of Iterations: 500
Tolerance: 0.001
Number of Load Steps: Automatic
Solver Type: Gaussian Elimination

Groundwater
Method: Piezometric Lines
Pore Fluid Unit Weight: 0.00981

Field Stress

Field stress: gravity
Ground surface elevation: 500 m
Unit weight of overburden: 0.025 MN/m^3
Stress ratio (horizontal:vertical in-plane): 0.5
Stress ratio (horizontal:vertical out-of-plane): 0.5
Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

Mesh

Mesh type: graded
Element type: 3 noded triangles
Number of elements on stage 1: 13512
Number of nodes on stage 1: 6857
Number of elements on stage 2: 10902
Number of nodes on stage 2: 5626

Mesh Quality

All elements are of good quality
Poor quality elements are those with:
(maximum side length) / (minimum side length) > 10.00
Minimum interior angle < 20.0 degrees
Maximum interior angle > 120.0 degrees

Material Properties

Material: slate
Initial element loading: field stress & body force
Unit weight 0.025
Material type: transversely isotropic
Shear modulus (G12): 5480 MPa
Angle: 0 degrees (counter-clockwise from horizontal to E1)
Young's modulus (E1 and Ez): 19200 MPa
Young's modulus (E2): 7670 MPa
Poisson's ratio (v12): 0.084
Poisson's ratio (v and v1z): 0.21
Failure criterion: Hoek-Brown
Compressive strength 55 MPa
m parameter: 1.173, s parameter: 0.003866, Material type: Elastic