



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

Συνεργαζόμενες Σχολές: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ & ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## **Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

---

Επίδραση της ανισοτροπίας και της κλίμακας στην ευστάθεια βραχυδών πρηνών

**Τομπουλίδου Σοφία**

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

**Επιβλέπων:** Π. Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων»

Συνεργαζόμενες Σχολές: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ & ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

---

Επίδραση της ανισοτροπίας και της κλίμακας στην ευστάθεια βραχυδών πρηνών

**Τομπουλίδου Σοφία**

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

**Επιβλέπων:** Π. Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 03 / 03 / 2015*

### **Μέλη επιτροπής:**

1. Π. Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
2. Α. Σοφινός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Α. Μπενάρδος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.





# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	17
Abstract .....	19
Πρόλογος.....	21
1. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	21
2. Στόχοι διπλωματικής εργασίας.....	22
3. Δομή διπλωματικής εργασίας .....	22
<b>1ο Κεφάλαιο : Η βραχόμαζα ως δομικό υλικό</b>	
1.1 Γενικά στοιχεία .....	23
1.2 Περί ανισοτροπίας των πετρωμάτων .....	23
1.2.1 Ανισοτροπία άρρηκτου πετρώματος .....	24
1.2.2 Ανισοτροπία βραχόμαζας .....	26
1.3 Τεχνική περιγραφή των βραχωδών υλικών και μαζών .....	27
1.4 Τεχνική περιγραφή των ασυνεχειών .....	29
1.5 Μηχανισμοί αστοχίας και αντοχή βραχόμαζας.....	34
1.6 Χαρακτηριστικές δομές των βραχωδών μαζών .....	35
1.7 Μηχανική συμπεριφορά των βραχωδών μαζών σε σχέση με τη δομή τους.....	36
1.7.1 Μηχανική συμπεριφορά βραχόμαζας χωρίς ασυνέχειες.....	37
1.7.2 Μηχανική συμπεριφορά κερματισμένης βραχόμαζας με ανισότροπη συμπεριφορά.....	37
1.7.3 Μηχανική συμπεριφορά κατακερματισμένης βραχόμαζας με ισότροπη συμπεριφορά .....	38
<b>2ο Κεφάλαιο : Ανάλυση συμπεριφοράς ανισότροπης βραχόμαζας</b>	
2.1 Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων σε ισότροπο και σε ανισότροπο μέσο .....	41
2.2 Παραμορφωσιμότητα βραχόμαζας.....	42
2.3 Αντοχή βραχομάζας: Ισότροπα μέσα .....	45
2.4 Αντοχή βραχομάζας: Ανισότροπα μέσα .....	47
2.5 Θεωρία ενός επιπέδου αδυναμίας .....	51
2.6 Ανασκόπηση πειραματικής έρευνας σε υλικά με ασυνέχειες.....	53
2.6.1 Δοκιμές των Goldstein et al. (1966) και Hayashi (1966).....	53
2.6.2 Δοκιμές του Lama (1974).....	54
2.6.3 Δοκιμές των Singh et al. (2002).....	55
2.6.4 Δοκιμές των Brown(1970), Brown & Trollope(1970), Brown & Hudson(1972).....	56
2.6.5 Δοκιμές των Ladanyi & Archambault (1972, 1980).....	61
2.6.6 Δοκιμές των Bandis et al. (1981) και Bandis (1990).....	63
2.6.7 Δοκιμές των Szymakowski et al. (2003).....	64

2.6.8	Δοκιμές των Meyers & Priest (1992).....	65
2.6.9	Δοκιμές των Kulatikale et al. (2001).....	66
2.6.10	Δοκιμές των Thorpe et al. (1980).....	67
2.6.11	Δοκιμές των Natau et al. (1983).....	67
2.6.12	Δοκιμές των Habimana et al. (2002).....	68
2.6.13	Δοκιμές των Ranjith et al. (2004).....	69
2.7	Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης προβλημάτων βραχομηχανικής.....	71
2.7.1	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method).....	72
2.7.1.1	Το πρόγραμμα Phase2.....	73
2.7.2	Μέθοδος διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method).....	74
2.7.2.1	Το λογισμικό UDEC.....	75
<b>3ο Κεφάλαιο : Ανάλυση συμπεριφοράς βραχωδών πρανών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων</b>		
3.1	Γενικά.....	77
3.2	Επιρροή του μεγέθους του έργου και του δικτύου ασυνεχειών στην ευστάθεια βραχωδών πρανών και στο μηχανισμό αστοχίας.....	78
3.3	Επιρροή των επιπέδων αδυναμίας στην ευστάθεια βραχωδών πρανών.....	83
<b>4ο Κεφάλαιο : Ανάλυση συμπεριφοράς βραχωδών πρανών με δύο συστήματα ασυνεχειών</b>		
4.1	Γενικά στοιχεία ανάλυσης.....	91
4.2	Σχεδιασμός του μοντέλου ανάλυσης.....	93
4.3	Αποτελέσματα της ανάλυσης.....	96
4.4	Συμπερασματικά στοιχεία της ανάλυσης.....	111
<b>Συμπεράσματα.....</b>		<b>113</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>115</b>

# Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Ενδεικτική παρουσίαση των στοιχείων της βραχώμαζας (άρρηκτο υλικό + ασυνέχειες) .....	23
Εικόνα 1.2 : Τέλειος σχισμός οрукτού άλατος .....	25
Εικόνα 1.3 : Χαρακτηριστική μορφή σχισμοφούς υφής .....	25
Εικόνες 1.4 – 1.5 : Απόψεις στρωσιγενών σχηματισμών .....	26
Εικόνα 1.6 : Κατοπτρικές επιφάνειες ρηγμάτων .....	26
Εικόνα 1.7 – 1.8 : Διακλάσεις που αποκαλύπτονται στις επιφάνειες βραχωδών πρανών .....	27
Εικόνα 1.9 : Παραδείγματα υφής πετρωμάτων στο μικροσκόπιο .....	28
Εικόνα 2.1 : Τρόποι αστοχίας των δοκιμών (Brown, 1970).....	58
Εικόνα 2.2 : Τρόποι αστοχίας των δοκιμών (Brown & Trollope, 1970) .....	60
Εικόνα 2.3 : Τρόποι αστοχίας των δοκιμών (Ladanyi & Archambault, 1972).....	61
Εικόνα 2.4 : Προοδευτική δημιουργία ζωνών περιστροφικής παραμόρφωσης (Bandis et al., 1981) .....	63
Εικόνα 2.5 : Δοκίμια με αποστάσεις ασυνεχιών 70.0mm (A) και 32.0mm (B) (Szymakowski et al., 2003) .....	64
Εικόνα 2.6 : Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμών (Kulatikale, 2001).....	66
Εικόνα 2.7 : Δοκίμιο αργιλικού σχιστόλιθου (Natau et al., 1983) .....	67
Εικόνα 2.8 : Περιβάλλον ανάλυσης κατασκευής με χρήση του προγράμματος Phase2 της Rocscience .....	74
Εικόνα 2.9 : Ανάλυση κατασκευής με χρήση του λογισμικού UDEC της ITASCA .....	76
Εικόνα 3.1 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.2 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.3 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	80
Εικόνα 3.4 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.5 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 60.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	80
Εικόνα 3.6 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 90.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.7 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	81
Εικόνα 3.8 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.9 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	81
Εικόνα 3.10 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.11 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 60.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	81
Εικόνα 3.12 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 120.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.13 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	82
Εικόνα 3.14 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.15 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	82
Εικόνα 3.16 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.17 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 60.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al, 2009).....	82
Εικόνα 3.18 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 120.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχιών (Hammam et al., 2009).....	80
Εικόνα 3.19 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από άρηκτο υλικό χωρίς επίπεδα αδυναμίας (Azami et al., 2012).....	86
Εικόνα 3.20 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=0^\circ$ (Azami et al., 2012).....	86



Εικόνα 3.21 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=25^\circ$ (Azami et al., 2012).....	86
Εικόνα 3.22 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=45^\circ$ (Azami et al., 2012).....	86
Εικόνα 3.23 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=65^\circ$ (Azami et al., 2012).....	87
Εικόνα 3.24 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=135^\circ$ (Azami et al., 2012).....	87
Εικόνα 4.1 : Ορισμός στο πρόγραμμα Phase2 v8.0 των μονάδων μέτρησης.....	93
Εικόνα 4.2 : Επιλογή στο πρόγραμμα Phase2 v8.0 της ανάλυσης SSR.....	94
Εικόνα 4.3 : Παράθυρο ορισμού της γεωμετρίας του δικτύου ασυνεχειών.....	94
Εικόνα 4.4 : Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων του άρρηκτου υλικού.....	95
Εικόνα 4.5 : Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων των ασυνεχειών.....	95
Εικόνα 4.6 : Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων του τασικού πεδίου.....	95
Εικόνα 4.7 : Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων του δικτύου διακριτοποίησης.....	96
Εικόνα 4.8 : Μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $0^\circ$ .....	98
Εικόνα 4.9 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $0^\circ$ .....	98
Εικόνα 4.10 : Μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $90^\circ$ .....	98
Εικόνα 4.11 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ με “κλειστά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία.....	99
Εικόνα 4.12 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία.....	99
Εικόνα 4.13 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία.....	99
Εικόνα 4.14 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ με “ανοικτά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία.....	100
Εικόνα 4.15 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία.....	100
Εικόνα 4.16 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία.....	100
Εικόνα 4.17 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ με “κλειστά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία.....	101
Εικόνα 4.18 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία.....	101
Εικόνα 4.19 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία.....	101
Εικόνα 4.20 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ με “ανοικτά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία.....	102
Εικόνα 4.21 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία.....	102
Εικόνα 4.22 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία.....	102
Εικόνα 4.23 : Συνολικές παραμορφώσεις και παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $0^\circ$ με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία.....	103
Εικόνα 4.24 : Συνολικές παραμορφώσεις και παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών $90^\circ$ με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία.....	103





# Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 : Οι κυριότεροι τύποι ρηγμάτων .....	26
Σχήμα 1.2 : Συνοπτική απεικόνιση των κύριων φυσικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών της βραχώμαζας .....	29
Σχήμα 1.3 : Παράταξη, κλίση και διεύθυνση κλίσης προσανατολισμένου επιπέδου .....	30
Σχήμα 1.4 : Μέτρηση της απόστασης επανάληψης (s) ασυνεχειών σε τομή βραχώμαζας .....	30
Σχήμα 1.5 : Σκαριφήματα και ογκοδιαγράμματα στα οποία φαίνεται η σχετική εμμονή διαφόρων συνόλων ασυνεχειών .....	31
Σχήμα 1.6 : Ογκοδιαγράμματα στα οποία φαίνονται ο αριθμός συστημάτων ασυνεχειών και η επίδρασή τους στη μηχανική συμπεριφορά και στην εμφάνιση των βραχωδών μαζών .....	31
Σχήμα 1.7 : Σκαριφήματα βραχωδών μαζών ανάλογα με τη γεωμετρία/μορφή των άρρηκτων (μοναδιαίων) τεμαχίων .....	32
Σχήμα 1.8 : Τυπικές τομές τραχύτητας και προτεινόμενη ονοματολογία. Το μήκος κάθε τομής είναι από 1.0m έως 10.0m. Η κατακόρυφη και η οριζόντια κλίμακα είναι ίδια.....	32
Σχήμα 1.9 : Σκαριφήματα ορισμών του ανοίγματος ασυνεχειών .....	33
Σχήμα 1.10 : Παραδείγματα διατμητικής αστοχίας βραχωδών πρηνών .....	34
Σχήμα 1.11 : Επίδραση του βαθμού κερματισμού και του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην αντοχή βραχώμαζας ....	34
Σχήμα 1.12 : Απλοποιημένα μοντέλα μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας όπως καθορίζονται από την κλίμακα ενός προβλήματος και τη σχετική πυκνότητα του δικτύου ασυνεχειών (Hoek, Kaiser, Bawden, 1995).....	36
Σχήμα 1.13 : Παράδειγμα ανοιγμάτων στην ίδια βραχώμαζα (Amadei, 1996).....	36
Σχήμα 1.14 : Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση (Hudson & Harrison, 1997) .....	37
Σχήμα 1.15 : Λογικό διάγραμμα πρόβλεψης της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευής σε βραχώμαζα (Bandis).....	39
Σχήμα 2.1 : Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων ελαστικού ψαθυρού και όλκιμου πετρώματος σε μονοαξονική φόρτιση (Brandy & Brown).....	41
Σχήμα 2.2 : Ορισμός του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson $\nu$ (Wittke, 1990).....	41
Σχήμα 2.3 : Ανισότροπη παραμόρφωση άρρηκτου πετρώματος (Wittke, 1990).....	41
Σχήμα 2.4 : Ορισμός των ελαστικών σταθερών για εγκάρσια ισότροπο υλικό με επίπεδη δομή (Wittke, 1990).....	42
Σχήμα 2.5 : Η φύση των ασυνεχειών (Wittke, 1990) .....	42
Σχήμα 2.6 : Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης τοπικά στις επιφάνειες επαφής (Wittke, 1990).....	43
Σχήμα 2.7 : Μονοαξονική φόρτιση μάζας πετρώματος με μία μερικώς ανοικτή ασυνέχεια (Wittke, 1990).....	43
Σχήμα 2.8 : Επιρροή ασυνέχειας με υλικό πλήρωσης στην παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας (Wittke, 1990) .....	44
Σχήμα 2.9 : Δοκίμιο και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb.....	45
Σχήμα 2.10 : Περιβάλλουσες αστοχίας Mohr – Coulomb και Hoek – Brown σε συγκριτική παρουσίαση.....	47
Σχήμα 2.11 : Διάτμηση λείας ασυνέχειας, αντοχή και περιβάλλουσες αστοχίας.....	47
Σχήμα 2.12 : Το πείραμα του Patton (1966) στη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών.....	48
Σχήμα 2.13 : Διάγραμμα συσχετισμού αντοχής τοιχώματος και του αριθμού αναπήδης της σφύρας Schmidt .....	49
Σχήμα 2.14 : Ασυνέχειες βράχου με πλαστικό υλικό πλήρωσης (Bandis) .....	50
Σχήμα 2.15 : Περιβάλλουσες αντοχής βραχωδών μαζών για διάφορες περιπτώσεις διατμητικής αστοχίας .....	50
Σχήμα 2.16 : Επίδραση μιας ασυνέχειας στην αντοχή δοκιμίου (Jaeger, 1969) .....	51
Σχήμα 2.17 : Δυνατοί τρόποι αστοχίας πετρώματος με ένα επίπεδο αδυναμίας – Παρουσίαση με κύκλους Mohr .....	52
Σχήμα 2.18 : Αντοχή πετρώματος με πολλά συστήματα ασυνεχειών .....	52

Σχήμα 2.19 : Συσχέτιση αντοχής βραχώμαζας – αντοχής άρρηκτου υλικού με το μέγεθος του άρρηκτου τεμάχους (Goldstein et al., 1966).....	53
Σχήμα 2.20 : Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμών (Lama, 1974) .....	54
Σχήμα 2.21 : Φυσικά δοκίμια ρωγματωμένης βραχώμαζας Τύπου A (Singh et al., 2002) .....	55
Σχήμα 2.22 : Μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμών (Singh et al., 2002) .....	55
Σχήμα 2.23 : Συσχέτιση βαθμού αλληλοεμπλοκής με την αντοχή των δοκιμών (Singh et al.,2002) .....	56
Σχήμα 2.24 : Γεωμετρία δοκιμών που εξετάστηκαν από τον Brown (1970).....	57
Σχήμα 2.25 : Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμών που εξετάστηκαν από τον Brown (1970).....	57
Σχήμα 2.26 : Γεωμετρία ρωγματωμένης βραχώμαζας (Brown & Trollope, 1970).....	59
Σχήμα 2.27 : Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμών που εξετάστηκαν από τους Brown & Trollope (1970).....	59
Σχήμα 2.28 : Γεωμετρία ρωγματωμένης βραχώμαζας (Ladanyi & Archambault, 1972) .....	61
Σχήμα 2.29 : Αποτελέσματα δοκιμών (Ladanyi & Archambault, 1972).....	62
Σχήμα 2.30 : Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης (Bandis, 1990).....	64
Σχήμα 2.31 : Αποτελέσματα δοκιμών ομοιωμάτων διαφορετικής απόστασης ασυνεχειών (Szymakowski et al., 2003).....	65
Σχήμα 2.32 : Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε ρωγματωμένα φυσικά δοκίμια (Meyers & Priest, 1992) .....	65
Σχήμα 2.33 : Διαγράμματα αξονικών τάσεων – αξονικών τροπών για τρεις περιπτώσεις (Kulatikale, 2001).....	67
Σχήμα 2.34 : Διάγραμμα τάσεων – τροπών πετρώματος ποικίλου βαθμού τεκτονισμού (Habimana et al., 2002) .....	68
Σχήμα 2.35 : Διάγραμμα τάσεων – τροπών τεκτονισμένου πετρώματος μεταβαλλόμενης πλευρικής τάσης (Habimana et al., 2002).....	69
Σχήμα 2.36 : Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για τρεις δομές πετρώματος (Ranjith et al., 2004) .....	70
Σχήμα 2.37 : Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής αντοχής πετρώματος (Ranjith et al., 2004) .....	70
Σχήμα 2.38 : Τυπική σχηματική απεικόνιση διακριτοποίησης στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων .....	72
Σχήμα 2.39 : Σχηματική απεικόνιση διακριτών άρρηκτων στοιχείων και δυνάμεων στις επαφές .....	74
Σχήμα 3.1 : Γεωμετρία ασυνεχειών στο Παράδειγμα I .....	79
Σχήμα 3.2 : Γεωμετρία ασυνεχειών στο Παράδειγμα II .....	79
Σχήμα 3.3 : Γεωμετρία ασυνεχειών στο Παράδειγμα III .....	79
Σχήμα 3.4 : Τυπικός όγκος ελέγχου υλικού με ένα επίπεδο αδυναμίας γωνίας κλίσης $\alpha$ .....	84
Σχήμα 3.5 : Μεταβολή της μέγιστης αξονικής τάσης του υλικού συναρτήσει της κλίσης του επιπέδου αδυναμίας (Azami et al., 2012) .....	84
Σχήμα 3.6 : Αρχικά και παραμορφωμένα δοκίμια για διάφορες γωνίες κλίσης $\alpha$ (Azami et al., 2012).....	85
Σχήμα 3.7 : Γεωμετρικά στοιχεία του υπό ανάλυση βραχώδους πρανούς .....	85
Σχήμα 3.8 : Μεταβολές του συντελεστή ασφαλείας ως προς τη γωνία κλίσης των επιπέδων αδυναμίας (Azami et al., 2012) .....	86
Σχήμα 3.9 : Προβλεπόμενη μορφή αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=0^\circ$ (Azami et al., 2012) .....	87
Σχήμα 3.10 : Προβλεπόμενη μορφή αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης $\alpha=0^\circ$ (Azami et al., 2012) .....	88
Σχήμα 3.11 : Μεταβολές του συντελεστή ασφαλείας ως προς το ποσοστό διατμητικής αντοχής (Azami et al., 2012).....	88
Σχήμα 4.1 : Γεωμετρικό προσομοίωμα πρανούς προς ανάλυση .....	91
Σχήμα 4.2 : Διακριτοποίηση και οριακές συνθήκες ανάλυσης.....	92
Σχήμα 4.3 : Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών $0^\circ$ .....	92
Σχήμα 4.4 : Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών $30^\circ$ .....	92

Σχήμα 4.5 : Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών $60^\circ$ .....	93
Σχήμα 4.6 : Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών $90^\circ$ .....	93
Σχήμα 4.7 : Διακριτοποίηση και οριακές συνθήκες στο μοντέλο ανάλυσης .....	96



# Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 : Βαθμονόμηση αντοχής πετρωμάτων σύμφωνα με την ISRM (1981) .....	27
Πίνακας 1.2 : Βαθμονόμηση αποσάθρωσης πετρωμάτων σύμφωνα με την ISRM (1981) .....	29
Πίνακας 1.3 : Περιγραφικοί όροι σχετικά με την απόστασή επανάληψης ασυνεχειών .....	30
Πίνακας 1.4 : Περιγραφικοί όροι σχετικά με την εμμόνη των ασυνεχειών .....	31
Πίνακας 1.5 : Κατάταξη υγρασιών – εκρών νερού από ασυνέχειες .....	33
Πίνακας 1.6 : Χαρακτηριστικές δομές βραχώμαζας (Hoek, 1983) .....	35
Πίνακας 2.1 : Παραδείγματα δομής πετρώματος και σχετικά μοντέλα ελαστικής συμπεριφοράς (Wittke, 1990) .....	44
Πίνακας 2.2 : Προτεινόμενες τιμές $m$ για διάφορα πετρώματα (Hoek & Marinos, 2000) .....	46
Πίνακας 2.4 : Τομές τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές του δείκτη JRC .....	49
Πίνακας 2.5 : Τύποι φυσικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Lama, 1974) .....	54
Πίνακας 2.6 : Μηχανισμοί αστοχίας για το δοκίμιο Τύπου A (Singh et al., 2002) .....	56
Πίνακας 2.7 : Μηχανισμός αστοχίας για κάθε δοκίμιο σε σχέση με την πλευρική πίεση (Brown, 1970) .....	58
Πίνακας 2.8 : Μηχανισμός αστοχίας για κάθε δοκίμιο σε σχέση με την πλευρική πίεση (Brown & Trollope, 1970) .....	60
Πίνακας 2.9 : Περιγραφή των δοκιμών και αποτελέσματα των δοκιμών (Natau et al., 1983) .....	68
Πίνακας 2.10 : Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμών κερματισμένου γρανίτη (Ranjith et al., 2004) .....	69
Πίνακας 2.11 : Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής αντοχής πετρώματος (Ranjith et al., 2004) .....	70
Πίνακας 3.1 : Συνοπτικός πίνακας των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας .....	78
Πίνακας 3.2 : Συνοπτικός πίνακας συντελεστών ασφαλείας των πρανών για τις διάφορες περιπτώσεις (Hammam et al., 2009) .....	79
Πίνακας 3.3 : Συνοπτικός πίνακας των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας .....	84
Πίνακας 3.4 : Συνοπτικός πίνακας συντελεστών ασφαλείας των πρανών για τις διάφορες περιπτώσεις (Azami et al., 2012) .....	85
Πίνακας 3.5 : Συνοπτικός πίνακας συντελεστών ασφαλείας του πρανούς για $\alpha=0^\circ$ ως προς το ποσοστό διατμητικής αντοχής (Azami et al., 2012) .....	88
Πίνακας 4.1 : Συνοπτικός πίνακας των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας .....	91
Πίνακας 4.2 : Συνοπτικός πίνακας των συντελεστών ασφαλείας της ανάλυσης .....	96





# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος “Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων” και έχει θέμα την “Επίδραση της ανισοτροπίας και της κλίμακας στην ευστάθεια βραχωδών πρανών”.

Η εργασία αναδεικνύει την ιδιαιτερότητα της κατασκευής γεωτεχνικών έργων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό βραχωδών μαζών και τον καθοριστικό ρόλο της γεωμετρίας και των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Επιπλέον, προβάλλει πως η συμπεριφορά αυτή μεταβάλλεται με βάση την κλίμακα του εξεταζόμενου έργου.

Στα κεφάλαιά της περιγράφονται συνοπτικά οι έννοιες του βραχώδους υλικού, των ασυνεχειών και της ανισοτροπίας. Περιγράφονται οι διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας και αναλύεται η μηχανική συμπεριφορά και η αντοχή βραχωδών μαζών σε σχέση με τη δομή τους. Επίσης, γίνεται ανασκόπηση της πειραματικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε έως σήμερα από διάφορους ερευνητές σε υλικά με ασυνέχειες για την εκτίμηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας.

Εκτενέστερη αναφορά γίνεται στην ευστάθεια βραχωδών πρανών και στη σχετικά πρόσφατη δυνατότητα ανάλυσής τους με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με την τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής.

Η γενική παρουσίαση ολοκληρώνεται με την ανάλυση της ευστάθειας βραχωδών πρανών διαφορετικής κλίμακας και συστημάτων ασυνεχειών με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Phase2 v8.0, Rocscience). Υπολογίζονται για κάθε περίπτωση οι συντελεστές ασφαλείας, σημειώνεται ο αντίστοιχος μηχανισμός αστοχίας, γίνεται συγκριτική περιγραφή και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα.

## Λέξεις κλειδιά:

- Ανισοτροπία • Βραχώμαζα • Βραχώδη πρανή • Πεπερασμένα στοιχεία •



# Abstract

The present diploma thesis was implemented in the framework of the Post Graduate Course “Design and Construction of Underground Works” and studied the “Influence of anisotropy and scale on the stability of rock slopes”.

The thesis highlights the peculiarities of construction of geotechnical works on the surface and inside rock masses and also the crucial role of the geometry and the mechanical properties of discontinuities in the mechanical behaviour of the rock mass. Moreover, it indicates how this behaviour changes according to the scale of magnitude of the construction project.

The thesis in its chapters outlines all the relevant terms such as rock material, discontinuities and anisotropy. It presents the various failure mechanisms and analyses the mechanical behaviour and the strength of rock masses in relation to their structure. Furthermore, it is followed by an overview of the large amount of experimental study on jointed materials made by different researchers in order to define the parameters that affect the jointed rock strength and deformability.

A more detailed reference is made on the stability of rock slopes and the recent analysis capabilities by using the Finite Element Method (FEM) in combination with the technique of Shear Strength Reduction (SSR).

The general presentation concludes by analyzing the stability of rock slopes with various scales and discontinuity systems with the use of the finite element program Phase2 v8.0 by Rocscience. The program calculates for each case the safety factor and shows the corresponding failure mechanism.

## Keywords:

- Anisotropy • Rockmass • Rock slopes • Finite elements •



# Πρόλογος

Η *πρόβλεψη* και η *ανάλυση* της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών κατασκευής ενός τεχνικού έργου έχουν ιδιαίτερη σημασία για την τεχνική αρτιότητα της μελέτης και την αξιοπιστία των ελέγχων ασφαλείας.

Είναι γνωστό ότι τόσο τα εδαφικά, όσο και τα βραχώδη υλικά διαφέρουν από τα ιδανικά πρότυπα των συνεχών μέσων. Τα *τεχνικά υλικά* είναι ομοιογενή και έχουν γνωστές ιδιότητες επειδή η διαδικασία παρασκευής τους ακολουθεί αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ομοιογένεια και ακρίβεια των μηχανικών τους ιδιοτήτων (πχ. σκυρόδεμα, χάλυβας, πλαστικά υλικά). Τα *εδαφικά υλικά* αποτελούν μέσα ασυνεχή καθώς συνίστανται από κόκκους και πόρους, αλλά στις κλίμακες των τεχνικών έργων η συμπεριφορά τους είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με εκείνη των συνεχών μέσων. Κατ' επέκταση οι θεωρίες ελαστικότητας και ελαστο-πλαστικότητας είναι εφαρμόσιμες στις επιλύσεις των περισσότερων προβλημάτων Εδαφομηχανικής ανεξαρτήτως κλίμακας του υπό φόρτιση εδαφικού όγκου.

Τα *βραχώδη υλικά* διαφέρουν από τα εδαφικά και τεχνητά υλικά στο ότι πέραν των πόρων, μικρορωγμών και άλλων μικροσκοπικών ατελειών εμφανίζουν *δομική ασυνεχότητα μακροσκοπικής κλίμακας* η επίδραση της οποίας συναρτάται με το μέγεθος του φορτιζόμενου όγκου. Η κατάτμηση των βραχωδών μαζών από δομικές ασυνέχειες γεννά ένα μέσο ιδιότυπης μηχανικής συμπεριφοράς με κύρια χαρακτηριστικά την *ανομοιογένεια*, την *ανισοτροπία* και την *ανελαστικότητα*.

Η εκτίμηση των παραμέτρων που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας αποτελεί ένα αρκετά δύσκολο αντικείμενο. Ο καθοριστικός ρόλος της γεωμετρίας και των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας σχεδόν αποκλείει τη δυνατότητα τυποποιημένης προσέγγισης στο πρόβλημα ανάλυσης της ευστάθειας κατασκευών σε βράχο λόγω της εξαιρετικής μεταβλητότητας (στοχαστικός χαρακτήρας) τόσο των γεωμετρικών μεταβλητών (δομή βραχομάζας), όσο και των μηχανικών χαρακτηριστικών από θέση σε θέση.

Όταν μελετάται η κατασκευή ενός έργου πάνω ή μέσα σε βραχομάζα ο Μηχανικός θα πρέπει να λάβει υπόψη του ότι τα εξωτερικά φορτία είναι συχνά λιγότερο σημαντικά από εκείνα που θα προκύψουν από την αναδιάταξη της αρχικής εντατικής κατάστασης και ότι η στατική επάρκεια μιας κατασκευής σε βράχο. Στην πράξη η στατική επάρκεια της εξαρτάται από την ικανότητα των ασυνεχειών να παραμορφωθούν μόνιμα σε μια νέα θέση ισορροπίας κάτω από τη δράση των δυνάμεων που θα προκύπτουν από την κατασκευή.

Οι ιδιαιτερότητες αυτές επιβάλλουν την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης στις οποίες *οι ασυνέχειες αποτελούν προκαθορισμένες επιφάνειες αστοχίας*. Στην κατεύθυνση αυτή σύγχρονες αριθμητικές και αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν τη δυνατότητα προσέγγισης σύνθετων ασυνεχών μαζών με προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τεμαχίων της μάζας.

## 1. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια της ανάλυσης της συμπεριφοράς κατασκευών σε βραχομάζα αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίδραση της ανισοτροπίας και της κλίμακας στην ευστάθεια βραχωδών πρηνών.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων **Phase2 v8.0** της Rocscience με το οποίο μελετήθηκε το πρακτικό αντικείμενό της:

- ❖ Ανάλυση της συμπεριφοράς βραχωδών πρηνών με δύο συστήματα ασυνεχειών με εναλλαγές της γεωμετρίας τους, αλλά και της κλίμακας του εξεταζόμενου έργου.

## 2. Στόχοι διπλωματικής εργασίας

Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- Η κατανόηση βασικών εννοιών της βραχομηχανικής
- Η κατανόηση της επίδρασης των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας
- Η κατανόηση της επίδρασης της κλίμακας ενός προβλήματος βραχομηχανικής στη μηχανική συμπεριφορά και στην ευστάθεια της βραχόμαζας
- Η ανάδειξη της δυνατότητας ανάλυσης της ευστάθειας βραχωδών πρηνών με διάφορα συστήματα ασυνεχειών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων
- Η μελέτη προβλημάτων ευστάθειας βραχωδών πρηνών με αναλύσεις διαφορετικής κλίμακας και συστημάτων ασυνεχειών και η συγκριτική παρουσίασή τους

## 3. Δομή διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα (4) κεφάλαια, καθένα από τα οποία οργανώνεται σε επιμέρους ενότητες. Η διάρθρωση που ακολουθήθηκε έχει ως εξής:

- Στο **1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** ορίζονται οι έννοιες του βραχώδους υλικού, της βραχώδους μάζας, της ανισοτροπίας και το πώς η παρουσία των ασυνεχειών στη δομή της βραχόμαζας επηρεάζει τη μηχανική της συμπεριφορά.
- Στο **2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** αναλύεται εκτενώς η συμπεριφορά μιας ανισότροπης βραχόμαζας. Αρχικά, περιγράφονται έννοιες όπως η αντοχή του άρρηκτου υλικού, της βραχόμαζας και των ασυνεχειών και παρουσιάζονται τα σχετικά κριτήρια και οι θεωρίες που ισχύουν έως σήμερα. Στη συνέχεια, γίνεται μια ανασκόπηση της πειραματικής έρευνας διαφόρων ερευνητών σε υλικά με ασυνέχειες για την εκτίμηση της αντοχής τους και την παρατήρηση του τρόπου αστοχίας και της επιρροής των ασυνεχειών στην αντοχή και στην παραμορφωσιμότητα. Τέλος, γίνεται αναφορά σε αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης προβλημάτων βραχομηχανικής και σε σχετικά λογισμικά.
- Στο **3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιγράφεται η ανάλυση της συμπεριφοράς βραχωδών πρηνών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με την τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής. Επίσης, παρουσιάζονται δύο εργασίες σχετικά με την επιρροή της κλίμακας του έργου, της μορφής του δικτύου των ασυνεχειών και της γωνίας των κύριων συστημάτων ασυνεχειών στην ευστάθεια και στο μηχανισμό αστοχίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρακτικό αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας:

- Το **4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** αφορά βραχώδη πρηνή με δύο συστήματα ασυνεχειών κάθετα μεταξύ τους. Υπολογίζονται βάσει λογισμικού οι συντελεστές ασφαλείας και περιγράφεται ο μηχανισμός αστοχίας και το πώς αυτός επηρεάζεται από την κλίμακα του έργου και τη γεωμετρία των ασυνεχειών.

Τέλος, παρατίθεται η **Βιβλιογραφία** που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

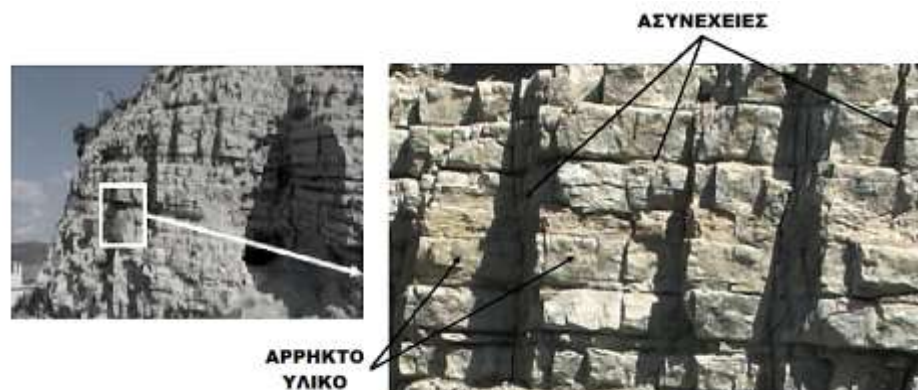
# 1ο Κεφάλαιο : Η βραχώμαζα ως δομικό υλικό

## 1.1 Γενικά στοιχεία

Τα γεωλογικά υλικά διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες: βραχώδη και εδαφικά. Μεταξύ αυτών υφίσταται και μια τρίτη κατηγορία των γαιωδών υλικών ή ημίβραχων που προέρχεται από την αποσάθρωση των βραχωδών υλικών ή τη μερική λιθοποίηση των νέων ιζημάτων – προϊόντων της διάβρωσης.

Ο όρος “**βραχώδες υλικό**” συχνά εναλλάσσεται με τον όρο “**πέτρωμα**”. Είναι το άρρηκτο ή ακέραιο γεωλογικό υλικό με μονοαξονική θλιπτική αντοχή  $\geq 5.0\text{MPa}$  (Bandis). Για την εκσκαφή του απαιτείται η χρήση εκρηκτικών υλών. Ως **άρρηκτο ή ακέραιο υλικό** νοείται τεμάχιο βραχώδους υλικού χωρίς μακροσκοπικές δομικές ατέλειες του οποίου οι υδραυλικές και μηχανικές ιδιότητες ελέγχονται από τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά ανεξαρτήτως του βαθμού αποσάθρωσης του υλικού. Τα κριτήρια ταξινόμησης βασίζονται σε δείκτες αντοχής και σκληρότητας των υλικών.

Σε μεγαλύτερη κλίμακα χρησιμοποιείται ο όρος “**βραχώδης μάζα**” ή “**βραχώμαζα**”. Στην κλίμακα της βραχώμαζας εμφανίζονται οι περισσότερες μορφές της δομής ενός γεωλογικού σχηματισμού και αντιστοιχεί στην κλίμακα άμεσου ενδιαφέροντος των τεχνικών έργων. Με τον όρο αυτό εννοούμε ένα *ασυνεχές στερεό* μέσο που αποτελείται από *άρρηκτο πέτρωμα* που διατέμνεται από *δομικές ασυνέχειες*.



Εικόνα 1.1 : Ενδεικτική παρουσίαση των στοιχείων της βραχώμαζας (άρρηκτο υλικό + ασυνέχειες).

Ο θεωρητικός και εφαρμοσμένος κλάδος της μηχανικής που μελετά τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων και της βραχώμαζας υπό τη δράση των δυνάμεων του φυσικού περιβάλλοντος ονομάζεται “**Βραχομηχανική**” και η ανάπτυξή του ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '50 με εργασίες των Trollope και Terzaghi που επισήμαναν τη σημασία των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας.

## 1.2 Περί ανισοτροπίας των πετρωμάτων

Αποτέλεσμα των εκατομμυρίων χρόνων μηχανικής, χημικής και θερμικής καταπόνησης που υφίστανται τα πετρώματα στη Γη είναι το γεγονός ότι πολλά από αυτά, κοντά στην επιφάνειά της, παρουσιάζουν καλά καθορισμένα δομικά στοιχεία υπό τη μορφή της διαστρωμάτωσης, της φύλλωσης, της σχιστότητας και των διακλάσεων.

Ένα ανισότροπο πέτρωμα παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές διευθύνσεις καταπόνησης. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να είναι: το μέτρο παραμορφωσιμότητας, η αντοχή, η διαπερατότητα και η συχνότητα των ασυνεχειών.



Η **ανισοτροπία** μπορεί να εντοπιστεί σε διάφορες κλίμακες στη βραχώμαζα ξεκινώντας από την ανισοτροπία των κρυστάλλων των ορυκτών, τη μικροδομή σε δοκίμια που εξετάζονται στο μικροσκόπιο, την ανισοτροπία στην κλίμακα του εργαστηρίου μέχρι και σε μεγέθη που συναντώνται σε έργα μηχανικού. Έτσι, στις παραγράφους που ακολουθούν θα γίνει αναφορά τόσο στην **ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος** (μικροδομική ασυνεχότητα), όσο και στην **ανισοτροπία της βραχώμαζας** (μακροδομική ασυνεχότητα).

Η ανισοτροπία αποτελεί σημαντικό στοιχείο στα τεχνικά και μεταλλευτικά έργα (σταθεροποίηση υπόγειων/επιφανειακών εκσκαφών, σταθεροποίηση θεμελιώσεων, διάτρηση και ανατίναξη, ροή ρευστών στη βραχώμαζα κτλ.), αλλά και στη μηχανική του πετρελαίου (ευστάθεια και απόκλιση γεωτρήσεων, παραμόρφωση και αντοχή των τοιχωμάτων της γεώτρησης, θραύση και επέκταση στο περιβάλλον τοίχωμα, ροή ρευστών κτλ.).

### 1.2.1 Ανισοτροπία άρρηκτου πετρώματος

Η ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος οφείλεται στη διάταξη των ορυκτών και των κόκκων κατά μήκος επιφανειών με διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την προέλευση και τη γένεση του πετρώματος.

Τα *πυριγενή πετρώματα* έχουν συνήθως ισότροπη συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στη διαδικασία σχηματισμού τους η οποία γίνεται με την πήξη του μάγματος. Ωστόσο, η ανομοιομορφη ψύξη μπορεί να προσδώσει ιδιότητες ανισοτροπίας. Το ίδιο μπορεί να συμβεί όταν ο σχηματισμός τους γίνεται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα.

Τα *μεταμορφωμένα πετρώματα* προκύπτουν έπειτα από ένα σύνολο διεργασιών που επιδρούν στο αρχικό πέτρωμα αλλάζοντάς του τον ιστό, την ορυκτολογική σύσταση ή και τα δύο υπό συνθήκες αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας με ή χωρίς την παρουσία χημικών ενεργών ρευστών και χωρίς αυτά να περιέλθουν σε τήξη. Αποτέλεσμα της διαδικασίας μεταμόρφωσης είναι η ανάκτηση χαρακτηριστικών επιπέδων αδυναμίας (σχιστότητα) και ανισότροπων ιδιοτήτων καθώς τα ορυκτά είναι εκλεκτικά προσανατολισμένα και παραμορφωμένα κατά μήκος των επιπέδων σχιστότητας (πχ. γνεύσιος, φυλλίτης, σχιστόλιθος).

Τα *ιζηματογενή πετρώματα* είναι το αποτέλεσμα της γεωλογικής διαδικασίας της διαγένεσης κατά την οποία τα χαλαρά ιζήματα μετατρέπονται σε πετρώματα. Η διαδικασία της διαγένεσης δε συντελείται υπό καθεστώς πίεσης και θερμοκρασίας όπως κατά τη μεταμόρφωση, αλλά πραγματοποιείται όσο τα ιζήματα καλύπτονται από νέες στρώσεις ιζημάτων ώστε βαθμιαία σκληραίνουν λόγω συμπίεσης και συγκόλλησης. Η στρωσιγένεια προσδίδει στα πετρώματα επίπεδα αδυναμίας και μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών (πχ. ιλυόλιθος, ψαμμίτης, ασβεστόλιθος), ωστόσο, υπάρχουν και αρκετοί ιζηματογενείς σχηματισμοί με ισότροπη συμπεριφορά όπως ο συμπαγής ασβεστόλιθος.

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ανισότροπων άρρηκτων πετρωμάτων είναι ο **σχισμός**, η **στρώση** και η **σχιστότητα**.

- **Σχισμός**

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα πολλών κρυσταλλικών σωμάτων είναι ο σχισμός (Παπαγεωργάκης, Κουμαντάκης, 1984), δηλαδή η διάσπαση κατά επίπεδα εντελώς καθορισμένα και υπακούοντα στη συμμετρία του κρυστάλλου υπό την επίδραση μιας μηχανικής καταπόνησης (θλίψης, εφελκυσμού, κρούσης). Η τελειότητα και η θέση των επιπέδων σχισμού εξαρτώνται από την κρυσταλλική δομή. Ο κρύσταλλος σχίζεται παράλληλα προς ορισμένα δικτυωτά επίπεδα και μάλιστα εκείνα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τους ασθενέστερους δεσμούς. Σε μερικά ορυκτά υπάρχει μια διεύθυνση σχισμού και σε άλλα δύο ή περισσότερες διευθύνσεις.



**Εικόνα 1.2 : Τέλειος σχισμός ορυκτού άλατος**

Οι μαρμαρυγίες χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό για αυτό και διαχωρίζονται σε λεπτότατα φύλλα. Επίσης, ο ασβεστίτης παρουσιάζει τέλειο σχισμό κατά τις τρεις έδρες του ρομβόεδρου και στην ιδιότητα αυτή οφείλει το μάρμαρο την αξία του ως υλικό κατασκευής γλυπτών έργων τέχνης.

Ο σχισμός αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα της κρυσταλλικής ύλης και επηρεάζει αποφασιστικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη μηχανική ανισοτροπία των κρυσταλλικών σωμάτων.

Τα ορυκτά που στερούνται σχισμού (πχ. χαλαζίας) όταν καταπονηθούν μηχανικά θραύονται αντί να σχίζονται και τότε γίνεται λόγος περί θραύσης. Ο σχισμός δεν πρέπει να συγχέεται με την ιδιότητα της σχιστότητας που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

- **Στρώση**

Η στρώση χαρακτηρίζει, όπως προαναφέρθηκε, τα ιζηματογενή πετρώματα που διατάσσονται στο χώρο κατά σειρές στρωμάτων. Τα επίπεδα στρώσεων είναι οι επαφές μεταξύ επάλληλων στρωμάτων που αποτέθηκαν με χρονική διαφορά. Λόγω προέλευσης αποτελούν μεγάλης έκτασης ενιαίες επιφάνειες κατά μήκος των οποίων είναι δυνατόν να συμβούν ολισθήσεις μεγάλων μαζών. Επομένως, η στρώση αποτελεί *επιφάνεια ολικής ασυνέχειας του πετρώματος* στη φυσική της θέση.

- **Σχιστότητα**

Η σχιστότητα αναπτύσσεται, όπως προαναφέρθηκε, όταν ένα πέτρωμα υποβληθεί σε αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις με αποτέλεσμα τη διάλυση των ορυκτών υλικών και την επανακρυστάλλωση όταν ελαχιστοποιηθούν οι τάσεις σε πλακώδη έως φυλλώδη μορφή. Τα ορυκτά διατάσσονται σε παράλληλες στρώσεις κατά την κατεύθυνση που είναι κάθετη προς το επίπεδο των διαμηθικών τάσεων προσδίδοντας στο πέτρωμα τη σχιστοφυή υφή του.



**Εικόνα 1.3 : Χαρακτηριστική μορφή σχιστοφυούς υφής**

Τα σχιστολιθικά πετρώματα παρουσιάζουν μέγιστη αντοχή σε θλίψη όταν η διεύθυνση των φορτίων είναι κάθετη προς τα επίπεδα σχιστότητας και ελάχιστη αντοχή όταν τα φορτία εφαρμόζονται υπό γωνία  $45^\circ + \phi/2$  προς αυτά, όπου  $\phi$  η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος. Γενικώς, τα επίπεδα σχιστότητας αποτελούν επιφάνειες ασυνέχειας, αλλά όχι τόσο επικίνδυνες όσο άλλες καθώς σημαντικό ρόλο παίζει και ο βαθμός αποσάθρωσης (Παπαγεωργάκης, Κουμαντάκης, 1984).

## 1.2.2 Ανισοτροπία βραχώμαζας

Στη βραχώμαζα η ανισοτροπία απορρέει από την παρουσία των ασυνεχειών στη δομή της. Οι **ασυνέχειες** είναι επιφάνειες μηχανικής θραύσης που δημιουργήθηκαν από τεκτονικές ή άλλες φορτίσεις των αρχικά άρρηκτων γεωλογικών υλικών (πετρωμάτων). Ο όρος ασυνέχεια χαρακτηρίζει κάθε επιφάνεια διαχωρισμού του πετρώματος με πρακτικά μηδενική εφελκυστική αντοχή. Κατά τον Muller (1963) οι ασυνέχειες είναι εκείνες που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων και κάνουν τη βραχομηχανική ένα ξεχωριστό κλάδο της μηχανικής.

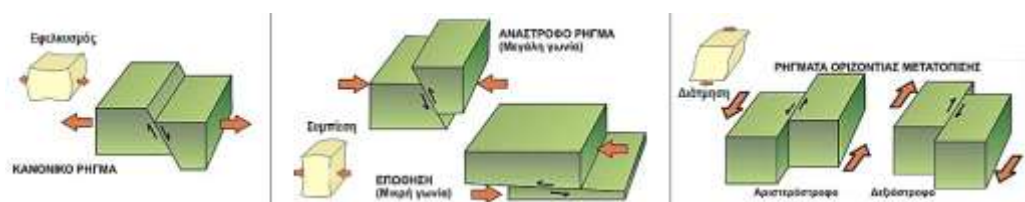
Ανάλογα με τις συνθήκες γένεσης και εξέλιξής τους αναφέρονται ως στρώσεις, ρήγματα ή διακλάσεις.

Οι **στρώσεις** αποτελούν επιφάνειες διαχωρισμού ιζηματογενών πετρωμάτων της ίδιας ή διαφορετικής λιθολογίας. Από γεωλογικής πλευράς οι στρώσεις υποδηλώνουν μεταβολή των συνθηκών ή υλικών κατά την ιζηματογένεση. Από γεωτεχνικής πλευράς τα επίπεδα στρώσεων αποτελούν πιθανές επιφάνειες ολίσθησης μεγάλης εμμονής.



Εικόνες 1.4 – 1.5 : Απόψεις στρωσιγενών σχηματισμών

Τα **ρήγματα** είναι επιφάνειες θραύσης του βράχου κατά μήκος των οποίων έχουν σημειωθεί σημαντικές μετατοπίσεις (από μερικά εκατοστά έως μερικά χιλιόμετρα). Σχηματίστηκαν λόγω της συγκέντρωσης τάσεων τεκτονικής προέλευσης και υπέρβασης του ορίου της μηχανικής αντοχής του βράχου. Εμφανίζονται μεμονωμένα ή σε επαλληλία σχηματίζοντας ρηγματωμένες ζώνες. Όταν το ρήγμα συνδέεται με ενεργό σεισμική δραστηριότητα ονομάζεται ενεργό. Τα ρήγματα συναντώνται σπανιότερα σε σχέση με τους άλλου τύπου ασυνεχειών, αλλά αποτελούν πάντοτε αιτία σοβαρών τεχνικών προβλημάτων, διότι περί αυτών δημιουργούνται οικογένειες διακλάσεων σε συνδυασμό με ζώνες χαμηλής διατμητικής αντοχής και δυσκαμψίας που το μέγεθός τους συχνά αποκλείει τη δυνατότητα τεχνικών επεμβάσεων.



Σχήμα 1.1 : Οι κυριότεροι τύποι ρηγμάτων



Εικόνα 1.6 : Κατοπτρικές επιφάνειες ρημάτων

Οι **διακλάσεις** είναι επιφάνειες θραύσης του βράχου κατά τη δημιουργία των οποίων δε σημειώθηκαν σχετικές μετατοπίσεις. Αποτελούν την κύρια δομή ατελειών της βραχώμαζας. Οι διακλάσεις αναπτύσσονται συνήθως κάθετα στις στρώσεις, εμφανίζουν επαναληψιμότητα και επιλεκτικό προσανατολισμό στο χώρο σχηματίζοντας συστήματα. Το μήκος των διακλάσεων ποικίλει από μερικά εκατοστά έως αρκετές δεκάδες μέτρα. Επίσης, μπορούν να είναι ανοικτές, πληρωμένες ή ανασυγκολλημένες.



Εικόνα 1.7 – 1.8 : Διακλάσεις που αποκαλύπτονται στις επιφάνειες βραχωδών πρανών

### 1.3 Τεχνική περιγραφή των βραχωδών υλικών και μαζών

Η περιγραφή των βραχωδών υλικών και μαζών γίνεται βάσει των εξής παραμέτρων: αντοχή, δομικός ιστός και υφή, αποσάθρωση και εξαλλοίωση.

#### 1. Αντοχή

Η κλίμακα αντοχής που συνήθως χρησιμοποιείται βασίζεται στη μονοαξονική θλιπτική αντοχή  $\sigma_c$ . Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται εκτιμήσεις πεδίου της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής κατά ISRM (1981) για διάφορους τύπους άρρηκτων βράχων:

Βαθμονόμηση	Όρος	$\sigma_c$ (MPa)	Εκτίμηση αντοχής	Τύποι πετρωμάτων
R6	Εξαιρετικά σκληρό	> 250.0	Το βραχώδες υλικό απολεπίζεται μόνο κάτω από επαναλαμβανόμενα χτυπήματα του γεωλογικού σφυριού	Υγιής βασάλτης, γνεύσιος, γρανίτης, χαλαζίας
R5	Πολύ σκληρό	100.0 – 250.0	Απαιτούνται πολλά χτυπήματα με το γεωλογικό σφυρί για να σπάσουν τμήματα του άρρηκτου βράχου	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, δολομίτης, ασβεστόλιθος, μάρμαρο, ρυόλιθος, τόφφος
R4	Σκληρό	50.0 – 100.0	Κομμάτια μεγέθους γροθιάς σπάνε με ένα μόνο χτύπημα του γεωλογικού σφυριού	Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, φυλλίτης, ψαμμίτης, σχιστόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
R3	Μέτρια σκληρό	25.0 – 50.0	- Με δυνατό χτύπημα το γεωλογικό σφυρί χαράσσει το βράχο μέχρι 5.0mm. - Το μαχαίρι ξύνει την επιφάνεια	Αργιλόλιθος, κάρβουνο, σκυρόδεμα, σχιστόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
R2	Ασθενές	5.0 – 25.0	Το μαχαίρι κόβει το δείγμα, αλλά είναι δύσκολη η μόρφωση δοκιμίου τριαξονικής αντοχής	Τάλκης, ορυκτό άλας, ποτάσα
R1	Πολύ ασθενές	1.0 – 5.0	Το υλικό σπάει κάτω από δυνατά χτυπήματα με τη μύτη του γεωλογικού σφυριού και μπορεί να μορφοποιηθεί με μαχαίρι	Πολύ αποσαθρωμένο ή μεταμορφωμένο πέτρωμα
R0	Εξαιρετικά ασθενές	0.25 – 1.0	Χαράσσεται με το νύχι	Αργιλικό υλικό πλήρωσης ρήγματος

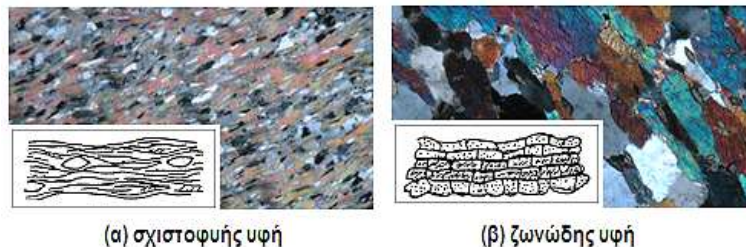
Πίνακας 1.1 : Βαθμονόμηση αντοχής πετρωμάτων σύμφωνα με την ISRM (1981)

## 2. Δομικός ιστός και υφή

Ο δομικός ιστός αναφέρεται στο γενικό φυσικό χαρακτήρα των πετρωμάτων και καθορίζεται από επιμέρους χαρακτηριστικά των κόκκων και των ορυκτών συστατικών όπως το μέγεθος (χονδρόκοκκο, λεπτόκοκκο κτλ.), το σχήμα, τον τρόπο σύνδεσης και το βαθμό κρυσταλλοποίησης (ολο-κρυσταλλικό, μεσο-κρυσταλλικό κτλ.).

Η υφή περιγράφει τη χωρική διάταξη των ορυκτών και δομικών στοιχείων που συγκροτούν ένα πέτρωμα και, επομένως, αποτελεί ένα μέτρο ομοιογένειας του υλικού. Περιγράφεται είτε ως *ισότροπη* με τυχαίο προσανατολισμό των κόκκων και των ορυκτών στο χώρο είτε ως *ανισότροπη* που περιλαμβάνει μορφές όπως η διαστρωμάτωση των ιζηματογενών πετρωμάτων και τον επιλεκτικό προσανατολισμό των κρυστάλλων σε μεταμορφωμένα πετρώματα (πχ. ζωνώδης υφή → επιλεκτική διάταξη των ορυκτών παράλληλα προς τη μεγάλη επιφάνειά τους, σχιστοφυής υφή → επιλεκτική διάταξη των ορυκτών σε ζώνες). Τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν την υφή αντιπροσωπεύουν εν δυνάμει επίπεδα αδυναμίας. Πετρώματα παρόμοιας ορυκτολογικής σύστασης είναι δυνατόν να έχουν πολύ διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες λόγω της υφής.

Ο δομικός ιστός σε συνδυασμό την υφή καθορίζουν την αντοχή και την *ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος*.



Εικόνα 1.9 : Παραδείγματα υφής πετρωμάτων στο μικροσκόπιο

## 3. Αποσάθρωση και εξαλλοίωση

Ως αποσάθρωση καλείται η βαθμιαία αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω μηχανικών, χημικών και οργανικών διεργασιών.

Η **μηχανική αποσάθρωση** προκαλείται από φυσικές διεργασίες όπως δράση παγετού, προσρόφηση και αποβολή νερού, θερμοκρασιακές εναλλαγές, καθώς και ισχυρές μεταβολές των τάσεων πλησίον της θέσης του εκτεθειμένου πετρώματος. Προκαλείται από τη διεύρυνση των ασυνεχειών ή τη δημιουργία νέων, τη χαλάρωση του ιστού και τη ρωγμάτωση των ορυκτών κόκκων.

Η **χημική αποσάθρωση ή εξαλλοίωση** είναι η διεργασία που δια μέσου χημικών αντιδράσεων (υδρόλυσης, οξειδωσης, ανταλλαγής ιόντων) μετατρέπει τα ορυκτά σε νέους χημικούς συνδυασμούς που είναι σταθεροί στις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Αποσάθρωση προκαλεί πολλές φορές και ο οργανικός κόσμος οπότε γίνεται λόγος για οργανική αποσάθρωση. Η **οργανική αποσάθρωση** προκαλείται από φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Οι ρίζες των δέντρων εισέρχονται μέσα στις ρωγμές των πετρωμάτων και με την αύξησή τους θρυμματίζουν το πέτρωμα. Καταστροφή προκαλούν ακόμα και διάφορα ζώα (τρωκτικά, ερπετά, σκουλήκια κα.) που ζουν περιοδικά ή κατασκευάζουν τις φωλιές τους μέσα στο έδαφος.

Ο βαθμός αποσάθρωσης είναι άμεσα συνδεδεμένος με την αντοχή των πετρωμάτων και εξαρτάται από το βαθμό κερματισμού καθώς η παρουσία των ασυνεχειών διευκολύνει τη δράση των παραγόντων αποσάθρωσης στο εσωτερικό της βραχώμαζας επιταχύνοντας και εξαπλώνοντας την.

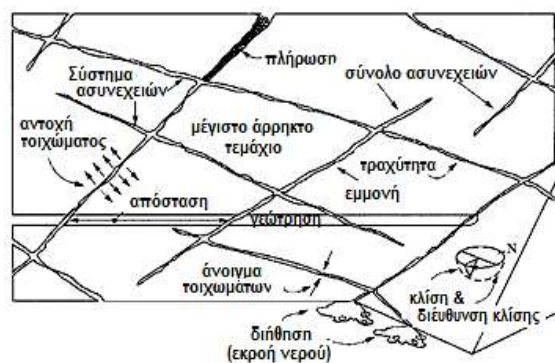
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται εκτιμήσεις του βαθμού αποσάθρωσης των πετρωμάτων και γεωτεχνικές χρήσεις τους κατά τη Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής ISRM :

Βαθμός Αποσάθρωσης	Όρος	Περιγραφή	Γεωτεχνική Χρήση
I	Υγιές πέτρωμα	Όχι εμφανής αποσάθρωση στο πέτρωμα. Πιθανόν μόνο αποχρωματισμός των επιφανειών κάποιων κύριων ασυνεχειών.	<u>Το καλύτερο για γεωτεχνική χρήση.</u> Επιμέρους τεμάχια βραχώμαζας μπορεί να χαλαρώσουν λόγω εκρήξεων ή απελευθέρωσης τάσεων και συνεπώς <u>μπορεί να απαιτηθεί υποστήριξη.</u>
II	Ελαφρά αποσαθρωμένο πέτρωμα	Αυξημένος αποχρωματισμός που υποδηλώνει αποσάθρωση του βραχώδους υλικού και των επιφανειών των ασυνεχειών. Όλο το βραχώδες υλικό μπορεί να έχει αποχρωματιστεί από την αποσάθρωση και μπορεί κατά κάποιο τρόπο να είναι ασθενέστερο εξωτερικά από ότι στην υγιή του κατάσταση.	<u>Κατάλληλο για θεμελίωση μεγάλων κατασκευών</u> από μπετόν (πχ. φραγμάτων), αλλά είναι αυξημένης υδατοπερατότητας λόγω ανοικτών ασυνεχειών. <u>Μπορεί να γίνει χρήση του σαν αδρανές</u> ύστερα από εξέταση. Απαιτεί <u>χρήση εκρηκτικών για τη διάνοιξη.</u>
III	Μέτρια αποσαθρωμένο πέτρωμα	Λιγότερο από το 50% του βραχώδους υλικού παρουσιάζει αποσύνθεση και/ή μετατρέπεται σε έδαφος. Υγιές ή αποχρωματισμένο πέτρωμα υπάρχει με τη μορφή συνεχούς μέσου ή βραχωδών τεμαχίων.	<u>Κατάλληλο για θεμελίωση μικρών κατασκευών</u> από μπετόν. Πολλές ρωγμές σχηματίζονται κάτω από τις ερπίστριες εκσκαπτικού μηχανήματος.
IV	Ισχυρά αποσαθρωμένο πέτρωμα	Περισσότερο από το 50% του βραχώδους υλικού παρουσιάζει αποσύνθεση και/ή μετατρέπεται σε έδαφος. Υγιές ή αποχρωματισμένο πέτρωμα υπάρχει με τη μορφή συνεχούς μέσου ή βραχωδών τεμαχίων.	<u>Ακατάλληλο για φράγματα από μπετόν και μεγάλες κατασκευές. Κατάλληλο για χωμάτινα φράγματα – επιχώματα.</u> Ασταθές σε υψηλά και απότομα ορύγματα. Χρειάζεται προστασία από τη διάβρωση.
V	Έντονα αποσαθρωμένο πέτρωμα	Όλη η βραχώδης μάζα έχει αποσυντεθεί και/ή μετατραπεί σε έδαφος, αλλά η αρχική βραχώδης δομή είναι ακόμα άθικτη στη μεγαλύτερη της έκταση.	Παρόμοια γεωτεχνική απόκριση με την προηγούμενη κατηγορία (IV)
VI	Υπολειμματικό έδαφος	Όλη η βραχώμαζα έχει μετατραπεί σε έδαφος και η αρχική βραχώδης δομή όπως και ο δομικός σκελετός του υλικού έχουν καταστραφεί. Υπάρχει σημαντική μεταβολή στον όγκο, αλλά δεν έχουν σημειωθεί ακόμα ουσιαστικές μετακινήσεις του εδαφικού υλικού.	<u>Ακατάλληλο για σημαντικές κατασκευές.</u> Ασταθές σε πρηνή όταν έχει καταστραφεί η φυτοκάλυψη καθώς διαβρώνεται εύκολα.

**Πίνακας 1.2 : Βαθμονόμηση αποσάθρωσης πετρωμάτων σύμφωνα με την ISRM (1981)**

## 1.4 Τεχνική περιγραφή των ασυνεχειών

Η περιγραφή και η αξιολόγηση των φυσικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών παρέχουν ουσιώδη στοιχεία για το χαρακτηρισμό της γεωτεχνικής ποιότητας της βραχώμαζας. Η παρατήρηση – καταγραφή των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται σε δείγματα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων ή/και σε φυσικές εμφανίσεις.



**Σχήμα 1.2 : Συνοπτική απεικόνιση των κύριων φυσικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών της βραχώμαζας**

Η Διεθνής Εταιρεία Βραχομηχανικής έχει επιλέξει δέκα παραμέτρους (Brown, 1981) για το χαρακτηρισμό των ασυνεχειών και της δομής της βραχομάζας. Αυτές είναι οι εξής:

### 1. Προσανατολισμός

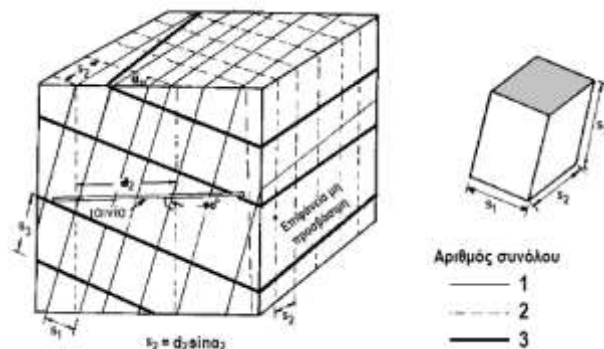
Οι ασυνέχειες αποτελούν επίπεδα στο χώρο. Ο προσανατολισμός τους περιγράφεται από την κλίση των επιπέδων και τη διεύθυνση κλίσης (ή αζιμούθιο).



Σχήμα 1.3 : Παράταξη, κλίση και διεύθυνση κλίσης προσανατολισμένου επιπέδου

### 2. Απόσταση επανάληψης

Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών. Συνήθως, αναφέρεται στη μέση ή στη συνηθέστερη ορθή απόσταση ενός συνόλου ασυνεχειών.



Σχήμα 1.4 : Μέτρηση της απόστασης επανάληψης (s) ασυνεχειών σε τομή βραχομάζας

Ανάλογα με τη συνηθέστερα μετρούμενη απόσταση χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά πυκνές έως εξαιρετικά αραιές ως εξής:

Περιγραφικός όρος	Απόσταση (s)
Εξαιρετικά αραιή	> 6.0m
Πολύ αραιή	2.0m – 6.0m
Αραιή	600.0mm – 2.0m
Μέτρια αραιή	200.0mm – 600.0mm
Πυκνή	60.0mm – 200.0mm
Πολύ πυκνή	20.0mm – 60.0mm
Εξαιρετικά πυκνή	< 20.0mm

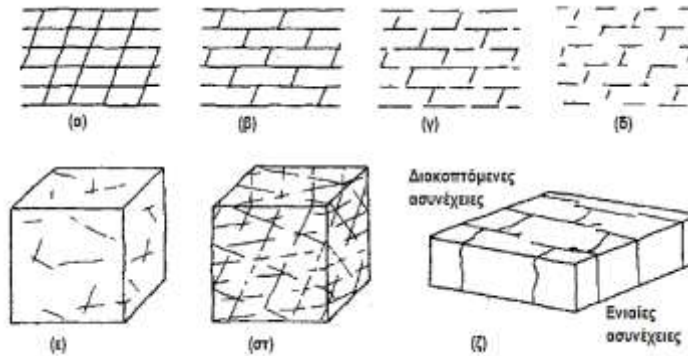
Πίνακας 1.3 : Περιγραφικοί όροι σχετικά με την απόστασή επανάληψης ασυνεχειών

### 3. Εμμόνη

Είναι το μήκος του ίχνους μιας ασυνέχειας που παρατηρείται σε μια αποκάλυψη του πετρώματος. Δίνει ένα μέτρο της χωρικής έκτασης ή του μήκους διεύθυνσης μιας ασυνέχειας. Το σταμάτημά της σε συμπαγές πέτρωμα ή σε άλλες ασυνέχειες μειώνει την εμμόνη της. Ανάλογα με το συνηθέστερο μήκος του μετρημένου ίχνους χαρακτηρίζονται από πολύ μικρής έως πολύ μεγάλης εμμόνης. Τυπικές διαγραμματικές απεικονίσεις φαίνονται στο επόμενο σχήμα.

Περιγραφικός όρος	Μήκος
Πολύ μικρή	< 1.0m
Μικρή	1.0m – 3.0m
Μέση	3.0m – 10.0m
Μεγάλη	10.0m – 30.0m
Πολύ μεγάλη	> 30.0m

**Πίνακας 1.4 :** Περιγραφικοί όροι σχετικά με την εμμονή των ασυνεχειών



**Σχήμα 1.5 :** Σκαριφήματα και ογκοδιαγράμματα στα οποία φαίνεται η σχετική εμμονή διαφόρων συνόλων ασυνεχειών

#### 4. Αριθμός συστημάτων

Είναι ο αριθμός των συστημάτων των ασυνεχειών που συνιστούν το σύστημα της βραχομάζας. Με βάση τον αριθμό των συστημάτων η βραχομάζα διακρίνεται σε εννέα κατηγορίες από συμπαγές πέτρωμα έως συντριμμένο πέτρωμα. Η βραχομάζα δύναται να διαχωρίζεται και από μεμονωμένες ασυνέχειες που καταγράφονται σε ατομική βάση.



**Σχήμα 1.6 :** Ογκοδιαγράμματα στα οποία φαίνονται ο αριθμός συστημάτων ασυνεχειών και η επίδρασή τους στη μηχανική συμπεριφορά και στην εμφάνιση των βραχωδών μαζών

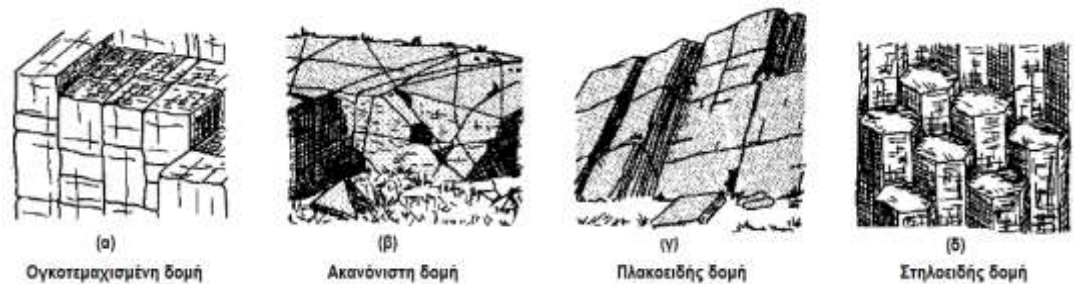
#### 5. Μέγεθος τεμάχους

Είναι η διάσταση του βραχώδους τεμάχους που προκύπτει από τα διατεμνόμενα σύνολα ασυνεχειών. Καθορίζεται από τον αριθμό των συστημάτων, την απόσταση επανάληψης και την εμμονή των ασυνεχειών.

Για την περιγραφή του μεγέθους μπορεί να εφαρμοσθεί η εξής μεθοδολογία: Επιλέγονται από παρατηρήσεις μπλοκ τυπικού μεγέθους και μετρώνται οι μέσες διαστάσεις του κάθε τεμαχίου. Από τις συνολικές μετρήσεις εξάγεται η μέση τιμή μεγέθους του μοναδιαίου τεμαχίου (θα πρέπει να αναφέρεται και ο αριθμός των συστημάτων ασυνεχειών). Ανάλογα με την τιμή το μέγεθος τεμάχους χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό έως πολύ μεγάλο.

Στη βραχομάζα δίνονται, επίσης, επιθετικοί προσδιορισμοί μεγέθους και μορφής του τεμάχους. Ενδεικτικές περιπτώσεις εικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί. Στην περίπτωση πλακοειδών και στηλοειδών δομών η περιγραφή γίνεται σαφέστερη με την προσθήκη στοιχείων προσανατολισμού. Μεμονωμένες ασυνέχειες δύναται να επηρεάζουν, επιπλέον, τη μορφή και το μέγεθος του τεμάχους.

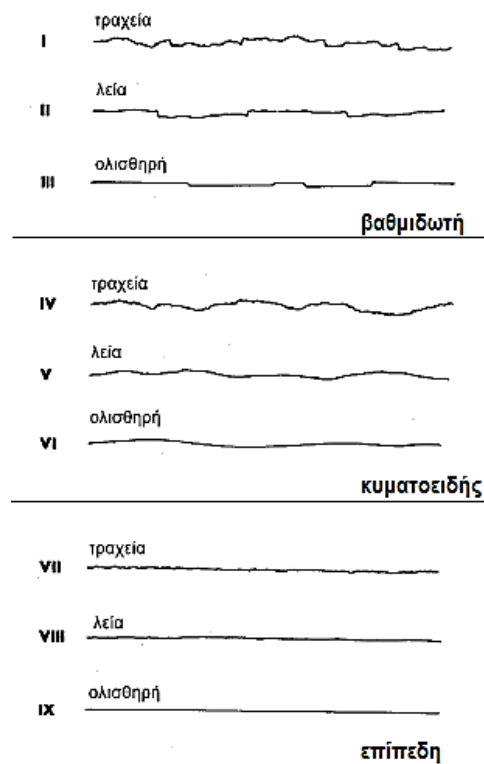




Σχήμα 1.7 : Σκαριφήματα βραχωδών μαζών ανάλογα με τη γεωμετρία/μορφή των άρρηκτων (μοναδιαίων) τεμαχίων

## 6. Τραχύτητα

Αναφέρεται στην εγγενή τραχύτητα (μικρή και μεσαία κλίμακα) και στην κύμανση σε σχέση με το μέσο επίπεδο της ασυνέχειας. Αμφότερες συνεισφέρουν στη διατμητική αντοχή αυξάνοντας τη φαινόμενη γωνία τριβής. Πρόκειται για τρεις κλίμακες παρατήρησης, μία μερικών cm, μία μερικών m και μία μεγάλη πάνω από 10.0m. Η μικρή κλίμακα διακρίνει τις ασυνέχειες σε τραχείες, λείες και ολισθηρές, ενώ η μεσαία σε βαθμιδωτές, κυματοειδείς και επίπεδες. Μεγάλης κλίμακας κύμανση της ασυνέχειας αλλάζει τοπικά την κλίση.



Σχήμα 1.8 : Τυπικές τομές τραχύτητας και προτεινόμενη ονοματολογία. Το μήκος κάθε τομής είναι από 1.0m έως 10.0m. Η κατακόρυφη και η οριζόντια κλίμακα είναι ίδια

## 7. Αντοχή τοιχώματος

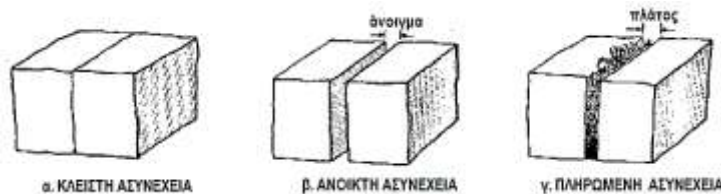
Ισοδύναμη θλιπτική αντοχή του πετρώματος των γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας που αποτελεί σημαντική συνιστώσα της διατμητικής αντοχής εφόσον τα τοιχώματα είναι σε επαφή.

Οι ασυνέχειες αποτελούν τους αγωγούς διακίνησης του νερού στο εσωτερικό των βραχωδών μαζών με τα τοιχώματα των ασυνεχειών είναι από τα πρώτα στοιχεία της μάζας που υφίστανται τις συνέπειες της αποσαθρωτικής δράσης του νερού. Ως εκ τούτου, δύναται να είναι χαμηλότερη της αντοχής

τεμαχίου πετρώματος λόγω αποσάθρωσης ή εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων. Ο βαθμός (δείκτης) αποσάθρωσης (ή εξαλλοίωσης) της βραχομάζας διακρίνεται σε έξι κατηγορίες από υγιές πέτρωμα έως παραμένον έδαφος. Η εκτίμηση της αντοχής γίνεται είτε με βάση το χαρακτηρισμό είτε με απλές έμμεσες δοκιμές όπως το αποτέλεσμα χτυπήματος με το γεωλογικό σφυρί και η αναπήδηση της σφύρας Schmidt.

## 8. Ανοιγμα

Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ των γειτονικών τοιχωμάτων της ασυνέχειας της οποίας ο ενδιάμεσος χώρος είναι πληρωμένος μόνο με αέρα ή νερό. Ο χαρακτηρισμός του ανοίγματος διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: κλειστό (<0.50mm), διάκενο (0.50mm – 10.0mm) και ανοικτό (>10.0mm).



Σχήμα 1.9 : Σκαριφήματα ορισμών του ανοίγματος ασυνεχειών.

## 9. Πλήρωση

Υλικό που διαχωρίζει τα γειτονικά τοιχώματα μιας ασυνέχειας και που είναι συνήθως ασθενέστερο από το μητρικό πέτρωμα. Το διάστημα μεταξύ των τοιχωμάτων στην περίπτωση αυτή ονομάζεται πλάτος σε αντιδιαστολή με τον όρο άνοιγμα. Τα υλικά πλήρωσης είναι από σκληρά όπως πχ. ασβεστίτης ή χαλαζίας (προκαλούν "επούλωση" της ασυνέχειας και σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής) έως πολύ μαλακά πχ. χλωρίτης, άμμος, ιλύς, άργιλος, μυλονίτης, υλικά ρωγματώσεων, τεμάχια αποσαθρωμένου πετρώματος κτλ. Η γεωμετρία, ο τύπος του υλικού, η αντοχή και η υγρασία του χαρακτηρίζουν την πλήρωση μιας ασυνέχειας.

## 10. Διήθηση

Ροή νερού και εμφανής υγρασία είτε σε μεμονωμένες ασυνέχειες είτε στο σύνολο της βραχομάζας. Σε μεμονωμένες ασυνέχειες η βαθμονόμηση της διήθησης διαφέρει για πληρωμένες ασυνέχειες και για μη πληρωμένες.

Βαθμονόμηση της διήθησης γίνεται και για τη βραχομάζα όπως πχ. το τοίχωμα μιας σήραγγας. Παρατήρηση εκρών νερού ή παρουσίας υγρασίας από ή σε ασυνέχειες απολήγουσες σε εκτεθειμένες επιφάνειες βραχωδών μαζών αποτελεί σημαντική ένδειξη για την παρουσία υπόγειου νερού στο εσωτερικό της. Η πρόβλεψη της στάθμης υπογείου νερού, πιθανών ζωνών υπογείων ροών και μεγέθη υδραυλικών φορτίων λόγω της παρουσίας του υπόγειου νερού συχνά δίδουν έγκαιρη προειδοποίηση για ενδεχόμενη αστάθεια ή κατασκευαστικά προβλήματα. Η περιγραφή της κατάστασης εκρών από ασυνέχειες μπορεί να βασιστεί στους περιγραφικούς όρους κατάταξης του παρακάτω πίνακα:

Κατηγορία	Απόσταση (s)
I	Ασυνέχεια κλειστή, ξηρή, η εκροή φαίνεται αδύνατη
II	Ασυνέχεια ξηρή χωρίς ενδείξεις ροής νερού
III	Ασυνέχεια ξηρή, αλλά υπάρχουν ενδείξεις ροής πχ. οξείδωση τοιχωμάτων
IV	Ασυνέχεια υγρή χωρίς την παρουσία ελεύθερης ροής νερού
V	Στάγδην ροή νερού
VI	Συνεχής ροή νερού

Πίνακας 1.5 : Κατάταξη υγρασιών – εκρών νερού από ασυνέχειες

## 1.5 Μηχανισμοί αστοχίας και αντοχή βραχώμαζας

Σύμφωνα με τον Bandis οι **μηχανισμοί αστοχίας** της βραχώμαζας επηρεάζονται καθοριστικά από τους ακόλουθους παράγοντες:

- (α) τον προσανατολισμό των ασυνεχειών ως προς τις διευθύνσεις εφαρμογής των φορτίων
- (β) τη συχνότητα επανάληψης των ασυνεχειών που καθορίζει το μέσο μέγεθος των άρρηκτων τεμαχίων
- (γ) τα φυσικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (τραχύτητα και βαθμό συναρμογής των επιπέδων, ύπαρξη μαλακών υλικών πλήρωσης κτλ.)
- (δ) το πεδίο εντατικών συνθηκών και τη δυσκαμψία της περιβάλλουσας μάζας

Ανάλογα με το σχετικό προσανατολισμό των ασυνεχειών η αστοχία μιας βραχώμαζας είναι δυνατόν να εκδηλωθεί κατά μία από τις ακόλουθες μορφές:

- θραύση των τεμαχίων του άρρηκτου υλικού
- αστοχία κατά μήκος ενός ή περισσότερων συστημάτων ασυνεχειών συνήθως με διατμητική ολίσθηση ή με περιστροφική διάτμηση
- ενδιάμεση μορφή

Η συχνότητα επανάληψης των κύριων συστημάτων ασυνεχειών καθορίζει τα μεγέθη των μοναδιαίων τεμαχίων της βραχώμαζας. Τα μεγέθη αυτά επηρεάζουν σημαντικά τους μηχανισμούς παραμόρφωσής της βραχώμαζας που μπορεί να είναι οι εξής:

- διατμητική ολίσθηση
- περιστροφική διάτμηση
- εφελκυστική αποκόλληση

Η **διατμητική ολίσθηση** αφορά τις περιπτώσεις μεμονωμένων ασυνεχειών μεγάλου μήκους και αποτελεί την επικρατέστερη μορφή αστοχίας σε περιπτώσεις μέτρια ή αραιά διακλασμένων βραχωδών μαζών.

Η **περιστροφική διάτμηση** παρατηρείται συχνά σε έντονα διαρρηγμένες βραχώδεις μάζες πτωχής ποιότητας.



**Σχήμα 1.10 :** Παραδείγματα διατμητικής αστοχίας βραχωδών πρηνών

Τέλος, όσον αφορά την **αντοχή της βραχώμαζας** αυτή εξαρτάται από:

- (α) το αρχικό και δευτερογενές εντατικό πεδίο
- (β) τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος για δεδομένη γεωμετρία και άξονες φορτίων
- (γ) τη διατμητική αντοχή και τη δυσκαμψία των ασυνεχειών
- (δ) τις μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου υλικού









**Σχήμα 1.11 :** Επίδραση του βαθμού κερματισμού και του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην αντοχή βραχώμαζας

## 1.6 Χαρακτηριστικές δομές των βραχωδών μαζών

Η δομή με την οποία εμφανίζεται η βραχομάζα στη φύση εξαρτάται από τη συνολική γεωλογική της ιστορία. Οι συνθήκες γένεσης διαμορφώνουν την ποιότητα του άρρηκτου πετρώματος και των πρωτογενών δομών του. Η τεκτονική εξέλιξη διαμορφώνει τη δευτερογενή δομή της μάζας καθώς και την ποιότητα των ασυνεχειών της. Τέλος, η παλαιογεωγραφική εξέλιξη είναι υπεύθυνη για την αποσάθρωση και την τελική μορφή της δομής της βραχομάζας (Χαλακατεβάκης Ν., 2010).

Ο Hoek (1983) προτείνει την εξής κατηγοριοποίηση των δομών της βραχομάζας σε σχέση με το βαθμό κερματισμού της.

	Περιγραφή	Μηχανική Συμπεριφορά	Θεωρία – Μέθοδοι Ανάλυσης
	(I) Συμπαγής βράχος (άρρηκτος)	Ψαθυρό, ελαστικό υλικό. <b>Γενικά ισότροπη συμπεριφορά</b>	Θεωρία ελαστικότητας
	(II) Συμπαγής βράχος με μία ασυνέχεια	<b>Εξαιρετικά ανισότροπη συμπεριφορά</b> εξαρτώμενη σχεδόν αποκλειστικά από τη διαμητική αντοχή και την κλίση της ασυνέχειας	Λύσεις κλειστού τύπου για αναλύσεις στο επίπεδο ή στο χώρο
	(III) Συμπαγής βράχος διατεμνόμενος από σχετικά μικρό αριθμό ασυνεχειών	<b>Ανισότροπη συμπεριφορά</b> εξαρτώμενη από τον αριθμό, τη διαμητική αντοχή και τον προσανατολισμό (κλίση) των κύριων ασυνεχειών	Λύσεις κλειστού τύπου στα πλαίσια απλουστευμένων αναλύσεων των δυναμικών μορφών αστάθειας. Μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στοιχείων του σύνθετου ασυνεχούς μέσου σε μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης.
	(IV) Πολύ πυκνά διαρρηγμένοι βράχος	<b>Σχετικά ισότροπη συμπεριφορά.</b> Μάζα διογκούμενη υπό χαμηλές τάσεις	Θεωρία ισοδύναμου συνεχούς μέσου. Λύσεις κλειστού τύπου ή αριθμητικές μέθοδοι
	(Va) Συμπυκνωμένο λιθοσύντριμα	<b>Σχετικά ισότροπη συμπεριφορά.</b> Μικρότερη διόγκωση και χαμηλότερη αντοχή από την περίπτωση (IV) λόγω μειωμένης συναρμογής μεταξύ των τεμαχίων	Εφαρμογή βασικών θεωριών Εδαφομηχανικής για αδρομερή υλικά
	(Vb) Χαλαρό λιθοσύντριμα	Υψηλή παραμορφωσιμότητα καθώς ο χαμηλός βαθμός συμπίκνωσης και η κοκκομετρική διαβάθμιση επιτρέπουν μετακινήσεις των τεμαχίων. Χαμηλή διαμητική αντοχή.	

Πίνακας 1.6 : Χαρακτηριστικές δομές βραχομάζας (Hoek, 1983)

Σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση η βραχομάζα μπορεί να διακριθεί σε τρεις δομές ως προς τη μηχανική της συμπεριφορά:

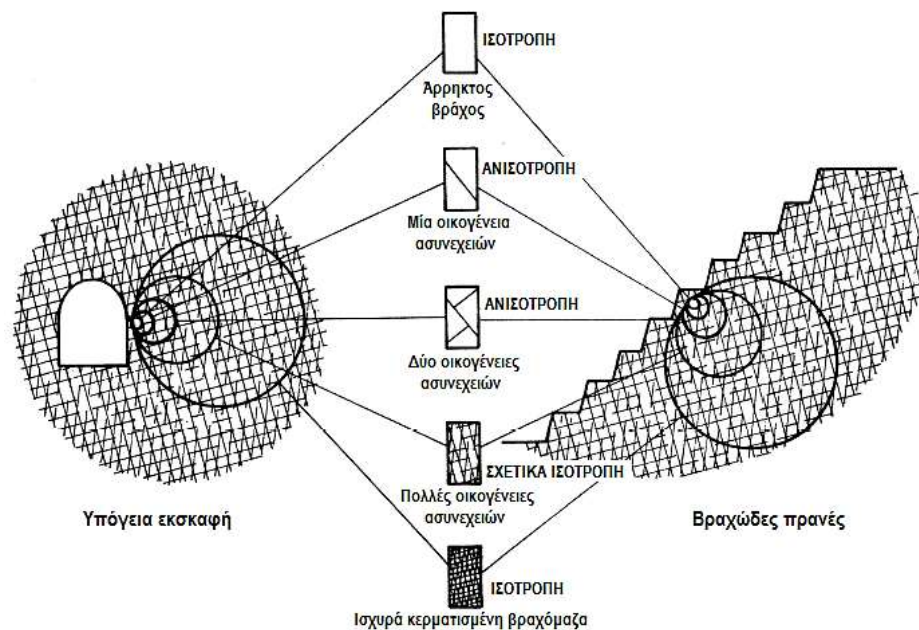
- Βραχομάζα χωρίς ασυνέχειες με ισότροπη συμπεριφορά εξαρτώμενη από το άρρηκτο πέτρωμα
- Κερματισμένη βραχομάζα με ανισότροπη συμπεριφορά
- Κερματισμένη βραχομάζα με ισότροπη συμπεριφορά

## 1.7 Μηχανική συμπεριφορά των βραχωδών μαζών σε σχέση με τη δομή τους

Αποτέλεσμα της κατάτμησης των βραχωδών μαζών από δομικές ασυνέχειες είναι η δημιουργία ενός μέσου ιδιότυπης μηχανικής συμπεριφοράς με τα εξής κύρια χαρακτηριστικά: **ανομοιογένεια**, **ανισοτροπία** και **ανελαστικότητα** (Bandis).

Η μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας όταν αυτή είναι έντονα διακλασμένη μπορεί να προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός εδαφικού σχηματισμού, ενώ όταν αποτελείται από βραχώδη τεμάχια μεγάλων διαστάσεων και πολύ πτωχά ανεπτυγμένο δίκτυο ασυνεχειών πλησιάζει περισσότερο τη συμπεριφορά ενός δοκιμίου άρρηκτου πετρώματος. Είναι λοιπόν φανερό ότι η επίδραση των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι καθοριστικής σημασίας.

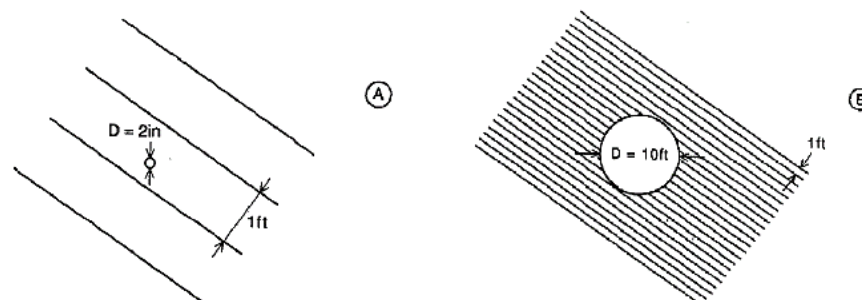
Η μετάβαση από το ακέραιο πέτρωμα στη βραχώμαζα φαίνεται απλοποιητικά στο σχήμα που ακολουθεί:



**Σχήμα 1.12 :** Απλοποιημένα μοντέλα μηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας όπως καθορίζονται από την κλίμακα ενός προβλήματος και τη σχετική πυκνότητα του δικτύου ασυνεχειών (Hoek, Kaiser, Bawden, 1995)

Με το παραπάνω σχήμα γίνεται κατανοητό πως αυξανόμενης της γεωμετρικής κλίμακας αυξάνεται και ο αριθμός των περιεχόμενων ασυνεχειών, δηλαδή των επιπέδων αδυναμίας. Έτσι, η κλίμακα καθιστάται μια σημαντική παραμέτρος χαρακτηρισμού της συμπεριφοράς της βραχώμαζας ως ισότροπης ή ανισότροπης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατανόησης των παραπάνω είναι αυτό του επόμενου σχήματος όπου δύο κυκλικά ανοίγματα διαφορετικής διαμέτρου διανοίγονται στην ίδια βραχώμαζα που τέμνεται από μία οικογένεια ασυνεχειών με απόσταση 30.0cm (1.0ft).



**Σχήμα 1.13 :** Παράδειγμα ανοιγμάτων στην ίδια βραχώμαζα (Amadei, 1996)

Αν το πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών θεωρηθεί ισότροπο, τότε:

- Στην **περίπτωση A**, το άνοιγμα με διάμετρο περίπου 5.0cm είναι πολύ μικρό σε σχέση με την απόσταση των ασυνεχειών και η βραχόμαζα προσομοιώνεται ως **συνεχής** και **ισότροπη**.
- Στην **περίπτωση B**, το άνοιγμα έχει διάμετρο 3.0m οπότε τέμνει ασυνέχειες. Έτσι, η βραχόμαζα προσομοιώνεται ως **ασυνεχής** και **ανισότροπη**.

Αν υποθεθεί ότι το πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών είναι ανισότροπο, τότε η ανισοτροπία αυτή είναι σημαντική για την μόνο στην προσομοίωση της περίπτωσης A. Στην περίπτωση B είναι κρίσιμη η ανισοτροπία λόγω της ύπαρξης των ασυνεχειών.

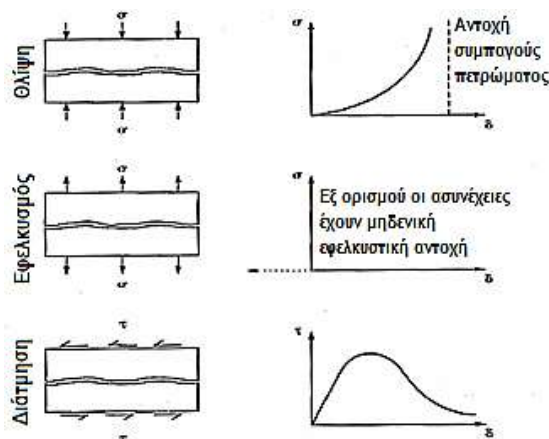
### 1.7.1 Μηχανική συμπεριφορά βραχόμαζας χωρίς ασυνέχειες

Η βραχόμαζα που δεν περιέχει μακροσκοπικές ασυνέχειες αντιστοιχεί στο άρρηκτο πέτρωμα και θεωρείται ότι παρουσιάζει συμπεριφορά που προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αυτήν ενός ελαστοπλαστικού μέσου (Χαλακατεβάκης Ν., 2010). Αυτό σημαίνει ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο υλικό αυτό μπορούν να υπολογιστούν με τις θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας. Η αστοχία των πετρωμάτων σε διάφορες εντατικές καταστάσεις εκτιμάται συνήθως μέσω κριτηρίων αστοχίας (Griffith, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown κτλ.)

### 1.7.2 Μηχανική συμπεριφορά κερματισμένης βραχόμαζας με ανισότροπη συμπεριφορά

Η αντοχή μιας βραχομάζας με ανισότροπη συμπεριφορά εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την κλίση των ασυνεχειών σε σχέση με τη διεύθυνση φόρτισης. Ανάλογα με την κλίση αυτή η αστοχία μπορεί να εκδηλωθεί με θραύση του άρρηκτου πετρώματος ή με ολίσθηση κατά μήκος ενός επιπέδου ασυνέχειας. Όταν η αστοχία οφείλεται σε θραύση του άρρηκτου πετρώματος η αντοχή υπολογίζεται με τα διάφορα κριτήρια αστοχίας που προαναφέρθηκαν. Διαφορετικά, η αντοχή της βραχόμαζας εξαρτάται από τη μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών.

Η συμπεριφορά μιας ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 1.14 : Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση (Hudson & Harrison, 1997)

Στην περίπτωση της θλίψης, η μετακίνηση αυξάνεται με την αύξηση της τάσης με τη μέγιστη τάση να είναι αυτή του άρρηκτου πετρώματος (μη γραμμική συμπεριφορά). Στην περίπτωση του εφελκυσμού, η ασυνέχεια εξ' ορισμού δε φέρει αντίσταση. Τέλος, στην περίπτωση της διάτμησης, υπάρχει μια κορυφαία διατμητική τάση που στη συνέχεια μειώνεται (μη γραμμική συμπεριφορά).

### 1.7.3 Μηχανική συμπεριφορά κατακερματισμένης βραχόμαζας με ισότροπη συμπεριφορά

Οι συνηθέστερα εφαρμοζόμενες μέθοδοι ανάλυσης για την εκτίμηση της ισότροπης αντοχής κατακερματισμένης βραχόμαζας είναι οι εξής:

#### (α) Αναλυτικές μέθοδοι ή λύσεις “κλειστού” τύπου

Λύσεις κλειστού τύπου θεωρούνται εκείνες κατά τις οποίες το πρόβλημα περιγράφεται με απλές εξισώσεις για τις οποίες υπάρχει μοναδιαία λύση. Στις περισσότερες εφαρμογές το μέσο θεωρείται ως ελαστικό, ισότροπο και ομογενές. Εξελιγμένες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν στον υπολογισμό πλαστικών ζωνών ή σε ανισότροπα ελαστικά υλικά.

Οι πολλοί συνδυασμοί συνοριακών συνθηκών, η πολύπλοκη κατανομή των τάσεων σε βραχόμαζες με επίπεδα αδυναμίας καθώς και οι διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας που δύναται να συμβούν καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή σειράς απλοποιητικών παραδοχών οι οποίες, όμως, τις περισσότερες φορές οδηγούν σε υπέρμετρη απλοποίηση του προβλήματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η προσέγγιση με αναλυτικές μεθόδους να χρησιμοποιείται μόνο σε απλές περιπτώσεις δομής βραχόμαζας. Ωστόσο, οι προσεγγίσεις αυτές είναι ιδιαίτερης θεωρητικής αξίας διότι βοηθούν στην κατανόηση των μηχανισμών της συμπεριφοράς των πετρωμάτων.

#### (β) Αριθμητικές μέθοδοι

Οι αριθμητικές μέθοδοι παρέχουν τη δυνατότητα ανάλυσης των τάσεων και των παραμορφώσεων σύνθετων γεωτεχνικών κατασκευών. Η εφαρμογή τους ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και σε επίπεδο λογισμικού.

Στις αριθμητικές μεθόδους η περιοχή του προβλήματος διακριτοποιείται σε στοιχεία που συνδέονται με κόμβους. Οι εφαρμοζόμενες εξωτερικές ή εσωτερικές δυνάμεις μεταφέρονται στους κόμβους και οι προκαλούμενες μετατοπίσεις υπολογίζονται από σύστημα εξισώσεων στο οποίο οι κομβικές μετατοπίσεις αποτελούν τις μεταβλητές. Οι κομβικές μετατοπίσεις, στη συνέχεια, ανάγονται ως ανηγμένες παραμορφώσεις στα εμπειρεχόμενα πεπερασμένα στοιχεία δια μέσου κατάλληλων συναρτήσεων.

Γνωστές αριθμητικές μέθοδοι είναι:

- η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)
- η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)
- η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method)
- η μέθοδος διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method)

Οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε προβλήματα μηχανικής συμπεριφοράς της κερματισμένης βραχόμαζας. Με τη χρήση τους είναι δυνατή η προσομοίωση της συμπεριφοράς πολύπλοκων δομών βραχόμαζας με διάφορες συνοριακές συνθήκες και με διάφορα καταστατικά μοντέλα για το άρρηκτο πέτρωμα και τις ασυνέχειες. Οι δυνατότητες των αριθμητικών επιλύσεων είναι πολύ μεγάλες, αλλά τα αποτελέσματά τους είναι άμεση συνάρτηση της ακρίβειας με την οποία προσομοιώνεται το φυσικό πρόβλημα.

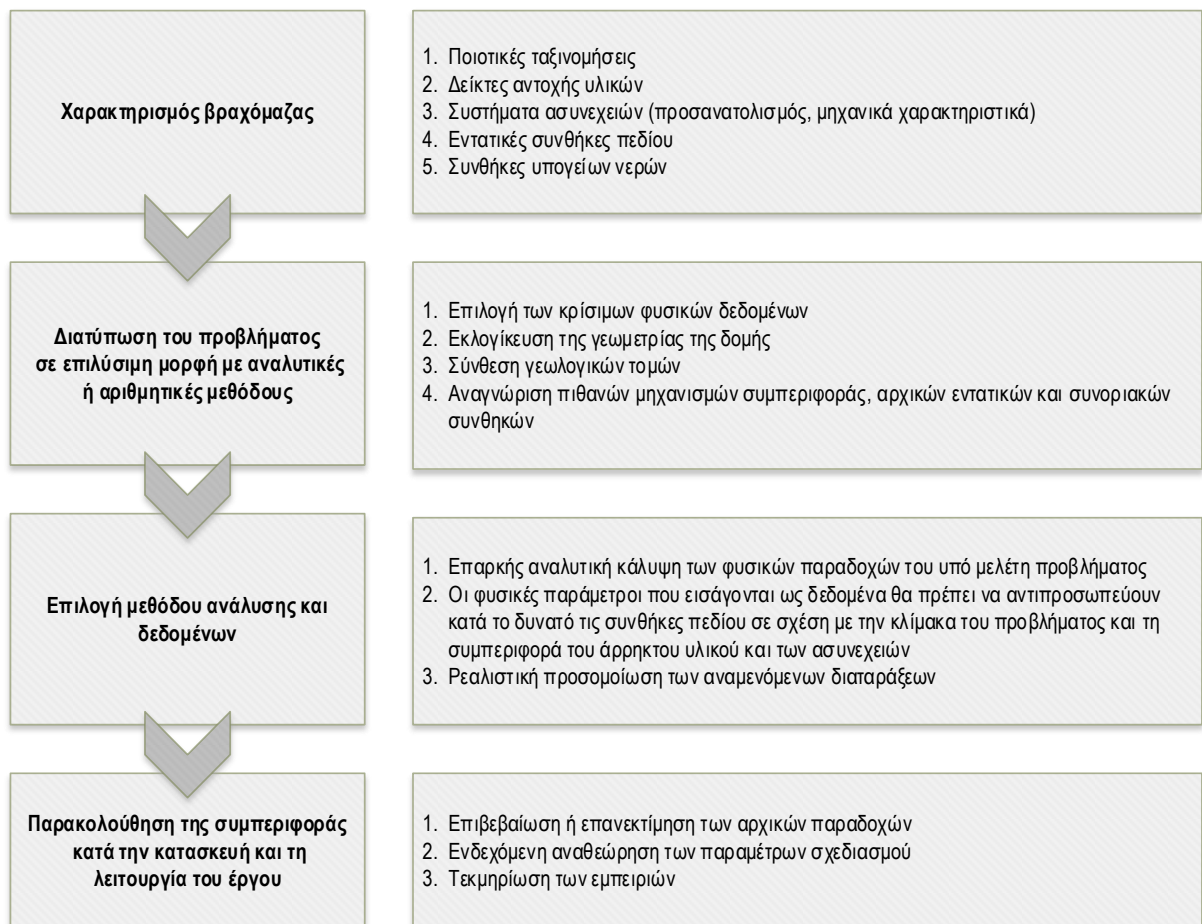
#### (γ) Εμπειρικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι (πχ. Q, RMR, GSI) βασίζονται κυρίως σε εμπειρίες από πολυάριθμες κατασκευαστικές περιπτώσεις και σε αρχές της μηχανικής παρέχοντας υποδείξεις ως προς

την ποιότητα των υλικών, την αναμενόμενη συμπεριφορά, τις απαιτήσεις μέτρων προστασίας κτλ.

Λόγω της ιδιαίτερης προέλευσής τους η γενικευμένη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις αντοχής. Ωστόσο, πλεονεκτούν στο γεγονός ότι είναι εύχρηστες και προσφέρουν υπολογιστική άνεση καθώς περιλαμβάνουν σχετικά εύκολα μετρήσιμα μεγέθη.

### ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΒΡΑΧΟ



**Σχήμα 1.15 : Λογικό διάγραμμα πρόβλεψης της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευής σε βραχώμαζα (Bandis)**



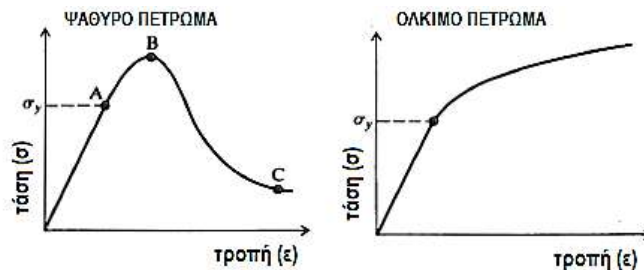


## 2ο Κεφάλαιο : Ανάλυση συμπεριφοράς ανισότροπης βραχώμαζας

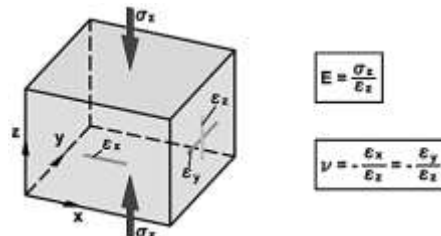
### 2.1 Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων σε ισότροπο και σε ανισότροπο μέσο

Όταν σε ένα άρρηκτο πέτρωμα με **τυχαία δομή (ισότροπο μέσο)** εφαρμόζεται μονοαξονικό ή πολυαξονικό φορτίο χαμηλότερο της αντοχής του πετρώματος, προκαλούνται ελαστικές παραμορφώσεις ανεξάρτητες της διεύθυνσης φόρτισης (Wittke, 1990). Για την περιγραφή της γραμμικής ελαστικής σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων αρκούν δύο παράμετροι, το μέτρο ελαστικότητας **E** και ο λόγος Poisson **ν**. Το μέτρο διάτμησης είναι συνάρτηση του E και του ν και προκύπτει από τον τύπο:  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ .

Η γραμμική σχέση που συνδέει την εφαρμοζόμενη τάση με την προκύπτουσα παραμόρφωση (τροπή) συνδέεται με το νόμο του Hooke και είναι η εξής:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ .

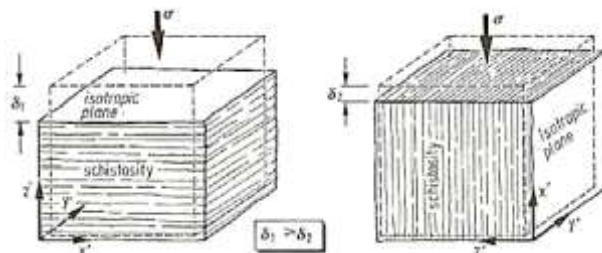


Σχήμα 2.1 : Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων ελαστικού ψαθυρού και όλκιμου πετρώματος σε μονοαξονική φόρτιση (Brandy & Brown)

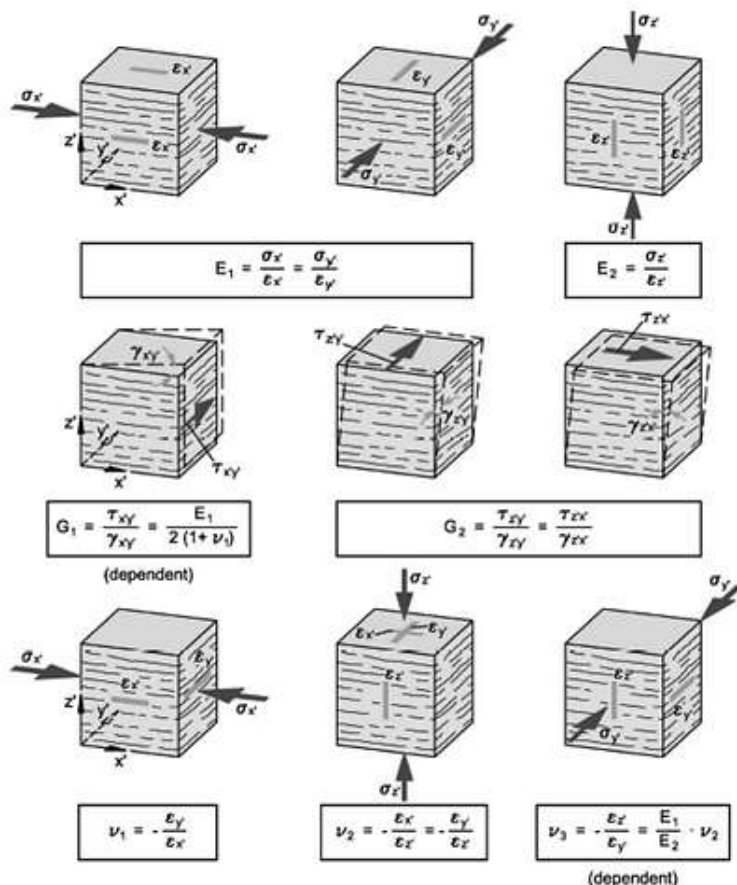


Σχήμα 2.2 : Ορισμός του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson ν. (Wittke, 1990)

Στην περίπτωση που το μοντέλο του άρρηκτου πετρώματος δεν έχει τυχαία αλλά **επίπεδη δομή (ανισότροπο μέσο)**, η υπόθεση ισότροπης ελαστικής συμπεριφοράς δεν αποτελεί αποδεκτή απλοποίηση καθώς το πέτρωμα εμφανίζει αξιόλογα **μεγαλύτερη συμπίεστικότητα κάθετα στην επίπεδη δομή** παρά παράλληλα σε αυτή. Η περιγραφή μιας τέτοιας συμπεριφοράς απαιτεί πέντε ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές, το μέτρο ελαστικότητας **E<sub>1</sub>** και **E<sub>2</sub>** για τις διευθύνσεις παράλληλα και κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας, το μέτρο διάτμησης **G<sub>2</sub>** για τη διατμητική φόρτιση στο επίπεδο ισοτροπίας και οι δύο λόγοι Poisson **ν<sub>1</sub>** και **ν<sub>2</sub>**. Η σχετική συμπεριφορά τάσεων – παραμορφώσεων αναφέρεται ως **εγκάρσια ισότροπη**.



Σχήμα 2.3 : Ανισότροπη παραμόρφωση άρρηκτου πετρώματος. (Wittke, 1990)

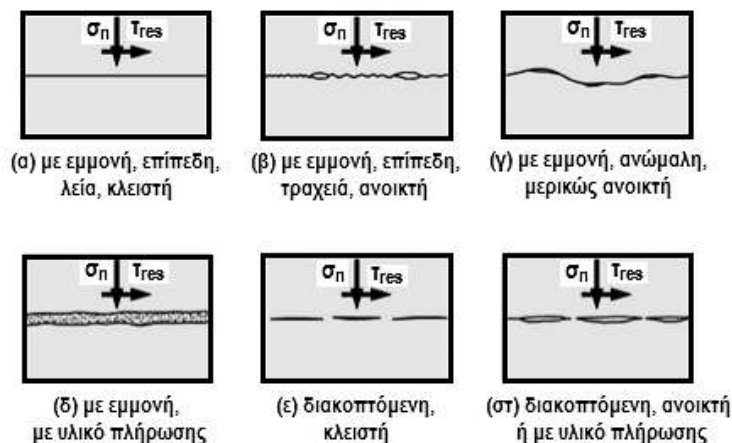


Σχήμα 2.4.: Ορισμός των ελαστικών σταθερών για εγκάρσια ισότροπο υλικό με επίπεδη δομή. (Witke, 1990)

## 2.2 Παραμορφωσιμότητα βραχόμαζας

Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων της βραχόμαζας είναι ιδιαίτερα σημαντική στη διερεύνηση της ευστάθειας και στο σχεδιασμό κατασκευών πάνω ή μέσα σε αυτή. Η περιπλοκότητα, ωστόσο, της δομής της βραχόμαζας καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου περιγραφής της συμπεριφοράς καθώς ακόμη και μία μεμονωμένη ασυνέχεια επηρεάζει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις.

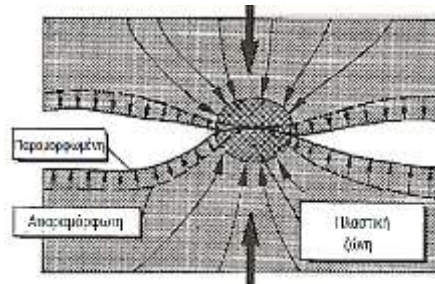
Οι ασυνέχειες που συναντώνται συχνά στη φύση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον Witke στις εικονιζόμενες παρακάτω:



Σχήμα 2.5.: Η φύση των ασυνεχειών. (Witke, 1990)

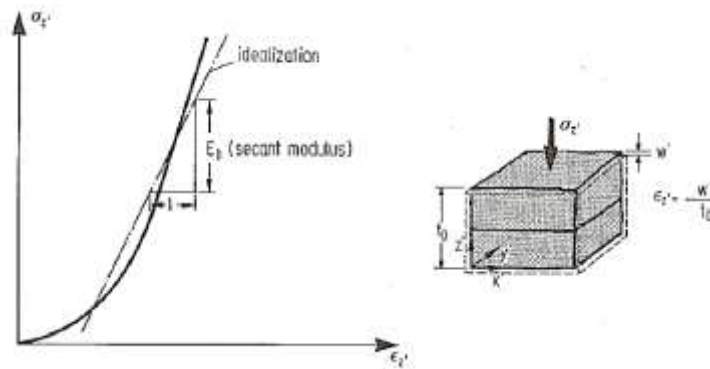
Οι κλειστές και σφιχτές ασυνέχειες, εφόσον δεν υπερβαίνεται η αντοχή τους, δεν επηρεάζουν έντονα την κατανομή των τάσεων στο περιβάλλον πέτρωμα και την παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή ανεξαρτήτως της ποιότητας της επιφάνειας (επίπεδη ή ανώμαλη, λεία ή τραχειά) ή της εμμονής που παρουσιάζουν καθώς μεταφέρουν τάσεις με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιείται και στον άρρηκτο βράχο.

Όταν η επιφάνεια των ασυνεχειών είναι τραχειά και ανώμαλη, τότε πρόκειται για ανοικτές ασυνέχειες οι οποίες για να μπορέσουν να μεταφέρουν φορτία πρέπει πρώτα να κλείσουν. Στην αρχή οι τάσεις μεταφέρονται μέσω της περιορισμένης επαφής των επιφανειών. Η φόρτιση σε διάτμηση ή συμπίεση οδηγεί σε τοπική συγκέντρωση τάσεων, οι προεξοχές της τραχύτητας σταδιακά θραύονται και η επιφάνεια επαφής μεγαλώνει. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεγάλη παραμορφωσιμότητα στα σημεία επαφής των επιφανειών της ασυνέχειας λόγω της τοπικής πλαστικοποίησης.



**Σχήμα 2.6 :** Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης τοπικά στις επιφάνειες επαφής. (Wittke, 1990)

Αν επρόκειτο να πραγματοποιηθεί μια μονοαξονική δοκιμή συμπίεσης σε ένα τέμαχος πετρώματος που περιέχει μια ανοικτή ασυνέχεια κάθετη στη φόρτιση, θα προέκυπτε μια κυρτή σχέση τάσεων – παραμορφώσεων ως συνέπεια των πολλαπλών τοπικών αστοχιών. Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί από έναν μη γραμμικό καταστατικό νόμο είτε να αναπαρασταθεί με την προσέγγιση της μη γραμμικής σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων σε μια γραμμική σχέση. Το μέτρο ελαστικότητας που περιγράφει την περιοχή της ασυνέχειας εξισώνεται τότε με το τέμνον μέτρο ελαστικότητας.

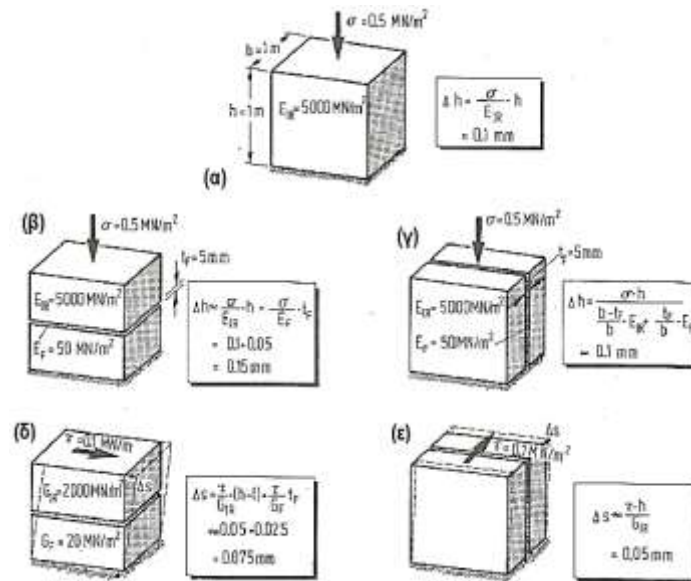


**Σχήμα 2.7 :** Μονοαξονική φόρτιση μάζας πετρώματος με μία μερικώς ανοικτή ασυνέχεια. (Wittke, 1990)

Όσον αφορά την παραμόρφωση της βραχώμαζας που περιέχει ασυνέχειες αυτή είναι συνάρτηση δύο επιμέρους παραμορφώσεων, της παραμόρφωσης του άρρηκτου πετρώματος και της παραμόρφωσης των ασυνεχειών.

Ειδικότερα, στην περίπτωση ασυνέχειας με υλικό πλήρωσης, όταν το μέτρο ελαστικότητας του υλικού πλήρωσης είναι μικρό σε σχέση με εκείνο του άρρηκτου πετρώματος, η συμπίεστοςτητα κάθετα στη διεύθυνση της ασυνέχειας μπορεί να αυξάνεται σημαντικά.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συμπίεσης τεμάχους πετρώματος χωρίς ασυνέχεια και με μία ασυνέχεια πληρωμένη με υλικό πάχους 5.0mm:



Σχήμα 2.8 : Επιρροή ασυνέχειας με υλικό πλήρωσης στην παραμορφωσιμότητα της βραχώμαζας. (Witke, 1990)

Η παρουσία της ασυνέχειας αυξάνει την συμπίεστικότητα κατά 50%, όταν η φόρτιση είναι κάθετη σε αυτή (περίπτωση β), ενώ δε μεταβάλλεται σημαντικά όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στη διεύθυνσή της (περίπτωση γ). Στην περίπτωση διαμητικού φορτίου παράλληλου στη διεύθυνση της ασυνέχειας (περίπτωση δ) οι τάσεις μπορούν να μεταφερθούν από το άρρηκτο πέτρωμα στο υλικό πλήρωσης, εφόσον δεν ξεπερνάται η αντοχή του υλικού πλήρωσης, και εξαιτίας του μικρού μέτρου διάτμησης οι παραμορφώσεις αυξάνονται. Τέλος, όταν η διαμητική τάση δρα σε επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ασυνέχειας, οι τιμές της διαμητικής τάσης στον άρρηκτο βράχο και στο υλικό πλήρωσης ταυτίζονται.

Δομή κόκκων	Συστήματα ασυνεχειών	
	τυχαία δομή	επίπεδη δομή
1 έως 3 συστήματα ασυνεχειών με μικρή επιρροή στην παραμόρφωση	ισότροπο	εγκάρσια ισότροπο
1 σύστημα ασυνεχειών, με υλικό πλήρωσης και μικρή επιρροή στην παραμόρφωση	εγκάρσια ισότροπο	παράλληλα στη δομή εγκάρσια ισότροπο
		κάθετα στη δομή ορθότροπο
2 συστήματα ασυνε- χειών κάθετα μεταξύ τους, με υλικό πλήρω- σης και επιρροή στην παραμόρφωση	ορθότροπο	ασυνέχειες παράλληλες και κάθετες στη δομή ορθότροπο
χωρίς ασυνέχειες	ισότροπο	

Πίνακας 2.1 : Παραδείγματα δομής πετρώματος και σχετικά μοντέλα ελαστικής συμπεριφοράς (Witke, 1990)

## 2.3 Αντοχή βραχομάζας: Ισότροπα μέσα

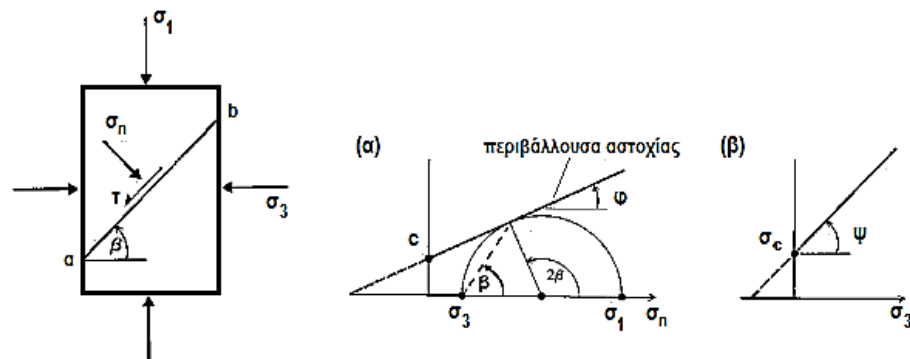
Στις περιπτώσεις που η βραχομάζα συμπεριφέρεται ισότροπα (σχετική αναφορά έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο) η αντοχή της ελέγχεται κυρίως από τις ιδιότητες του άρρηκτου υλικού και ισχύουν οι παρακάτω θεωρίες για την αντοχή της:

### 2.3.1 Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Είναι το απλούστερο κριτήριο που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση  $\tau$  σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης  $\sigma_n$ , στο επίπεδο αυτό. Οι παράμετροί του είναι δύο: η γωνία τριβής  $\varphi$  και η συνοχή  $c$ .

Περιγράφεται από τη σχέση:  $\tau = \sigma_n \cdot \tan\varphi + c$

Συχνά είναι χρήσιμη και η διατύπωσή του σαν συνάρτηση των κυρίων τάσεων  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ , όπου  $\sigma_1$  η μέγιστη κύρια τάση και  $\sigma_3$  η ελάχιστη κύρια τάση ως εξής:  $\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot \tan\psi$



Σχήμα 2.9 : Δοκίμιο και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr - Coulomb

### 2.3.2 Γενικευμένο εμπειρικό κριτήριο Hoek – Brown

Οι Hoek – Brown ανέπτυξαν ένα εμπειρικό κριτήριο που περιγράφει την ψαθυρή αστοχία της βραχομάζας. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο κριτήριο είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος  $\sigma_c$  και οι αδιάστατες παράμετροι  $m_b$ ,  $s$  και  $\alpha$ .

Εκφράζεται με την εξής σχέση:  $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha$

Η εκτίμηση των παραμέτρων  $m_b$ ,  $s$  και  $\alpha$  γίνεται βάσει των μηχανικών χαρακτηριστικών του άρρηκτου πετρώματος και των δομικών χαρακτηριστικών όπως προκύπτουν από κάποιο σύστημα ταξινόμησης. Εφόσον χρησιμοποιείται το σύστημα GSI ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 \cdot D}\right)}, \quad \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right), \quad s = e^{\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3 \cdot D}\right)}$$

D : βαθμός διαταραχής της βραχομάζας λόγω ανατινάξεων ή χαλάρωσης (0 για αδιατάρακτη)

Ο δείκτης GSI χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η παρουσία των ασυνεχειών στο πέτρωμα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην εκτίμησή του είναι η δομής της βραχομάζας και η ποιότητα των ασυνεχειών. Ο σχετικός πίνακας δίνεται παρακάτω όπως και για την παράμετρο  $m_i$ .

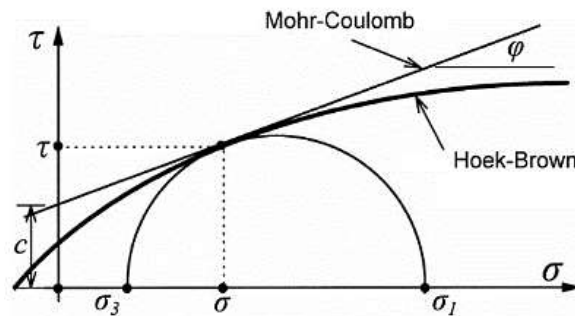
Τύπος πετρώματος	Κατηγορία	Ομάδα	Υφή			
			Αδρή	Μέτρια	Λεπτή	Πολύ λεπτή
ΙΖΗΜΑΤΟΓΝΕΣ	Κλαστικό	Κροκαλοπαγές (22) Λατοποπαγές	Φαμίτης	Ευόλιθος	Αργιλόλιθος	
			17=4	7=2 Γρασοβράχης 18=3	4=2 Αργ. σχιστόλιθος 6=2 Μάρμαρες 7=2	
	Μη κλαστικό	Οργανικό	Κρητίς 7=2 Ανθρακας 8-21			
			Ανθρακικό	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	Σπαρτικοί ασβεστόλιθος	Μικρικό ασβεστόλιθος
		Εβαπορίτες	12=3	10=2	9=2	9=3
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο	Κερατόλιθοι	Χαλαζίτης	
			9=3	19=4 Μεταγαμμίτης 19=3	20=3	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μηγματίτης	Αμφιβολίτης	Γνεύσοι	
			29=3	26=6	28=5	
	Πτυχωμένα			Σχιστόλιθος	Φυλλίτης	Σχιστές
				12=3	7=3	7=4
ΠΥΡΙΓΕΝΕΣ	Πλουτώνια	Ανοσκόχρωμα	Γρανίτης	Διορίτης	Ονιδιανός	
			32=3 Γρανδιορίτης 29=3	25=5	19	
	Υποαβυσσικά Ηφαιστειακά	Σκοτεινόχρωμα	Γάββρος	Δολερίτης		
			27=3 Νορίτης 20=5	16=5		
Ποροκλαστικά	Λάβα	Πορφύρας	Ρυόλιθος	Διαβάσης	Περιοσίτης	
		20=5	25=5 Ανδεσίτης 25=5	15=5 Δακίτης 25=3 Βασάλτης 25=5	25=5	
		Κροκαλοπαγές	Ηφαιστειακό	Τόφος		
		19=3	λατοποπαγές	13=5		

Πίνακας 2.2 : Προτεινόμενες τιμές mi για διάφορα πετρώματα (Hoek & Marinos, 2000)

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυμμετρικών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινημάτιστα ελαστικές ασπίδες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πριανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατηρητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υποκείνται σε εξαερόμηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μετριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων. ΔΟΜΗ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΧΕΙΑΣ			
	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
	Πολύ τραχιές, μη πασσαθρωμένες επιφάνειες	Τραχιές, ελαφρά πασσαθρωμένες και οξείδωμένες επιφάνειες	Λείες, με ρίγες αποσθρωμένες και εξαλειωμένες επιφάνειες	Επιφάνειες ολισθηρές, πολύ πασσαθρωμένες με σημαντική επιφλοώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχώματα
	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΧΕΙΩΝ			
	90			N/A
	80	70		
		60		
			50	
				40
				30
				20
				10
	N/A	N/A		

Πίνακας 2.3 : Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής GSI για βραχώμαζες (Hoek & Marinos, 2000)

Το κριτήριο και Hoek – Brown συνδέεται με το αντίστοιχο κριτήριο των Mohr – Coulomb στο σημείο που οι δύο περιβάλλουσες αστοχίας ταυτίζονται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Εκεί υπολογίζονται η συνοχή  $c$  και η γωνία τριβής  $\varphi$ .



Σχήμα 2.10 : Περιβάλλουσες αστοχίας Mohr – Coulomb και Hoek – Brown σε συγκριτική παρουσίαση

## 2.4 Αντοχή βραχώμαζας: Ανισότροπα μέσα

Όταν οι ασυνέχειες μιας βραχώμαζας είναι ομόρροπες προς τις ελεύθερες επιφάνειες και γωνίας κλίσεως μικρότερης της κλίσεως των ελεύθερων επιφανειών, τότε αποτελούν δυνητικά επίπεδα ολίσθησης. Η βραχώμαζα στην περίπτωση αυτή δε συμπεριφέρεται ως ισότροπο υλικό και η **αντοχή ελέγχεται κυρίως από τις ασυνέχειες** οι οποίες συνεισφέρουν και την κύρια συνιστώσα παραμορφωσιμότητας.

Εφόσον η εφελκυστική αντοχή των ασυνεχειών είναι πρακτικά μηδενική και το καθεστώς που επικρατεί σε μια βραχώμαζα είναι θλιπτικού χαρακτήρα, η **κύρια συνιστώσα αντοχής είναι η διατμητική**.

Σε μια **λεία επιφάνεια** η διατμητική αντοχή  $\tau$  μπορεί να εκφραστεί αξιόπιστα από μία γραμμική περιβάλλουσα Mohr – Coulomb της μορφής:  $\tau = \sigma_n \cdot \tan\varphi$ , όπου  $\varphi$  η γωνία τριβής. Ωστόσο, πολύ σπάνια συναντώνται στη φύση τέτοιες λείες επιφάνειες.

Κατά τη διάτμηση λείας μορφής ασυνεχειών επιτυγχάνεται σχετικά γρήγορα η επίτευξη μιας μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης (μέγιστη αντοχή) η οποία στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά και ασυμπτωτικά προς μία ελάχιστη τιμή (παραμένουσα αντοχή). Η γνώση των δύο αυτών ακραίων τιμών της αντοχής, στο εύρος της αναμενόμενης ορθής τάσης, είναι χρήσιμη στο σχεδιασμό έργων και για το σκοπό αυτό σχεδιάζονται οι δύο περιβάλλουσες αντοχής όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.11 : Διάτμηση λείας ασυνέχειας, αντοχή και περιβάλλουσες αστοχίας

Στις φυσικές ασυνέχειες υπάρχει συνήθως κάποια αντίσταση ολίσθησης η οποία παρουσιάζει διακυμάνσεις εάν:

- α. οι επιφάνειες είναι ανεπίπεδες (αύξηση της διατμητικής αντοχής)
- β. οι επιφάνειες είναι αποσαθρωμένες (μείωση της διατμητικής αντοχής)
- γ. υπάρχει υλικό πλήρωσης



### Κριτήριο Patton

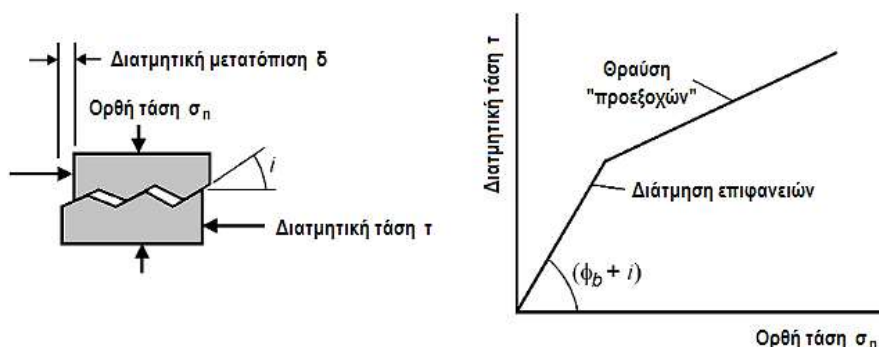
Ο Patton (1966) πραγματοποιώντας πειράματα σε δοκίμια με **τραχειά διεπιφάνεια** κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών εκφράζεται καλύτερα από τη σχέση:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\varphi_b + i)$$

Η γωνία  $\varphi_b$  καλείται βασική γωνία τριβής και εκπροσωπεί την ελάχιστη αντίσταση τριβής μεταξύ δύο λείων και επίπεδων επιφανειών βράχου, ενώ η γωνία  $i$  είναι μια μέση γωνία που αντιπροσωπεύει την τραχύτητα.

Εφόσον η ασυνέχεια έχει αστοχήσει αντί της βασικής γωνίας τριβής  $\varphi_b$  χρησιμοποιείται η παραμένουσα γωνία τριβής  $\varphi_r$ . Σε υγιείς επιφάνειες (μη αποσαθρωμένες / μη εξαλλοιωμένες) η βασική γωνία τριβής είναι ισοδύναμη της παραμένουσας ( $\varphi_b = \varphi_r$ ), διαφορετικά  $\varphi_r < \varphi_b$ .

Η παραπάνω σχέση ισχύει για ολίσθηση (μετατόπιση) των "προεξοχών" και συνεπώς διαστολή (αύξηση του όγκου) του πετρώματος γεγονός που συμβαίνει μόνο για μικρές τιμές της ορθής τάσης  $\sigma_n$ . Όταν η εφαρμοζόμενη ορθή τάση γίνει μεγαλύτερη, επέρχεται θραύση των "προεξοχών" της ασυνέχειας και η τιμή της γωνίας τραχύτητας  $i$  μειώνεται στο μηδέν ( $i = 0^\circ$ ).



**Σχήμα 2.12 :** Το πείραμα του Patton (1966) στη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών

### Κριτήριο Barton – Bandis

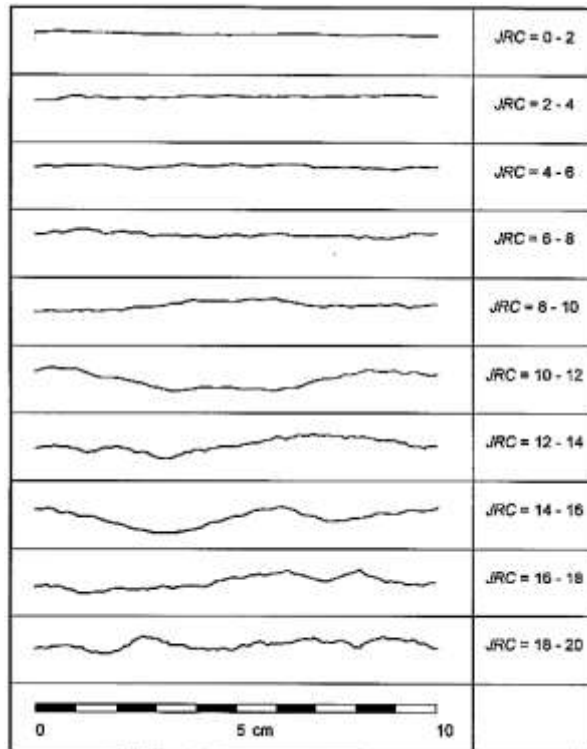
Μια από τις συνηθέστερα εφαρμοζόμενες μεθόδους υπολογισμού της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών προτάθηκε από τους Barton – Bandis. Από αναλύσεις μεγάλου αριθμού δοκιμών διάτμησης προσδιορίστηκε η εξής εμπειρική σχέση:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[ JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right]$$

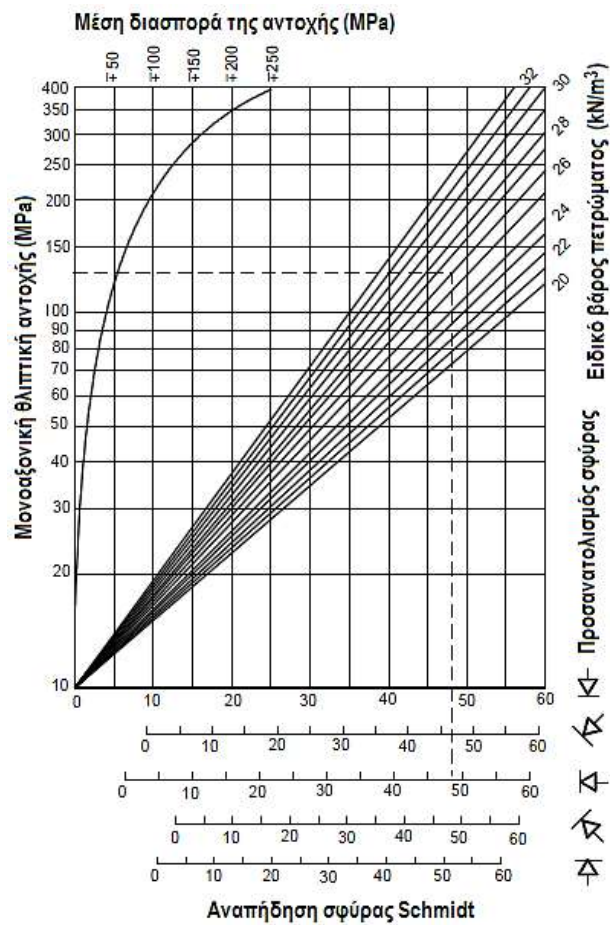
Ο **δείκτης τραχύτητας JRC** (Joint Roughness Coefficient) σύμφωνα με τους Barton – Bandis είναι μια φυσική σταθερά που εκφράζει κατά προσέγγιση το λόγο του μήκους  $L$  της ασυνέχειας προς το μέσο ύψος του ανάγλυφου της επιφάνειάς της. Η τιμή του κυμαίνεται από 0 για λείες και επίπεδες επιφάνειες έως 20 για τραχείες και ανεπίπεδες.

Η εκτίμηση του μπορεί αρχικά να γίνει εμπειρικά βάσει των τυποποιημένων τομών τραχύτητας που παρουσιάζονται σε παρακάτω πίνακα, όμως η επιλογή στην περίπτωση αυτή είναι υποκειμενική. Για αντικειμενική επιλογή της παραμέτρου έχουν αναπτυχθεί πειραματικές μέθοδοι ανάλυσης είτε επί τόπου στο ύπαιθρο με χρήση γεωλογικής πυξίδας και δίσκων μέτρησης της κλίσης ή με φωτογραμμικές μεθόδους είτε στο εργαστήριο βάσει ειδικών διατάξεων.

Ο **δείκτης JCS** (Joint Compressive Strength) περιγράφει την αντοχή σε ανεμπόδιση μονοαξονική θλίψη του βραχώδους υλικού των τοιχωμάτων. Προκύπτει βάσει της τιμής αναπήδησης της σφύρας Schmidt με χρήση του ειδικού διαγράμματος συσχέτισης της επόμενης σελίδας.



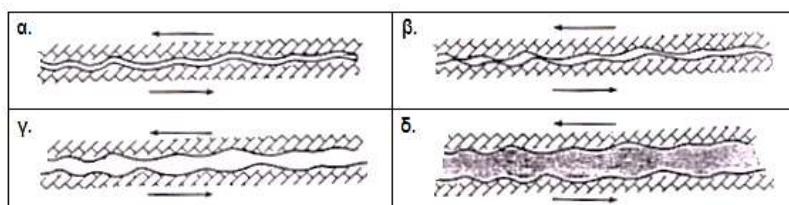
Πίνακας 2.4 : Τομές τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές του δείκτη JRC



Σχήμα 2.13 : Διάγραμμα συσχετισμού αντοχής τοιχώματος και του αριθμού αναπήδης της σφύρας Schmidt

Στην περίπτωση που οι **ασυνέχειες** είναι **πληρωμένες με κάποιο υλικό** η διατμητική συμπεριφορά τους αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος του υλικού πλήρωσης, καθώς είναι βασικό να διαπιστωθεί εάν υπάρχει γεωμετρική δυνατότητα επαφής μεταξύ των τοιχωμάτων, όπως, επίσης, και από το είδος του υλικού αυτού (Bandis).

Αν το υλικό πλήρωσης είναι ασβεστιτικής ή χαλαζιακής προέλευσης, τότε, ανάλογα και με το είδος του πετρώματος, μπορεί να επιφέρει αύξηση στη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που το υλικό πλήρωσης είναι αργιλικό που είναι και σύνθηες.



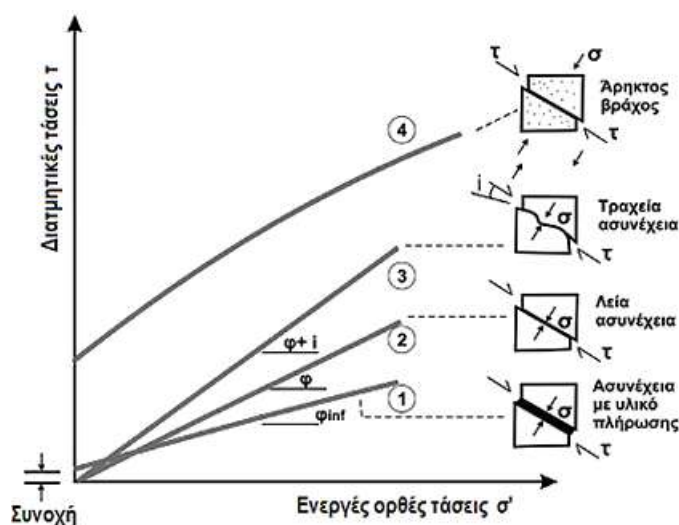
**Σχήμα 2.14 : Ασυνέχειες βράχου με πλαστικό υλικό πλήρωσης (Bandis)**

Αν το υλικό πλήρωσης είναι αργιλικό και το πάχος του είναι μικρό (περίπτώσεις α, β) μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία επαφών μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας. Η διατμητική αντοχή μπορεί να μειωθεί κατά μικρό ποσοστό (10% - 15%) λόγω της σχετικής “λείανσης” των επαφών από το αργιλικό υλικό, όμως προστίθενται και οι δυνάμεις συνάφειας της αργίλου. Αν ο ρυθμός διάτμησης είναι υψηλός, τότε η διαστολή της ασυνέχειας είναι πιθανόν να δημιουργήσει αρνητικές πιέσεις πόρων στο αργιλικό ένθεμα και κατά συνέπεια μείωση της διατμητικής αντοχής, γεγονός που συμβαίνει και σε ασυνέχειες με υλικό πλήρωσης πάχους που δεν επιτρέπει τη δημιουργία επαφών (περίπτωση γ).

Αν το πάχος του υλικού πλήρωσης είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο του μέσου ύψους της ανεπιπεδότητας (περίπτωση δ), τότε η διατμητική αντοχή εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης.

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών είναι η εκτέλεση δοκιμών διάτμησης, εφόσον εξασφαλιστεί το αδιατάρακτο των δειγμάτων.

Σε γενικές γραμμές, οι διακυμάνσεις της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών ανάλογα με την κατάσταση τους συνοψίζονται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.15 : Περιβάλλουσες αντοχής βραχωδών μαζών για διάφορες περιπτώσεις διατμητικής αστοχίας**

## 2.5 Θεωρία ενός επιπέδου αδυναμίας

Η κυριότερη αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της ανισότροπης αντοχής κερματισμένης βραχώμαζας είναι αυτή του επιπέδου αδυναμίας (Jaeger, 1969) σε δύο διαστάσεις. Η θεωρία αυτή βασίζεται στην ανάλυση των τάσεων επάνω στα επίπεδα των ασυνεχειών και στην εξέταση της δυνατότητας ολίσθησής τους λαμβάνοντας υπόψη και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος.

Θεωρείται δοκίμιο πετρώματος με μία ασυνέχεια. Η τάση που εφαρμόζεται σε αυτό αναλύεται στην ορθή και στη διαμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας. Εν συνεχεία εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για να εξεταστεί η δυνατότητα ολίσθησης.

Η διαμητική αντοχή της ασυνέχειας ως συνάρτηση της ορθής τάσης που ασκείται στο επίπεδο της διατυπώνεται ως εξής:

$$\tau = c_w + \sigma \cdot \tan \varphi_w \quad (1) \quad , \quad \text{όπου } c_w \text{ και } \varphi_w \text{ είναι η συνοχή και η γωνία τριβής για την ασυνέχεια.}$$

Ο τύπος για τη μείωση της αντοχής βρίσκεται με τον καθορισμό της ορθής και διαμητικής τάσης στο επίπεδο που διαχωρίζει το δοκίμιο και αντικατάστασης στο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για τη γεωμετρία και τη φόρτιση που δίνεται στο παραπάνω σχήμα.

$$\text{Διαμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας: } \tau = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin 2\beta_w \quad (2)$$

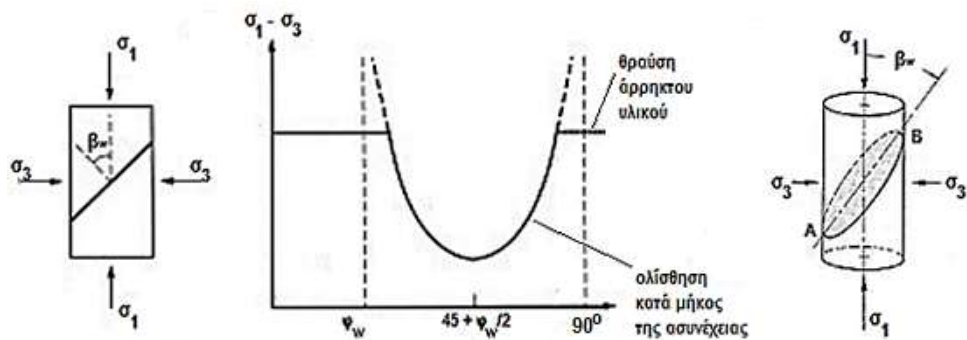
$$\text{Ορθή τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας: } \sigma_n = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\beta_w \quad (3)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2) και (3) στην (1) προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2 \cdot (c_w + \sigma_3 \cdot \tan \varphi_w)}{(1 - |\cot \beta_w| \cdot \tan \varphi_w) \cdot |\sin 2\beta_w|} \geq 0 \quad (4)$$

Η γωνία  $\beta_w$  διευκρινίζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου παρουσιάζεται και η επίλυση της τελικής σχέσης (4).

Η σχέση έχει ασύμπτωτες τις  $\beta_w = \varphi_w$  και  $\beta_w = 90^\circ$ , ενώ η ελάχιστη τιμή της αντοχής εμφανίζεται όταν η κάθετος στην ασυνέχεια κλίνει  $45^\circ + \varphi_w/2$  ως προς την εφαρμοσμένη μέγιστη κύρια τάση.



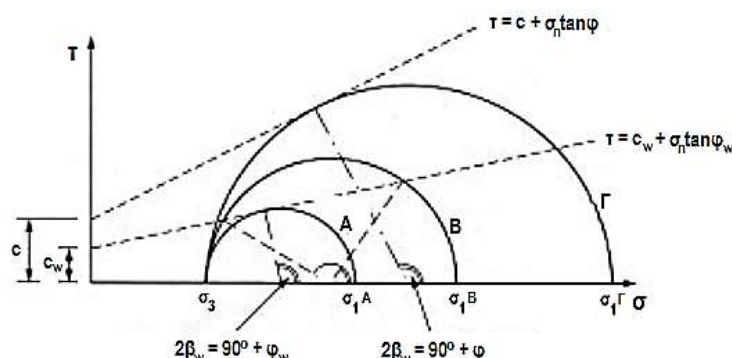
Σχήμα 2.16 : Επίδραση μιας ασυνέχειας στην αντοχή δοκιμίου (Jaeger, 1969)

Η αντοχή του δοκιμίου εξαρτάται από τον προσανατολισμό της ασυνέχειας. Αν η ασυνέχεια είναι παράλληλη ή κάθετη στην εφαρμοσμένη φόρτιση, δε θα έχει καμία επίδραση στην αντοχή των δοκιμίων. Σε μερικές γωνίες, ωστόσο, η ασυνέχεια θα μειώσει σημαντικά την αντοχή του δοκιμίου με την αστοχία να εκδηλώνεται με διαμητική ολίσθηση του επιπέδου αδυναμίας.

Η ελάχιστη αντοχή δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma_1^{\min} = \sigma_3 + 2 \cdot (c_w + \tan \varphi_w \cdot \sigma_3) \cdot \left( \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_w} + \tan \varphi_w \right) \quad (5)$$

Εναλλακτική παρουσίαση επιτυγχάνεται στο επόμενο σχήμα μέσω των κύκλων Mohr. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα δίνονται οι περιβάλλουσες αστοχίας Mohr-Coulomb για το άρρηκτο πέτρωμα και την ασυνέχεια και τρεις κύκλοι Mohr, Α, Β, Γ, που αντιπροσωπεύουν τη χαμηλότερη αντοχή, την υψηλότερη αντοχή και μια ενδιάμεση περίπτωση.

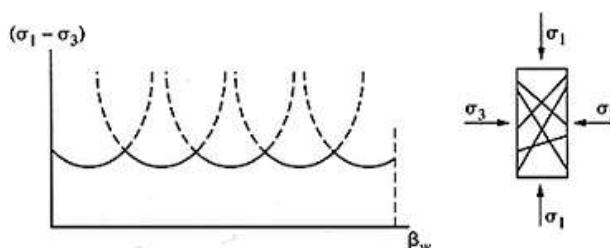


**Σχήμα 2.17 :** Δυνατοί τρόποι αστοχίας πετρώματος με ένα επίπεδο αδυναμίας – Παρουσίαση με κύκλους Mohr

- Ο κύκλος Α αντιπροσωπεύει την περίπτωση επαφής της περιβάλλουσας αστοχίας της ασυνέχειας, δηλαδή για μια ασυνέχεια σε γωνία  $\beta_w = 45^\circ + \varphi_w(^{\circ})/2$ .
- Ο κύκλος Β αντιπροσωπεύει την περίπτωση που η αστοχία μπορεί να εμφανιστεί κατά μήκος της ασυνέχειας για μια σειρά γωνιών.
- Ο κύκλος Γ αντιπροσωπεύει την περίπτωση επαφής της περιβάλλουσας αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος, που η αστοχία, δηλαδή, θα εμφανιστεί στο άρρηκτο πέτρωμα, αν δεν έχει ήδη εμφανιστεί κατά μήκος της ασυνέχειας.

Χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας η θεωρία αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε πετρώματα με περισσότερες ασυνέχειες διαφορετικής κλίσης. Στην περίπτωση αυτή κάθε ασυνέχεια θα αποδυναμώνει το δοκίμιο, αλλά η γωνιακή θέση των ελαχίστων αντοχής δε θα συνέπιπτε. Έτσι, το πέτρωμα αποδυναμώνεται σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις ταυτόχρονα, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, και το υλικό τείνει να γίνει ιστροπικό ως προς την αντοχή όπως ένα κοκκώδες έδαφος.

Κατά τη χάραξη των καμπυλών θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή εκτίμηση της γωνίας  $\beta_w$  για κάθε μία από τις ασυνέχειες που τέμνουν το δοκίμιο.



**Σχήμα 2.18 :** Αντοχή πετρώματος με πολλά συστήματα ασυνχειών

Το βασικό πλεονέκτημα της θεωρίας του μοναδικού επιπέδου αδυναμίας είναι η απλότητα και η χρησιμότητά του στην ερμηνεία της αστοχίας της βραχώμαζας. Η δισδιάστατη περίπτωση μπορεί εύκολα να επεκταθεί και στη γενική τρισδιάστατη περίπτωση φόρτισης. Στην πραγματικότητα η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη επειδή οι τάσεις δε διαβιβάζονται άμεσα μέσω της ασυνέχειας. Ωστόσο, παρά τις ανεπάρκειες αυτές, η κατανόηση τέτοιων εξιδανικευμένων μοντέλων βοηθά στην ερμηνεία της πιο σύνθετης πραγματικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας.

## 2.6 Ανασκόπηση πειραματικής έρευνας σε υλικά με ασυνέχειες

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια περιληπτική ανασκόπηση της πειραματικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε έως σήμερα από διάφορους ερευνητές για την εκτίμηση της αντοχής κερματισμένης βραχόμαζας, την παρατήρηση του τρόπου αστοχίας και την κατανόηση της επιρροής που ασκούν στην αντοχή και στην παραμορφωσιμότητα ο αριθμός των συστημάτων των ασυνεχειών και ο προσανατολισμός τους. Τα πειραματικά δεδομένα αναφέρονται σε φυσικά ομοιώματα βραχόμαζας, σε επιτόπου δοκιμές και σε εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια πετρώματος μεγέθους τέτοιου ώστε να περιλαμβάνεται αντιπροσωπευτικός αριθμός ασυνεχειών.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα **αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης** (Goldstein et al., Lama, Singh et al.).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα **αποτελέσματα δοκιμών διαξονικής και τριαξονικής θλίψης** στις οποίες μελετήθηκε η επίδραση της πλευρικής πίεσης στην αντοχή και στους μηχανισμούς αστοχίας των προσομοιωμάτων (Brown, Brown & Trollope, Brown & Hudson, Ladanyi & Archambault, Bandis et al., Bandis, Szymakowski et al., Meyers & Priest, Kulatikale et al.).

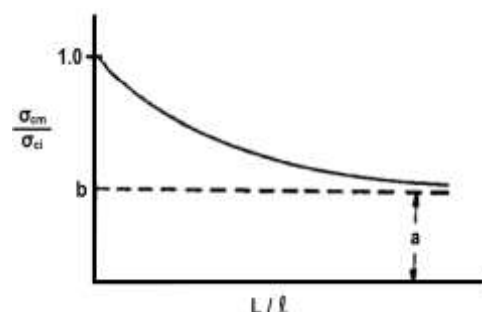
Τέλος, γίνεται αναφορά σε **εργαστηριακές δοκιμές μεγάλης κλίμακας** που διενεργήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό της αντοχής της κερματισμένης βραχόμαζας. Οι δοκιμές αυτές αποτελούν ουσιαστικά επέκταση των αντίστοιχων εργαστηριακών δοκιμών και πραγματοποιούνται σε δοκίμια μεγαλύτερα από αυτά των εργαστηριακών δοκιμών και μικρότερα από αυτά των επιτόπου δοκιμών. Για τη διεξαγωγή τους απαιτούνται μηχανές παρόμοιες με τις εργαστηριακές, όμως, μεγαλύτερου μεγέθους. Οι δοκιμές αυτές πλεονεκτούν έναντι των αντίστοιχων σε φυσικά δοκίμια στο γεγονός ότι εξετάζεται το ίδιο το υλικό όπως αυτό διαμορφώθηκε από τις γεωλογικές διεργασίες και όχι ένα προσομοίωμα αυτού. Ωστόσο, έχουν υψηλό κόστος και είναι χρονοβόρες για αυτό και δεν είναι εκτεταμένη η εφαρμογή τους. (Thorpe et al., Natau et al., Habimana et al., Ranjith et al.).

### 2.6.1 Δοκιμές των Goldstein et al. (1966) και Hayashi (1966)

Οι Goldstein et al. (1966) ήταν από τους πρώτους που πραγματοποίησαν δοκιμές σε φυσικά δοκίμια φτιαγμένα από γύψο με τεχνητές επιφάνειες αδυναμίας για να μελετήσουν την **επίδραση των ασυνεχειών στη συμπεριφορά της βραχόμαζας**.

Το συμπέρασμα των δοκιμών ήταν ότι **η μείωση του μεγέθους του τεμάχου του άρρηκτου υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του ομοιώματος μέχρι ενός σημείου**.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών κατέληξαν και στον παρακάτω εμπειρικό τύπο:



$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = a + b \cdot \left(\frac{l}{L}\right)^e, \text{ όπου:}$$

$$b = 1 - a, \quad e < 1.0$$

$L$  : το μήκος του δείγματος

$l$  : η απόσταση των ασυνεχειών

$\sigma_{cm}$  : η αντοχή της μάζας του υλικού



















$\sigma_{ci}$  : η αντοχή του άρρηκτου υλικού

**Σχήμα 2.19 : Συσχέτιση αντοχής βραχόμαζας – αντοχής άρρηκτου υλικού με το μέγεθος του άρρηκτου τεμάχου (Goldstein et al., 1966)**

Αντίστοιχη εργασία πραγματοποίησε και ο Hayashi (1966) και αυτός σε ομοιώματα φτιαγμένα από γύψο. Οι δοκιμές του κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα, ότι **η αντοχή της βραχόμαζας μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών σε αυτή**.

## 2.6.2 Δοκιμές του Lama (1974)

Ο Lama (1974) εκτέλεσε εκτεταμένο αριθμό δοκιμών για τη μελέτη της **επίδρασης της πυκνότητας των ασυνεχειών** στην αντοχή και την παραμορφωσιμότητα φυσικών ομοιωμάτων υλικών. Ταξινόμησε τα δοκίμιά του σε τρεις ομάδες, μία με οριζόντιες ασυνέχειες, μία με κατακόρυφες ασυνέχειες και μία με ορθογωνικά τεμάχια υλικού μεταβλητού αριθμού ασυνεχειών όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα:

Τύπος							
Αριθμός στοιχείων	1	2	3	4	6	8	
Τύπος							
Αριθμός στοιχείων	2	3	4	6	8		
Τύπος							
Αριθμός στοιχείων	1	4	16	27	49	125	512

Πίνακας 2.5 : Τύποι φυσικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Lama, 1974)

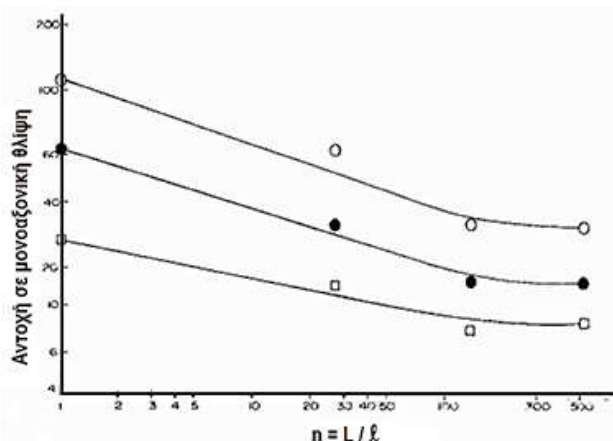
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν:

- Για τα δοκίμια με οριζόντιες και κατακόρυφες ασυνέχειες:

Η αντοχή μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών έως και 30% σε σχέση με αυτήν του άρρηκτου υλικού. Όσον αφορά το μηχανισμό αστοχίας ο Lama παρατηρεί ότι **στα δοκίμια με τις οριζόντιες ασυνέχειες δημιουργούνται εφεκυστικές ρωγμές στο μέσο των δοκιμίων**, ενώ στα δοκίμια με τις κατακόρυφες ασυνέχειες δημιουργείται αποκόλληση των δημιουργούμενων από τις ασυνέχειες στήλων άρρηκτου υλικού.

- Για τα δοκίμια με κυβικά τεμάχια διαφόρων διαστάσεων:

Η αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής των φυσικών ομοιωμάτων η οποία σταθεροποιείται σε έναν αριθμό 150 περίπου τεμαχίων άρρηκτου υλικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αστοχία στα δοκίμια αυτά ήταν περισσότερο προοδευτική από ότι στα δοκίμια με τις οριζόντιες ή τις κατακόρυφες ασυνέχειες.

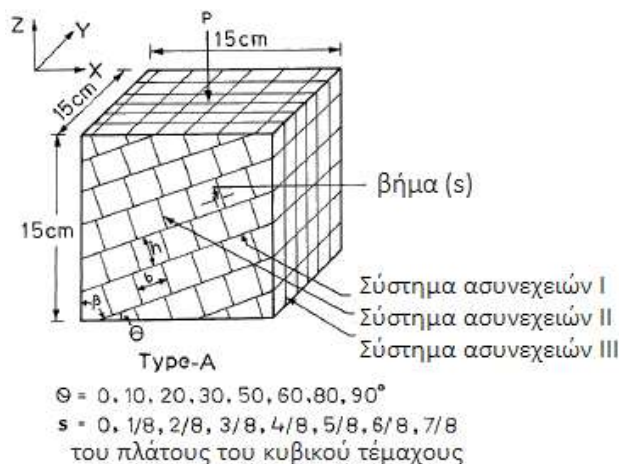


Σχήμα 2.20 : Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμίων (Lama, 1974)

### 2.6.3 Δοκιμές των Singh et al. (2002)

Οι Singh et al. (2002) πραγματοποίησαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε φυσικά δοκίμια διαστάσεων 15.0cm x 15.0cm x 15.0cm που αποτελούνταν κατά μέσο όρο από 260 κύβους πλευράς 2.50cm. Η επιβολή του φορτίου έγινε με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης στο άνω όριο των δοκιμίων τέτοιο ώστε η δοκιμή να διαρκέσει περίπου 20.0min.

Οι περισσότερες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για τον εξής τύπο δοκιμίων:

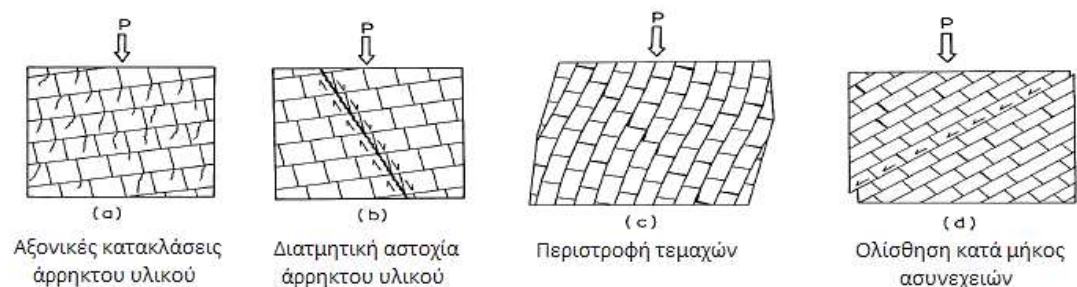


**Σχήμα 2.21 :** Φυσικά δοκίμια ρωγματωμένης βραχώμαζας Τύπου Α (Singh et al., 2002)

Οι ασυνέχειες του συστήματος I είναι εμμένουσες και έχουν γωνία κλίσης  $\theta$  ως προς την οριζόντιο. Οι ασυνέχειες του συστήματος II είναι κάθετες στις ασυνέχειες του συστήματος I και έχουν βήμα  $s$ . Οι ασυνέχειες του συστήματος III είναι πάντα κατακόρυφες και κάθετες.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται παρακάτω σε ειδικό πίνακα σε σχέση με τη γωνία  $\theta$  και το βήμα  $s$  και έδειξαν διάφορους μηχανισμούς αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν:

1. Αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού (splitting)
2. Διατμητική αστοχία του άρρηκτου υλικού (shearing)
3. Περιστροφή των τεμαχών (rotation)
4. Ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών (sliding)



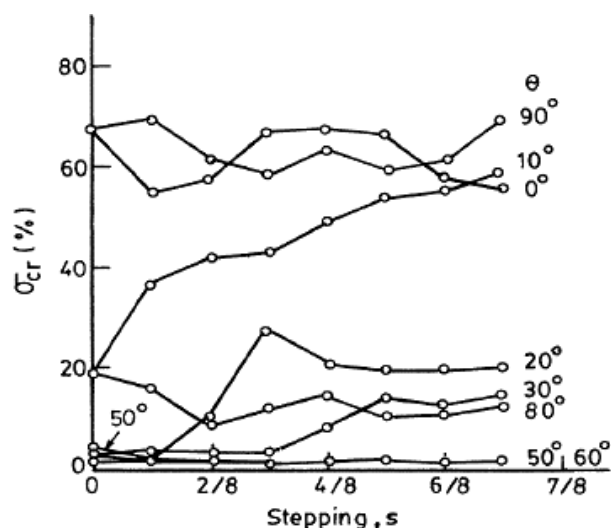
**Σχήμα 2.22 :** Μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμίων (Singh et al., 2002)

Στα αποτελέσματα είναι φανερή η σημαντική επίδραση της αλληλοεμπλοκής των τεμαχών στο μηχανισμό αστοχίας των προσομοιωμάτων, ενώ όσον αφορά την αντοχή τους ο βαθμός αλληλοεμπλοκής οδηγεί σε αύξηση της αντοχής στις γωνίες  $\theta$  μεταξύ  $0^\circ$  και  $30^\circ$ . Αυτό συμβαίνει διότι στις γωνίες αυτές ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος με το βαθμό αλληλοεμπλοκής να κατέχει σημαντικό ρόλο.



90	Ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών							
80	Περιστροφή των τεμαχών							
70	Αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού Διατμητική αστοχία του άρρηκτου υλικού							
50								
40								
30								
20	Αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού							
10	Αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού							
0	Αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού							
$\theta^\circ \uparrow$								
$s \rightarrow$	0	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
	Καμία	Μικρή		Μέτρια		Υψηλή		Π.Υψηλή
	Βαθμός αλληλοεμπλοκής							

Πίνακας 2.6 : Μηχανισμοί αστοχίας για το δοκίμιο Τύπου Α (Singh et al., 2002)



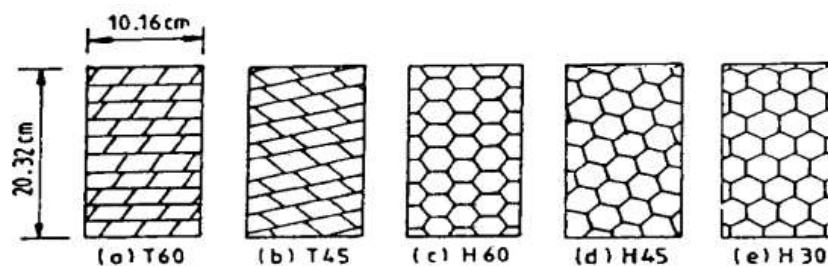
Σχήμα 2.23 : Συσχέτιση βαθμού αλληλοεμπλοκής με την αντοχή των δοκιμών (Singh et al., 2002)

#### 2.6.4 Δοκιμές των Brown(1970), Brown & Trollope(1970), Brown & Hudson(1972)

Ο Brown (1970) πραγματοποίησε τριαξονικές δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια γύψου διαστάσεων 4.0in x 4.0in x 8.0in φτιαγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται διάφορα συστήματα ασυνεχειών. Βάσει της γεωμετρίας των ασυνεχειών σε δύο από τα δοκίμια σχηματίζονταν παραλληλεπίπεδα τεμάχια άρρηκτου υλικού διαστάσεων 0.80in x 1.25in και σε τρία εξαγωνικά ακτίνας 0.625in.

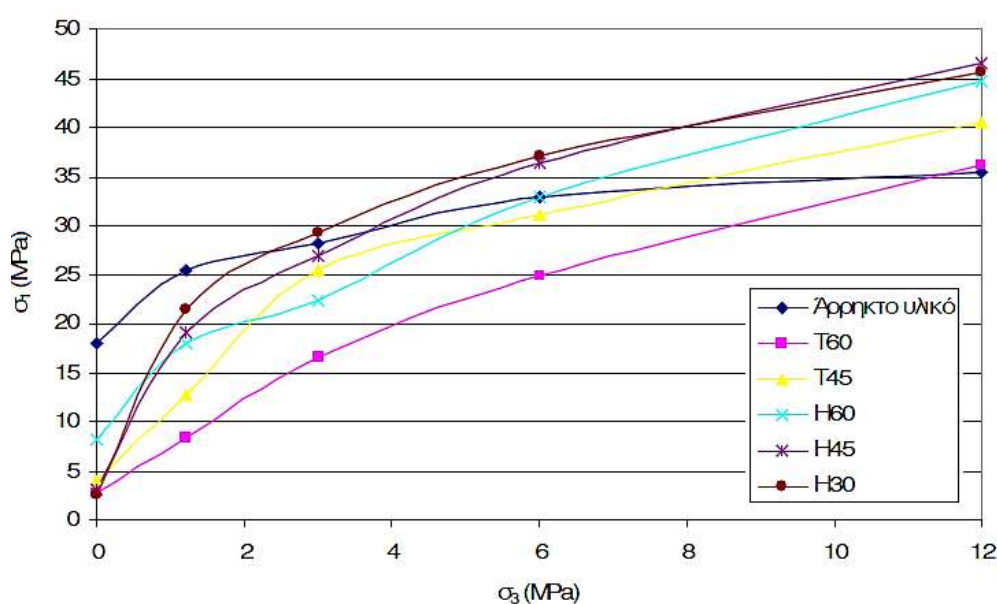
Σύμφωνα με τον Brown (1970) οι δομές αυτές δεν αντιπροσωπεύουν αναγκαστικά δομές βραχόμαζας που απαντώνται στη φύση, ωστόσο είναι σκόπιμη η εξέταση τους για την παρατήρηση της συμπεριφοράς ρωγματομένου υλικού και την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για πέντε τιμές πλευρικής πίεσης: 0 MPa, 1.20MPa, 3.0MPa, 6.0MPa και 12.0MPa.



Σχήμα 2.24 : Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)

Οι περιβάλλουσες αστοχίες που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα πέντε δοκίμια και για ένα δοκίμιο άρρηκτου υλικού ήταν καμπύλες και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα με το δοκίμιο H30 να έχει τη μεγαλύτερη αντοχή και το T60 την ελάχιστη.



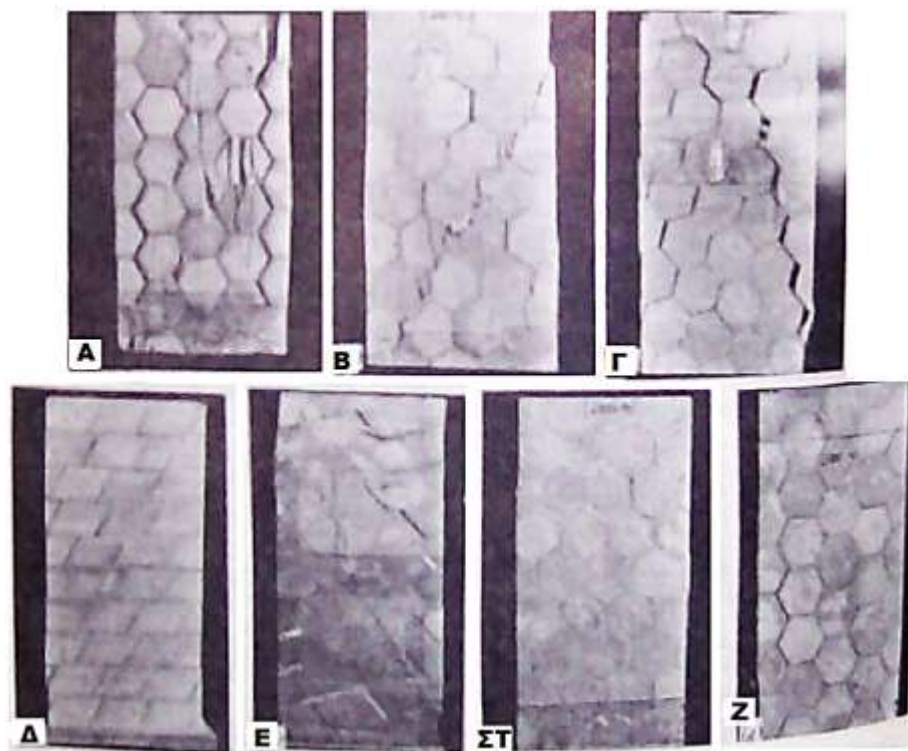
Σχήμα 2.25 : Περιβάλλουσες αστοχίες των δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην πλευρική πίεση των 12.0MPa η αντοχή όλων των δοκιμίων ήταν υψηλότερη από αυτήν του άρρηκτου δοκιμίου. Ένας πιθανός λόγος που συνέβη αυτό σύμφωνα με τον Brown είναι η **επίδραση της κλίμακας**. Η συμπεριφορά των δοκιμίων για υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης ήταν όλκιμη με τις ασυνέχειες να έχουν πολύ μικρή επίδραση στην αντοχή των προσομοιωμάτων. Η αντοχή του άρρηκτου υλικού που τελικώς καθόριζε την αντοχή των δοκιμίων αναφερόταν σε διαστάσεις τεμαχών με πλευρά περίπου 1.0in πολύ μικρότερο, δηλαδή, από το δοκίμιο άρρηκτου υλικού που δεν περιείχε καθόλου ασυνέχειες.

Η **αστοχία των δοκιμίων** ήταν **πολύπλοκη** και **εξαρτώμενη από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και την πλευρική πίεση**. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν οι εξής **μηχανισμοί αστοχίας**:

- (Α) Αξονικές κατακλάσεις του άρρηκτου υλικού σε μικρές πλευρικές πιέσεις
- (Β) Διαμητική θράυση σε επίπεδο ανεξάρτητο από αυτά των ασυνεχειών
- (Γ) Αποδόμηση του δοκιμίου σε μικρές πλευρικές πιέσεις ως αποτέλεσμα της πλευρικής κίνησης των τεμαχών του άρρηκτου υλικού
- (Δ) Διαμητική θράυση σε επίπεδο που απαρτιζόταν κατά ένα μέρος από ασυνέχεια και κατά ένα από άρρηκτο υλικό

- (Ε) Διαμητική αστοχία σε πολλά επίπεδα που απαρτίζονταν από άρρηκτο υλικό και ασυνέχειες
- (ΣΤ) Διαμητική αστοχία του άρρηκτου υλικού σε συζυγή επίπεδα για υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης
- (Ζ) Διαμητικές αστοχίες σε συζυγή επίπεδα που περιείχαν άρρηκτο υλικό και ασυνέχειες



Εικόνα 2.1 : Τρόποι αστοχίας των δοκιμίων (Brown, 1970)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μηχανισμοί αστοχίας για κάθε δοκίμιο σε συνδυασμό με την τιμή της πλευρικής πίεσης που εφαρμόστηκε:

$\sigma_3$ (MPa)	0	1.2	3	6	12
Άρρηκτο	A	B	B	F	F
T60	A	D	D	D	F
T45	C	E	E	E	F
H60	A	D	D	G	G
H45	C	A	E	E	F
H30	A	B	B	B	F

Πίνακας 2.7 : Μηχανισμός αστοχίας για κάθε δοκίμιο σε σχέση με την πλευρική πίεση (Brown, 1970)

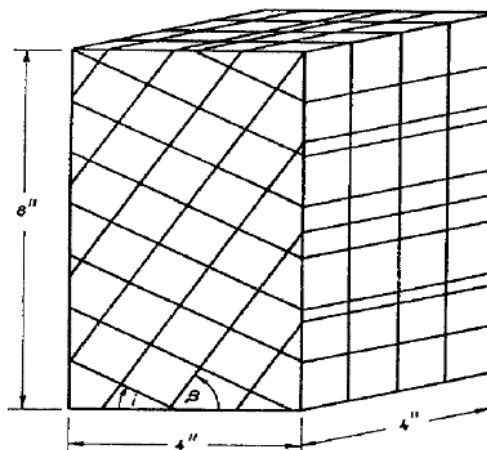
Στην περίπτωση της μονοαξονικής δοκιμής ο μηχανισμός αστοχίας που κυριαρχεί είναι οι αξονικές κατακλάσεις και δευτερευόντως η αποδόμηση του δοκιμίου λόγω πλευρικών μετατοπίσεων των τεμαχίων.

Για μεγάλες τιμές της πλευρικής πίεσης η αστοχία των δοκιμίων ελέγχεται από την ανάπτυξη συζυγών διαμητικών επιπέδων αστοχίας μέσα στο άρρηκτο υλικό.

Οι **Brown & Trollope (1970)** πραγματοποίησαν **τριαξονικές δοκιμές** σε δοκίμια γύψου διαστάσεων 4.0in x 4.0in x 8.0in αποτελούμενα από κύβους πλευράς 1.0in έτσι ώστε να δημιουργούνται 3 κάθετες μεταξύ τους εμμένουσες οικογένειες ασυνεχειών.

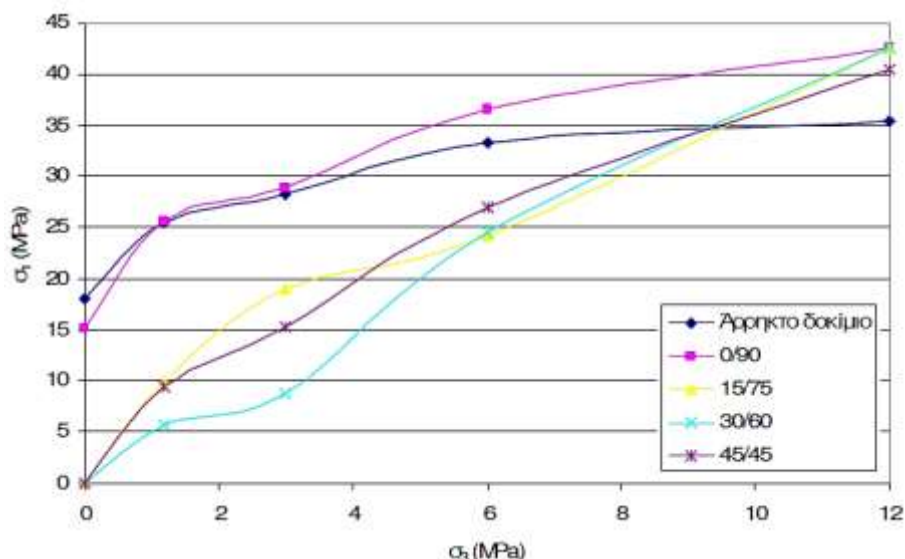
Εξετάστηκαν δοκίμια με ασυνέχειες κλίσης: 0°/90°, 15°/75°, 30°/60°, 45°/45° με το τρίτο επίπεδο ασυνεχειών να διατηρείται πάντα κάθετο.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για πέντε τιμές πλευρικής πίεσης: 0 MPa, 1.20MPa, 3.0MPa, 6.0MPa και 12.0MPa.



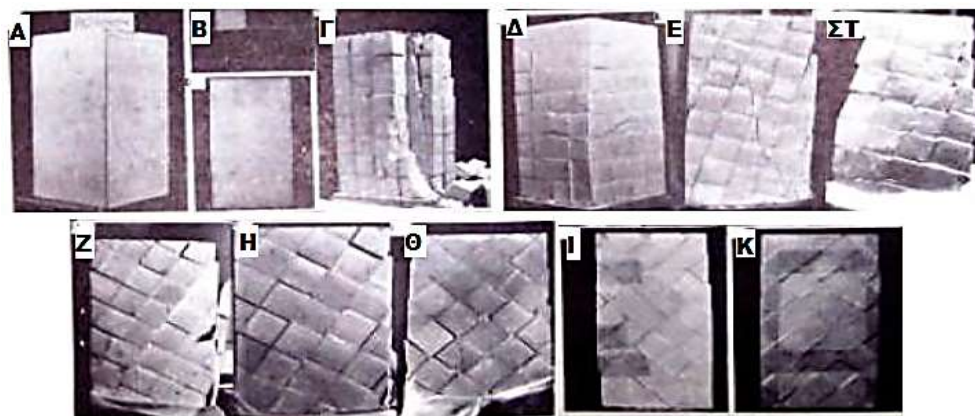
Σχήμα 2.26 : Γεωμετρία ρωγματομένης βραχώμαζας (Brown & Trollope, 1970)

Οι περιβάλλουσες αστοχίας που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα δοκίμια ήταν καμπύλες με την αντοχή των δοκιμών με ασυνέχειες στην πλευρική πίεση των 12.0MPa να είναι και πάλι υψηλότερη από αυτήν του άρρηκτου δοκιμίου όπως και στα δοκίμια που εξέτασε μόνος ο Brown (1970) με πιθανή εξήγηση και πάλι την **επίδραση της κλίμακας**.



Σχήμα 2.27 : Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμών που εξετάστηκαν από τους Brown & Trollope (1970)

Οι μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμών διέφεραν, όπως και στην περίπτωση του Brown (1970), ανάλογα με τις κλίσεις των ασυνεχειών και την πλευρική τάση που εφαρμοζόταν σε αυτά. Χαρακτηριστικές εικόνες και αναλυτικός πίνακας δίνονται στη συνέχεια:



Εικόνα 2.2 : Τρόποι αστοχίας των δοκιμών (Brown & Trollope, 1970)

$\sigma_3$ (MPa)	0	1.2	3	6	12
Άρρηκτο	Αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού	Διατμητική θραύση σε επίπεδο 60° κλίσης ως προς την οριζόντιο	Διατμητική θραύση σε επίπεδο 60° κλίσης ως προς την οριζόντιο (Α)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα (Β)
0/90	Αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού (Γ)	Αξονικές κατακλάσεις άρρηκτου υλικού	Διατμητική θραύση σε επίπεδο 60° κλίσης ως προς την οριζόντιο	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα (Δ)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα
15/75	Ολίσθηση υπό το ίδιο βάρος στο επίπεδο των 75°	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών	Διατμητική θραύση σε διαγώνιο επίπεδο (Ε)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα (ΣΤ)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα
30/60	Ολίσθηση υπό το ίδιο βάρος στο επίπεδο των 60°	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60° (Ζ)	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60°	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60° (Η)	Ολίσθηση στο επίπεδο των 60°
45/45	Ολίσθηση υπό το ίδιο βάρος στα επίπεδα των 45°	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών (Θ)	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών	Διατμητική ολίσθηση και στα δυο επίπεδα ασυνεχειών (Ι)	Διατμητική θραύση σε πολλαπλά συζυγή επίπεδα (Κ)

Πίνακας 2.8 : Μηχανισμός αστοχίας για κάθε δοκίμιο σε σχέση με την πλευρική πίεση (Brown & Trollope, 1970)

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών οι Brown & Trollope (1970) κατέληξαν στον παρακάτω εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής της βραχώμαζας:

$$\frac{\tau - \tau_0}{\sigma_c} = Z \cdot \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^\zeta, \text{ όπου:}$$

$\tau$ : η διατμητική αντοχή του δοκιμίου,  $\tau_0$ : η συνοχή του άρρηκτου υλικού

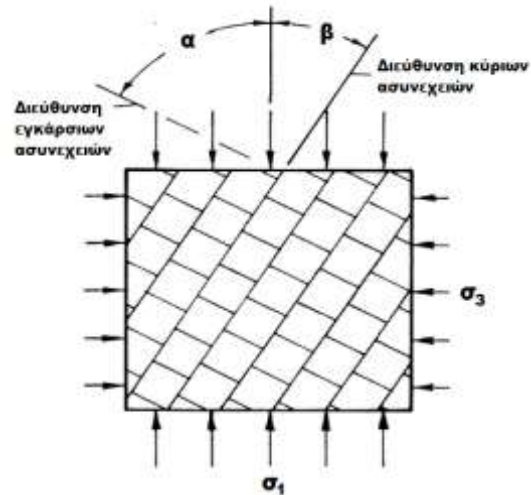
$Z, \zeta$ : σταθερές της διατμητικής αντοχής του υλικού

Οι **Brown & Hudson (1972)**, τέλος, εξέτασαν με μονοαξονικές δοκιμές την προοδευτική αστοχία κερματισμένου δοκιμίου κατασκευασμένο από γύψο και αποτελούμενο από 40 μπλοκ συμπαγούς υλικού. Η προοδευτική αστοχία του δοκιμίου οφειλόταν σε εφελκυστική αστοχία του άρρηκτου υλικού, περιστροφές των μπλοκ, διατμητική αστοχία των ασυνεχειών και διατμητικές παραμορφώσεις των τεμαχίων του συμπαγούς υλικού.

Το συμπέρασμα που προέκυψε από τις δοκιμές είναι ότι η κατανομή των τάσεων που προκαλείται από την **παρουσία των ασυνεχειών** οδηγεί σε μια αξιοσημείωτη **μείωση της αντοχής του δοκιμίου** σε σχέση με αυτήν του άρρηκτου υλικού, ακόμα και όταν ο μηχανισμός αστοχίας οφείλεται σε αστοχία των μπλοκ. Επίσης, παρατήρησαν ότι η **αντοχή του δοκιμίου είναι συνάρτηση του αριθμού των ασυνεχειών και του σχήματος των μπλοκ.**

### 2.6.5 Δοκιμές των Ladanyi & Archambault (1972, 1980)

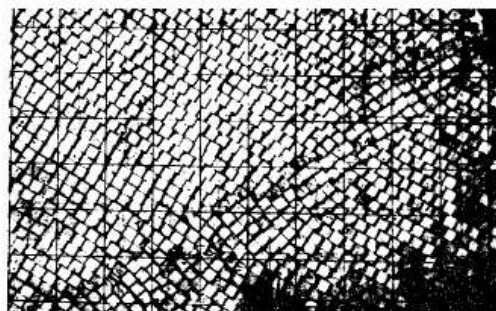
Οι Ladanyi & Archambault (1972) δημιούργησαν προσομοιώματα από τσιμέντο πλάτους 50.0cm, ύψους 100.0cm και πάχους 15.0cm αποτελούμενα από εμμένουσες και μη εμμένουσες ασυνέχειες με γωνίες κλίσης  $\beta$  και  $\alpha$  ως προς τη φόρτιση.



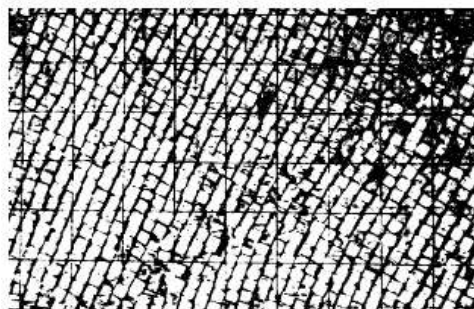
Σχήμα 2.28 : Γεωμετρία ρωγματωμένης βραχομάζας (Ladanyi & Archambault, 1972)

Οι μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρήθηκαν ήταν συνάρτηση της κλίσης των συστημάτων ασυνεχειών ως εξής:

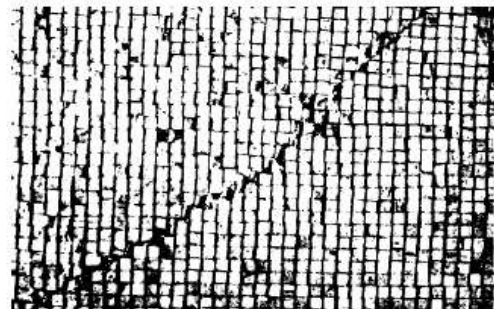
- Για γωνίες  $15^\circ < \alpha < 45^\circ$  δημιουργήθηκαν ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης (kink bands)
- Για γωνίες  $0^\circ < \beta < 7^\circ$  και  $77^\circ < \beta < 90^\circ$  η αστοχία οφειλόταν σε δημιουργία επιπέδου διάτμησης
- Στις υπόλοιπες γωνίες η αστοχία των δοκιμίων οφειλόταν σε δημιουργία ζωνών διάτμησης



(α) Ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης



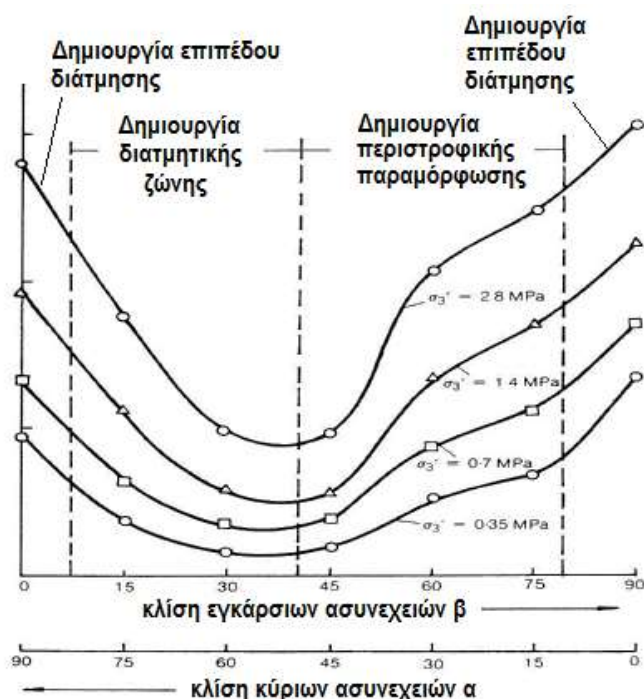
(β) Διατμητική αστοχία σε ζώνη



(γ) Διατμητική αστοχία σε επίπεδο

Εικόνα 2.3 : Τρόποι αστοχίας των δοκιμίων (Ladanyi & Archambault, 1972)

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από τις δοκιμές αυτές είναι ότι ο **βαθμός αλληλοεμπλοκής των τεμαχών του πετρώματος επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του**, καθώς αυτός είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τη δυνατότητα περιστροφής των τεμαχών. Ο βαθμός αλληλοεμπλοκής **εξαρτάται από το σχήμα τους και από το βαθμό διαταραχής στον οποίο έχει υποβληθεί η βραχώμαζα**.



Σχήμα 2.29 : Αποτελέσματα δοκιμών (Ladanyi & Archambault, 1972)

Οι ίδιοι ερευνητές σε νεότερη εργασία τους (1980) πραγματοποίησαν διαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια με δύο μη εμμένουσες ασυνέχειες. Τα δοκίμια ήταν πλάτους 50.0cm, ύψους 100.0cm και πάχους 15.0cm. Τα τεμάχια του συμπαγούς υλικού είχαν τετραγωνική διατομή και ήταν δύο διαφορετικών διαστάσεων με πλευρά 2.50cm και 1.25cm αντίστοιχα.

Οι δοκιμές έγιναν για τρεις διαφορετικές τιμές πλευρικής πίεσης για δοκίμια με τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς κλίσεων των μη επίμονων ασυνεχειών: 15°/75° , 30°/60° , 38°/52° .

Η σύγκριση με το προηγούμενο πείραμα έδειξε ότι η αντοχή για τις δύο περιπτώσεις δοκιμών συμπίπτουν μόνο για γωνίες μεταξύ 0° και 30°. Σε όλες τις υπόλοιπες γωνίες η αντοχή του δοκιμίου με τις εμμένουσες ασυνέχειες είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου με τις μη εμμένουσες ασυνέχειες. Αυτό, σύμφωνα με του Ladanyi & Archambault (1980) οφείλεται στους **διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας** των δύο δοκιμών. Στα προσομοιώματα με τις εμμένουσες ασυνέχειες, για γωνίες  $\theta$  μεταξύ 40° και 80°, σχηματίζονταν **ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης, μηχανισμός αστοχίας που οδηγεί στις μικρότερες αντοχές**. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας δεν παρουσιάστηκε στα δοκίμια με τις **μη εμμένουσες ασυνέχειες** στα οποία η αστοχία οφειλόταν σε **διατμητική αστοχία σε επίπεδο ή σε ζώνη**.

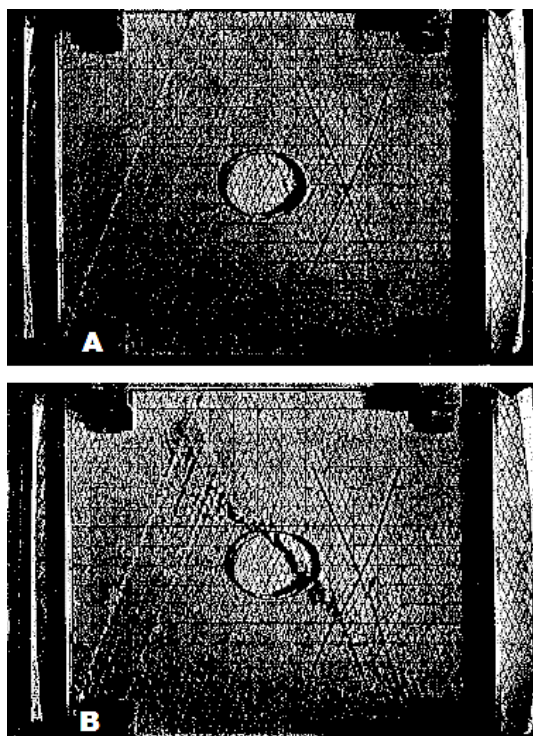
Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο **μηχανισμός αστοχίας** και η **αντοχή** της κερματισμένης βραχώμαζας **εξαρτάται** σε μεγάλο βαθμό από την **ομοιομορφία των τεμαχών συμπαγούς υλικού**, καθώς και από την **εμμονή των ασυνεχειών**. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η αστοχία στα δοκίμια με τις μη εμμένουσες ασυνέχειες ήταν προοδευτική.

## 2.6.6 Δοκιμές των Bandis et al. (1981) και Bandis (1990)

Σύμφωνα με τους **Bandis et al. (1981)**, σε **πυκνά κερματισμένες βραχώμαζες** ενεργοποιούνται **μηχανισμοί περιστροφικής διάτμησης**, ενώ αντιθέτως σε **αραιότερα ρωγματωμένα πετρώματα** εκδηλώνονται **διατμητικές ολισθήσεις σε επιλεγμένα επίπεδα ασυνεχειών**. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα **μικρότερα τεμάχια άρρηκτου πετρώματος** έχουν **περισσότερους βαθμούς ελευθερίας** με αποτέλεσμα τη δυνατότητα περιστροφής.

Οι ίδιοι ερευνητές εκτέλεσαν δοκιμές διαζονικής θλίψης σε συνθήκες επίπεδης τάσης σε φυσικά δοκίμια ψαθυρού υλικού με δύο συστήματα ασυνεχειών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για 3 δοκίμια η μόνη διαφορά των οποίων ήταν η απόσταση των ασυνεχειών. Έτσι, το δοκίμιο 1 αποτελούνταν από 4000 τεμάχια άρρηκτου υλικού, το δοκίμιο 2 από 1000 και το δοκίμιο 3 από 250.

Η διεξαγωγή των δοκιμών έδειξε ότι μεγαλύτερη αντοχή παρουσίασε το δοκίμιο με τα περισσότερα τεμάχια (δοκίμιο 1) και μάλιστα 30% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου 3 με τα 250 τεμάχια. Τα δοκίμια 2 και 3 αστόχησαν με διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών, ενώ στο δοκίμιο 1 η αστοχία οφειλόταν σε ζώνες περιστροφικής παραμόρφωσης. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η προοδευτική αστοχία μιας τέτοιας ζώνης σε δοκίμιο με 4000 τεμάχια:



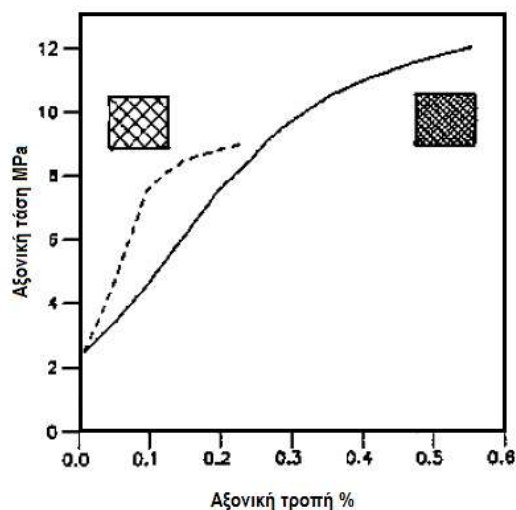
**Εικόνα 2.4 :** Προοδευτική δημιουργία ζωνών περιστροφικής παραμόρφωσης (Bandis et al., 1981)

Από τις δοκιμές φάνηκε ότι όταν ο αριθμός των τεμαχίων του άρρηκτου υλικού αυξηθεί σημαντικά, τότε μεταβάλλεται η συμπεριφορά του δοκιμίου. Οι περιστροφές των τεμαχίων ενεργοποιούν μηχανισμούς περιστροφικής διάτμησης με αποτέλεσμα το καλύτερο αλληλοκλείδωμα των τεμαχίων και κατά συνέπεια αύξηση της αντοχής του δοκιμίου.

Αντίστοιχες δοκιμές πραγματοποίησε και ο **Bandis (1990)** σε δύο δοκίμια με διαφορετικό μέγεθος τεμαχίου άρρηκτου υλικού. Στο δοκίμιο (A) η απόσταση των ασυνεχειών ήταν 0.30m, ενώ στο (B) 3.0m. Μεγαλύτερη αντοχή παρουσίασε το δοκίμιο (A) με τα περισσότερα τεμάχια. Η αστοχία στο έντονα κερματισμένο δοκίμιο οφειλόταν σε περιστροφές των τεμαχίων, ενώ η αστοχία στο άλλο δοκίμιο σε διατμητικές ολισθήσεις ασυνεχειών.



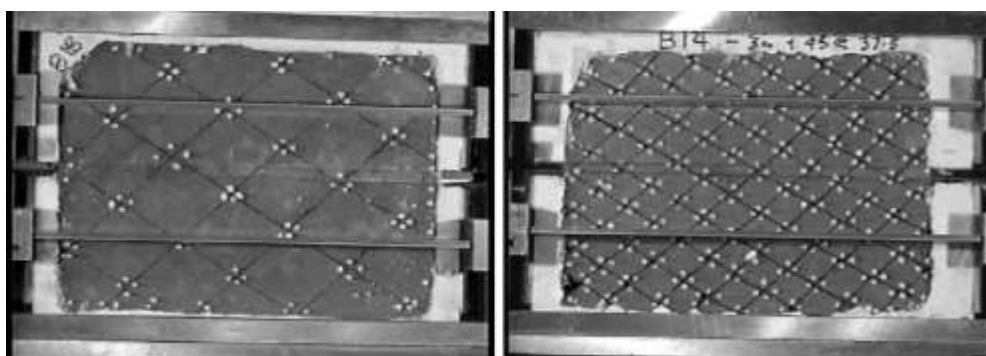
Σύμφωνα με τον Bandis (1990) η παραπάνω συμπεριφορά είναι **αποτέλεσμα της επίδρασης της κλίμακας** όταν τα τεμάχια έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν ανεξάρτητα και να έχουν επαφή με όλες τις κλίμακες τραχύτητας. Οι απαιτούμενοι βαθμοί ελευθερίας των τεμαχίων για να συμβεί αυτό δύναται να υπάρχουν σε περιπτώσεις έντονα κερματισμένης βραχώμαζας που βρίσκεται επιφανειακά ή σε μικρό βάθος ή με άλλα λόγια για μικρές τιμές ορθής τάσης.



Σχήμα 2.30 : Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης (Bandis, 1990)

### 2.6.7 Δοκιμές των Szymakowski et al. (2003)

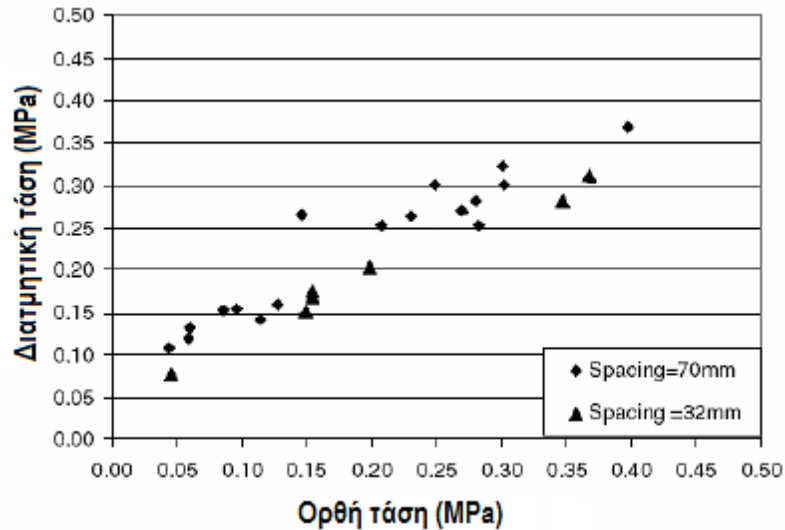
Οι **Szymakowski et al. (2003)** πραγματοποίησαν δοκιμές διάτμησης σε κερματισμένα φυσικά δοκίμια διαστάσεων 390.0mm x 280.0mm x 270.0mm. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δοκιμών που εξετάστηκαν ήταν η απόσταση των ασυνεχειών. Έτσι, στο ένα δοκίμιο η **απόσταση των ασυνεχειών** ήταν **70.0mm** και στο δεύτερο **32.0mm**.



Εικόνα 2.5 : Δοκίμια με αποστάσεις ασυνεχειών 70.0mm (Α) και 32.0mm (Β). (Szymakowski et al., 2003)

Από τις 37 δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι η αντοχή των δοκιμών με τη μεγάλη απόσταση ασυνεχειών είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης των δοκιμών με τη μικρή απόσταση ασυνεχειών.

Οι δοκιμές αυτές έδειξαν ότι η αντοχή της κερματισμένης βραχώμαζας είναι άμεση συνάρτηση του μεγέθους του τεμάχου του άρρηκτου υλικού που προκύπτει από την απόσταση των ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, **βραχώμαζες με μεγάλα τεμάχια άρρηκτου υλικού παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τις αντίστοιχες με μικρότερα τεμάχια.**



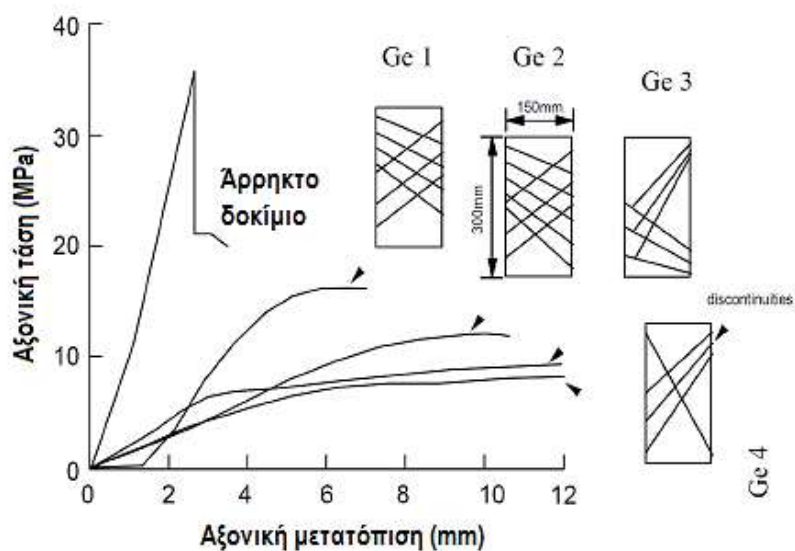
Σχήμα 2.31 : Αποτελέσματα δοκιμών ομοιωμάτων διαφορετικής απόστασης ασυνεχειών (Szymakowski et al., 2003)

### 2.6.8 Δοκιμές των Meyers & Priest (1992)

Οι **Meyers & Priest (1992)** διεξήγαγαν τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε δοκίμια κατασκευασμένα από γύψο με επίπεδα αδυναμίας σε διάφορες κλίσεις. Οι διαστάσεις των δοκιμών ήταν 300.0mm ύψος και 150.0mm πλάτος, ενώ η πλευρική πίεση που εφαρμόστηκε ήταν ίση με 1.0MPa.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν **μείωση της αντοχής των κερματισμένων δοκιμών σε σχέση με αυτήν του άρρηκτου υλικού**. Γενικώς, η συμπεριφορά και η **αντοχή** των κερματισμένων δοκιμών ήταν **συνάρτηση της κλίσης των ασυνεχειών και της αντοχής του άρρηκτου υλικού**.

Το δοκίμιο 2, με το μεγαλύτερο αριθμό ασυνεχειών, παρουσίασε μεγαλύτερη αντοχή από το δοκίμιο 4 που περιείχε τα λιγότερα επίπεδα αδυναμίας. Στο δοκίμιο 2 η αστοχία οφειλόταν σε διατμητική θραύση άρρηκτου υλικού και ασυνέχειας, ενώ στο 4, το οποίο περιείχε μια ασυνέχεια με τη δυσμενέστερη κλίση, η αστοχία οφειλόταν σε ολίσθηση πάνω στο επίπεδο της ασυνέχειας αυτής.



Σχήμα 2.32 : Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε ρωγματωμένα φυσικά δοκίμια (Meyers & Priest, 1992)

## 2.6.9 Δοκιμές των Kulatikale et al. (2001)

Οι **Kulatikale et al. (2001)** πραγματοποίησαν δοκιμές μονοαξονικής και διαξονικής θλίψης σε φυσικά δοκίμια διαστάσεων 35.60cm x 17.80cm x 2.50cm με διαφόρους συνδυασμούς επιπέδων αδυναμίας. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με άσκηση σταθερής πίεσης στις πλευρές και άσκηση φορτίου στο άνω όριο των δοκιμίων.

Με κατάλληλο τρόπο δημιουργήθηκαν δύο συστήματα ασυνεχειών στο υλικό. Συνολικά παρήχθησαν 30 διαφορετικά δοκίμια με διαφορετική κλίση και διαφορετικό αριθμό ασυνεχειών.

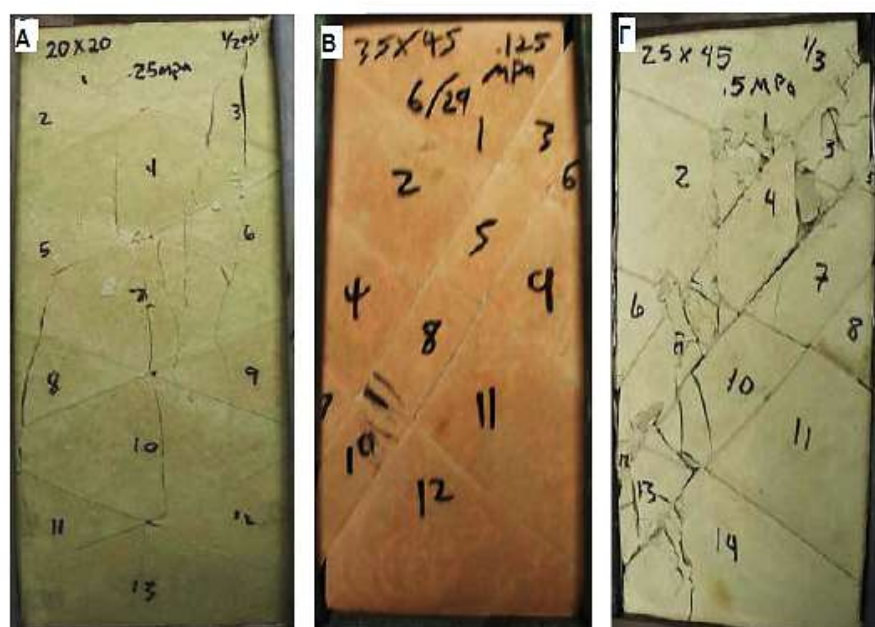
Τα αποτελέσματα των δοκιμών υπέδειξαν τρεις μηχανισμούς αστοχίας:

- αξονική κατάκλαση (εφελκυστική αστοχία) του άρρηκτου υλικού,
- ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών,
- συνδυασμός των δύο παραπάνω μηχανισμών

Ο 1<sup>ος</sup> μηχανισμός αστοχίας παρουσιάστηκε κατά τη μονοαξονική δοκιμή σε όλα τα ομοιώματα που περιείχαν ασυνέχειες με κλίσεις μικρότερες των 15°. Για μεγαλύτερες πλευρικές πιέσεις με τον τρόπο αυτό αστόχησαν δοκίμια κλίσης ασυνεχειών μέχρι και 40°. Σε μικρές πλευρικές πιέσεις η αξονική κατάκλαση ήταν κάθετα προσανατολισμένη στο επίπεδο της ελάχιστης κύριας τάσης, ενώ σε μεγαλύτερες πλευρικές πιέσεις σχηματιζόταν σε επίπεδο διαγώνιο ως προς την ελάχιστη κύρια τάση.

Ο 2<sup>ος</sup> μηχανισμός αστοχίας χαρακτηρίστηκε από κινήσεις του άρρηκτου υλικού παράλληλα ή κάθετα στα επίπεδα των ασυνεχειών. Στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με τον τρόπο αυτό αστόχησαν τα δοκίμια στα οποία ένα τουλάχιστον σύστημα ασυνεχειών είχε κλίση μεγαλύτερη των 35°. Ο μηχανισμός αυτός δεν εκδηλώθηκε καθόλου σε υψηλές πλευρικές πιέσεις.

Τέλος, ο 3<sup>ος</sup> μηχανισμός αστοχίας, που περιελάμβανε αστοχία τόσο του άρρηκτου υλικού, όσο και των ασυνεχειών, εκδηλώθηκε σε μικρές πλευρικές πιέσεις σε δοκίμια με κλίσεις ασυνεχειών μεταξύ 30° και 45°, ενώ σε μεγάλες πλευρικές πιέσεις με τον τρόπο αυτό αστόχησαν δοκίμια με ένα τουλάχιστον σύστημα συνεχειών κλίσεως μέχρι 55°.

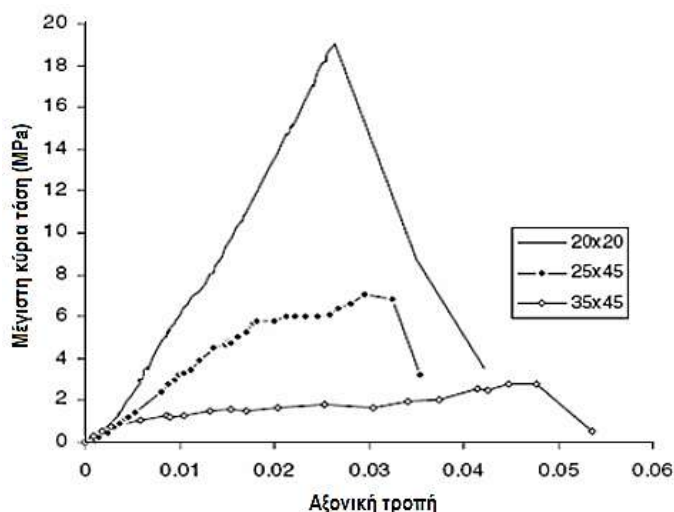


A. Αξονική κατάκλαση άρρηκτου υλικού

B. Ολίσθηση ασυνεχειών

Γ. Συνδυασμός των Α,Β

Εικόνα 2.6 : Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμίων (Kulatikale, 2001)



Σχήμα 2.33 : Διαγράμματα αξονικών τάσεων – αξονικών τροπών για τρεις περιπτώσεις (Kulatikale, 2001)

### 2.6.10 Δοκιμές των Thorpe et al. (1980)

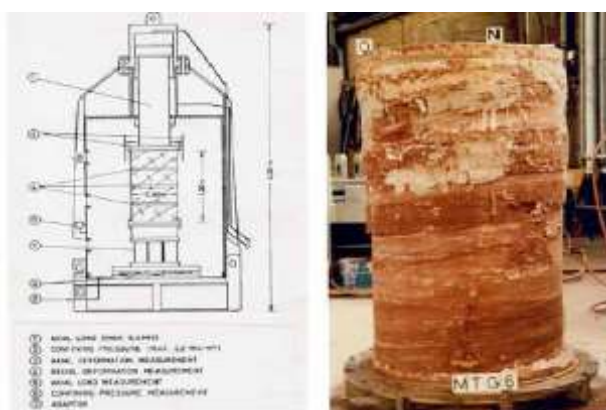
Οι Thorpe et al. (1980) διενήργησαν δοκιμές μεγάλης κλίμακας μονοαξονικής θλίψης σε δείγματα γρανίτη, μήκους 2.0m και διαμέτρου 1.0m στο μεταλλείο Stripa της Σουηδίας. Το δείγμα περιείχε δύο κύριες οικογένειες ασυνεχειών και αρκετές δευτερεύουσες μεμονωμένες διακλάσεις. Το ένα κύριο σύστημα περιείχε εμμένουσες ασυνέχειες σχεδόν κάθετες προς τη φόρτιση, ενώ το δεύτερο μη εμμένουσες ασυνέχειες κλίσης 25° έως 30° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης.

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη των άρρηκτων δοκιμίων του ίδιου πετρώματος μετρήθηκε μεταξύ 178.0MPa και 208.0MPa, ενώ η αντίστοιχη αντοχή του δείγματος με τις ασυνέχειες μετρήθηκε 7.55MPa. Η παρουσία, επομένως, των ασυνεχειών είχε καταλυτικό ρόλο στην αντοχή του δοκιμίου της βραχόμαζας.

Η συμπεριφορά των δοκιμίων κατά τις δοκιμές ήταν πολύπλοκη με το μηχανισμό αστοχίας να είναι ένας συνδυασμός διαμητρικής αστοχίας ασυνεχειών και ψαθυρής αστοχίας του άρρηκτου υλικού.

### 2.6.11 Δοκιμές των Natau et al. (1983)

Οι Natau et al. (1983) πραγματοποίησαν στο πανεπιστήμιο Karlsruhe της Γερμανίας τριαξονικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας όπου εξετάστηκε η αντοχή μεγάλων δειγμάτων αργιλικού σχιστόλιθου, φαμίτη με ενδιάμεσες λεπτές στρώσεις ιλυόλιθου και ιλυόλιθου.



Εικόνα 2.7 : Δοκίμιο αργιλικού σχιστόλιθου (Natau et al., 1983)

Οι διαστάσεις των δοκιμών και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω υπό μορφή πίνακα. Είναι φανερή η **μείωση της αντοχής του κερματισμένου πετρώματος** σε σχέση με αυτήν του άρρηκτου και για τα τρία δείγματα που εξετάστηκαν.

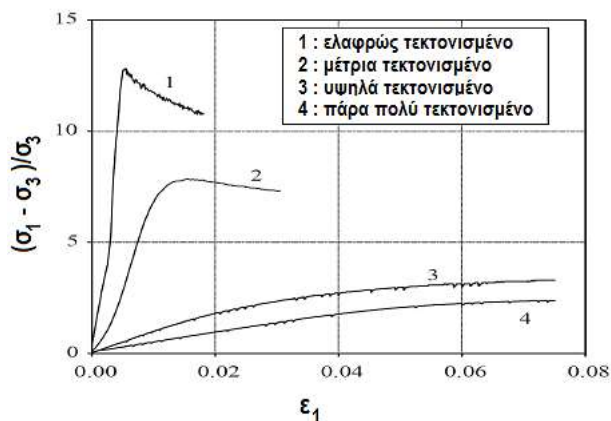
Πέτρωμα	Διαστάσεις δοκιμίου	Ασυνέχειες	Αντοχή άρρηκτου δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη	Αντοχή κερματισμένου δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη
Αργιλικός σχιστόλιθος	1)Κυλινδρικό με διάμετρο 0.6 μέτρα και ύψος 1.2 μέτρα (δοκιμή παράλληλη στη σχιστότητα) 2)Πρισματικό με διαστάσεις 0.6m x 0.6m x 1.2m (δοκιμή κάθετη στη σχιστότητα)	3 οικογένειες ασυνεχειών – απόσταση μικρότερη των 20 cm	1) 55 MPa (δοκιμή παράλληλα με τη σχιστότητα) 2) 100 MPa (δοκιμή κάθετη στη σχιστότητα)	1) 3 MPa (δοκιμή παράλληλη στη σχιστότητα) 2) 8 MPa (δοκιμή κάθετη στη σχιστότητα)
Ψαμμίτης με στρώσεις ιλύολιθου	Κυλινδρικό με διάμετρο 0.6 μέτρα και ύψος 1.2 μέτρα	Κύριες ασυνέχειες κατά μήκος των στρώσεων	1) 10.5 MPa (ψαμμίτης) 2) 4.8 MPa (ιλύολιθος)	1.33 MPa
Ιλύολιθος	Κυλινδρικό με διάμετρο 0.6 μέτρα και ύψος 1.2 μέτρα	Πυκνό δίκτυο ασυνεχειών	65 MPa	6.8 MPa

Πίνακας 2.9 : Περιγραφή των δοκιμών και αποτελέσματα των δοκιμών (Natau et al., 1983)

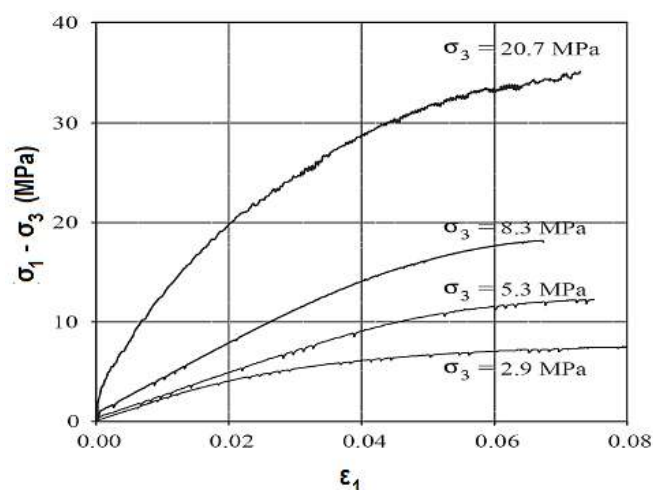
### 2.6.12 Δοκιμές των Habimana et al. (2002)

Οι Habimana et al. (2002) πραγματοποίησαν **τριαξονικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας σε χαλαζιακό ψαμμίτη και φυλλιτικό σχιστόλιθο** κατά τη διάρκεια κατασκευής του υδροηλεκτρικού έργου Cleuson – Dixence στην Ελβετία. Οι δοκιμές έγιναν σε **δοκίμια ποικίλου βαθμού τεκτονισμού** τα οποία ταξινομήθηκαν στο σύστημα GSI.

Από τα αποτελέσματα είναι φανερή η **μείωση της αντοχής της βραχώμαζας με την αύξηση του βαθμού τεκτονισμού** της.



Σχήμα 2.34 : Διάγραμμα τάσεων – τροπιών πετρώματος ποικίλου βαθμού τεκτονισμού (Habimana et al., 2002)



Σχήμα 2.35 : Διάγραμμα τάσεων – τροπών τεκτονισμένου πετρώματος μεταβαλλόμενης πλευρικής τάσης (Habimana et al., 2002)

### 2.6.13 Δοκιμές των Ranjith et al. (2004)

Οι Ranjith et al. (2004) πραγματοποίησαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε 24 κερματισμένα δοκίμια γρανίτη διαμέτρου 48.0mm και ύψους 100.0mm. Τα 12 δοκίμια περιείχαν μία ασυνέχεια και τα υπόλοιπα περισσότερες.

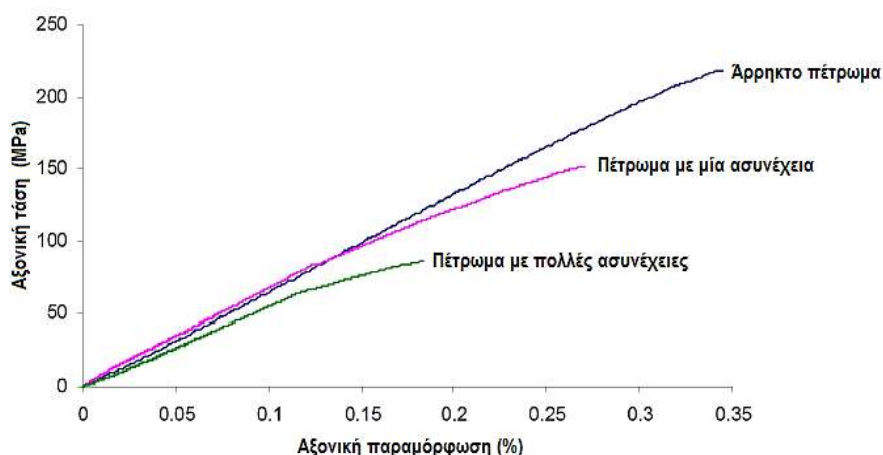
Η αντοχή του άρρηκτου γρανίτη προσδιορίστηκε στα 212.0MPa. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για το κερματισμένο πέτρωμα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός δοκιμίου (δοκίμια με μια ασυνέχεια)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)	Αριθμός δοκιμίου (δοκίμια με πολλές ασυνέχειες)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
1	165.35	1	83.87
2	116.4	2	91.93
3	113.85	3	81.61
4	144.88	4	86.37
5	73.65	5	99.35
6	123.6	6	104
7	135.51	7	75.15
8	103.48	8	99.28
9	108.93	9	77.16
10	151.06	10	85.33
11	129.28	11	90.49
12	160.82	12	69.71
Μέση τιμή	125±25	Μέση τιμή	85±10

Πίνακας 2.10 : Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμών κερματισμένου γρανίτη (Ranjith et al., 2004)

Παρατηρείται μείωση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του γρανίτη από τα 212.0MPa του άρρηκτου πετρώματος στα 125.0MPa (πέτρωμα με μία ασυνέχεια) και στα 85.0MPa (πέτρωμα με πολλές ασυνέχειες).

Η διαφορά στην αντοχή του πετρώματος με πολλές ασυνέχειες σε σχέση με του αντίστοιχου με το ένα επίπεδο αδυναμίας οφείλεται συμφωνα με τους ερευνητές στη δυνατότητα των τεμαχίων του έντονα κερματισμένου υλικού να παραμορφωθούν, να ολισθήσουν ή να περιστραφούν σε πολλές διευθύνσεις, συμπεριφορά που δε μπορεί να συμβεί τα τεμάχια του πετρώματος με τη μία ασυνέχεια.

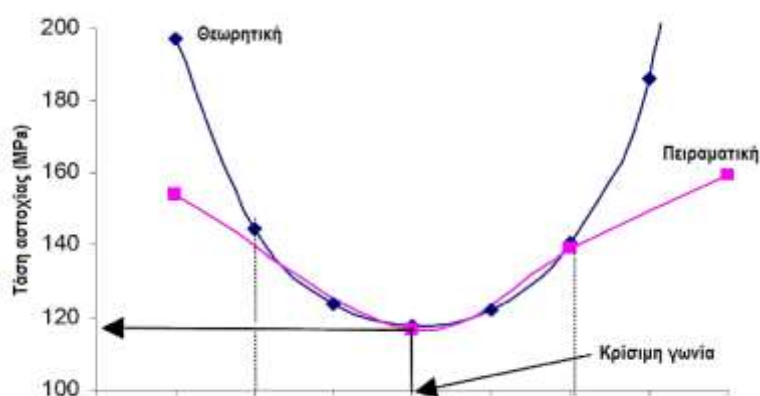


Σχήμα 2.36 : Διάγραμμα αξονικής τάσης – αξονικής τροπής για τρεις δομές πετρώματος (Ranjith et al., 2004)

Τέλος, στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η σύγκριση της αντοχής του πετρώματος με μία ασυνέχεια όπως εκτιμήθηκε πειραματικά, αλλά και θεωρητικά σύμφωνα με τη θεωρία ενός επιπέδου αδυναμίας του Jaeger. Παρατηρούμε ότι η προσέγγιση των δύο μεθόδων είναι ανεπαρκής για ασυνέχεια κλίσης 50° και 85°, όμως, είναι πολύ καλή για κλίσεις κοντά σε αυτήν που ελαχιστοποιείται η αντοχή του δοκιμίου.

Αριθμός δοκιμίου	Κλίση ασυνέχειας	Τάση αστοχίας MPa (θεωρία Jaeger)	Τάση αστοχίας MPa (πειραματική)
1	50	197.35	153.78
2	65	117.87	116.4
3	75	140.55	138.75
4	85	336.77	159.65

Πίνακας 2.11 : Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής αντοχής πετρώματος (Ranjith et al., 2004)



Σχήμα 2.37 : Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής αντοχής πετρώματος (Ranjith et al., 2004)

## 2.7 Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης προβλημάτων βραχομηχανικής

Οι εμπειρικές και οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για την επίλυση των διαφόρων γεωμηχανικών προβλημάτων ευστάθειας τείνουν μετά την ανάπτυξη των υπολογιστών από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 να παραμερισθούν έναντι των αριθμητικών μεθόδων οι οποίες προσφέρουν κατά κανόνα μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι οι αριθμητικές μέθοδοι, μέσω κατάλληλα επιλεγόμενων κατά περίπτωση προτύπων, επιτυγχάνουν να προσεγγίσουν καλύτερα τη συμπεριφορά του επί τόπου πετρώματος με παρόντα όλα τα δομικά του χαρακτηριστικά.

Οι υπόψη μέθοδοι διακρίνονται σε εκείνες που:

1. θεωρούν το πέτρωμα είτε ως **συνεχές υλικό** ως έχει είτε μετά από κατάλληλους μετασχηματισμούς ως ισοδύναμο συνεχές μέσο. Τέτοιες είναι:
  - η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)
  - η Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method)
  - η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method)
2. θεωρούν το πέτρωμα καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής εργασίας ως **ασυνεχές υλικό** συνιστάμενο από ένα άθροισμα διακεκριμένων στοιχείων που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες. Τέτοια είναι:
  - η Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method)
3. κάνουν χρήση συνδυασμού των προηγούμενων μεθόδων και συνιστούν τις υβριδικές μεθόδους.

Η διαδικασία που ακολουθείται σε γενικές γραμμές στις αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση ενός προβλήματος έχει ως εξής:

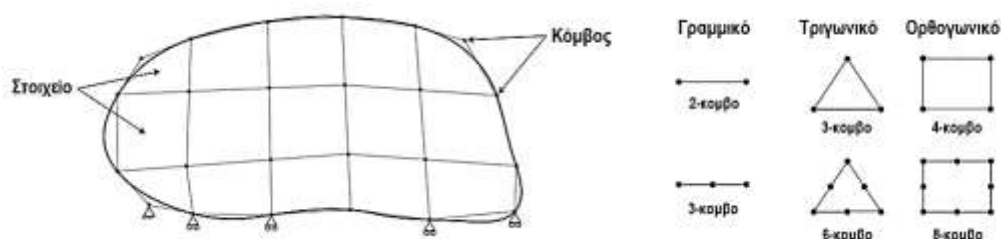
- Επιλέγεται και απεικονίζεται το πρόβλημα με ακρίβεια σε μορφή μοντέλου.
- Ανάλογα με τις διαθέσιμες πληροφορίες από προηγούμενα έρευνα και εμπειρία το υλικό θεωρείται ως συνεχές ή ασυνεχές.
- Η μάζα του πετρώματος που απεικονίζεται στο μοντέλο χωρίζεται σε στοιχεία του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους, γνωστής γεωμετρίας και ιδιοτήτων.
- Η συμπεριφορά των στοιχείων διατυπώνεται με καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν τις τάσεις με τις παραμορφώσεις τους και που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν καλύτερα το πέτρωμα όταν αυτό καταπονείται.
- Χαρακτηρίζεται το πέτρωμα από πλευράς συμπεριφοράς (γραμμικώς ελαστικό, ελαστοπλαστικό κτλ.) και ανισοτροπίας και επιλέγεται το κριτήριο αστοχίας που περιγράφει καλύτερα την οριακή εντατική κατάσταση του πετρώματος.
- Προσδίδονται στο πέτρωμα και τις ασυνέχειες οι κατάλληλες ιδιότητες που υπεισέρχονται στη μαθηματική παρουσίαση του προβλήματος και είναι διαθέσιμες από προηγούμενα έρευνα και εμπειρία.
- Με κατάλληλη άθροιση της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου προκύπτει η αναμενόμενη συμπεριφορά της βραχόμαζας περίξ της εκσκαφής.

Γενικώς, κάθε μέθοδος παρουσιάζει τα θετικά και τα αρνητικά της στοιχεία κατά την επίλυση ενός συγκεκριμένου γεωτεχνικού προβλήματος. Για το λόγο αυτό ενδείκνυται η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ δύο ή περισσότερων μεθόδων για να διαπιστωθούν οι μεταξύ τους ομοιότητες και διαφορές και να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό σχεδιαστικό αποτέλεσμα.



## 2.7.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο υπό μελέτη χώρος διαιρείται σε επιμέρους τμήματα, τα πεπερασμένα στοιχεία ή τμήματα (elements) με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών. Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους και μπορεί να έχει περισσότερους από αυτούς που ορίζει η γεωμετρία του, δηλαδή οι πλευρές του.



Σχήμα 2.38 : Τυπική σχηματική απεικόνιση διακριτοποίησης στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Η υπόθεση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι οι δυνάμεις εντός ενός στοιχείου μπορούν να εκπροσωπηθούν με τις αλληλεπιδράσεις στους κόμβους των στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002).

Ειδικότερα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Διακριτοποίηση του πεδίου προς ανάλυση σε στοιχεία.
- Θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων που συνδέουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών στα εσωτερικά σημεία κάθε στοιχείου.
- Προσδιορισμός των συναρτήσεων που συνδέουν το αίτιο (δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και την άγνωστη μεταβλητή.
- Κατασκευή των καταστατικών εξισώσεων για κάθε στοιχείο (συνάρτηση συμπεριφοράς στοιχείου).
- Αντιστοίχιση των αγνώστων ποσοτήτων των εσωτερικών σημείων κάθε στοιχείου του πεδίου με τις κομβικές μεταβλητές του στοιχείου μέσω των συναρτήσεων μορφής.
- Εφαρμογή της συνθήκης ισορροπίας από όπου προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων σε επίπεδο στοιχείου με αγνώστους τις κομβικές μεταβλητές.
- Συνάθροιση των κομβικών εξισώσεων κάθε στοιχείου και εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος.
- Υπολογισμός της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου του πεδίου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους των στοιχείων.
- Υπολογισμός δευτερογενών αγνώστων μεγεθών όπως ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις κτλ.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Οι **συναρτήσεις μορφής** παρομοιάζονται με συναρτήσεις επιρροής κάθε κόμβου προς το περιβάλλον του καθώς ορίζουν τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων σε σχέση με τη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Αναφέρονται κατά κύριο λόγο στις άγνωστες ποσότητες στους κόμβους, αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν οποιαδήποτε άλλη ποσότητα η που μπορεί να μεταβληθεί στο εσωτερικό κάθε στοιχείου. Σε κάθε στοιχείο ορίζονται τόσες συναρτήσεις μορφής όσοι είναι οι κόμβοι του και η χρήση τους εξασφαλίζει την ομαλή μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε αυτό. Οι συναρτήσεις αυτές έχουν άμεση σχέση με την ακρίβεια των υπολογισμών και με το χρόνο επίλυσης του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εξακολουθεί να είναι η πιο *ευρέως χρησιμοποιούμενη* και πιθανώς η πιο *ευέλικτη* μέθοδος για την ανάλυση προβλημάτων συνοριακών συνθηκών στη Γεωτεχνική Μηχανική.

Τα κύρια **πλεονεκτήματα** της μεθόδου συνοψίζονται ως εξής (Carter, 2000):

- Δύναται να θεωρηθεί μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού για ολόκληρο το πεδίο διερεύνησης.
- Είναι δυνατή η μοντελοποίηση ακολουθιών εκσκαφής συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής ενίσχυσης και συστημάτων κατασκευαστικής υποστήριξης.
- Μπορούν να προσομοιωθούν ικανοποιητικά δομικά χαρακτηριστικά της εδαφικής ή της βραχώδους μάζας.
- Μπορεί να εισαχθεί συμπεριφορά υλικού η οποία είναι χρονικά εξαρτώμενη.
- Το σύστημα εξίσωσης είναι συμμετρικό (εκτός από τα ελαστοπλαστικά προβλήματα για μη συνητημένες πλαστικές ροές χρησιμοποιώντας μεθόδους εφαπτομενικής ακαμψίας).
- Η διατύπωση της συμβατικής μετατόπισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις περισσότερες αναλύσεις διαδρομής της φόρτισης.
- Είναι πλέον διαθέσιμες ειδικές διατυπώσεις και για άλλους τύπους γεωτεχνικών προβλημάτων όπως για παράδειγμα για την ανάλυση διαρροής και τις επιλύσεις του δεσμευμένου θεωρήματος στη θεωρία της πλαστικότητας.
- Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί ευρέως στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων και συνεπώς υπάρχει διαθέσιμη μεγάλη εμπειρία.

Τα **μειονεκτήματα** της μεθόδου αφορούν περισσότερο την τρισδιάστατη ανάλυση και είναι (Carter, 2000):

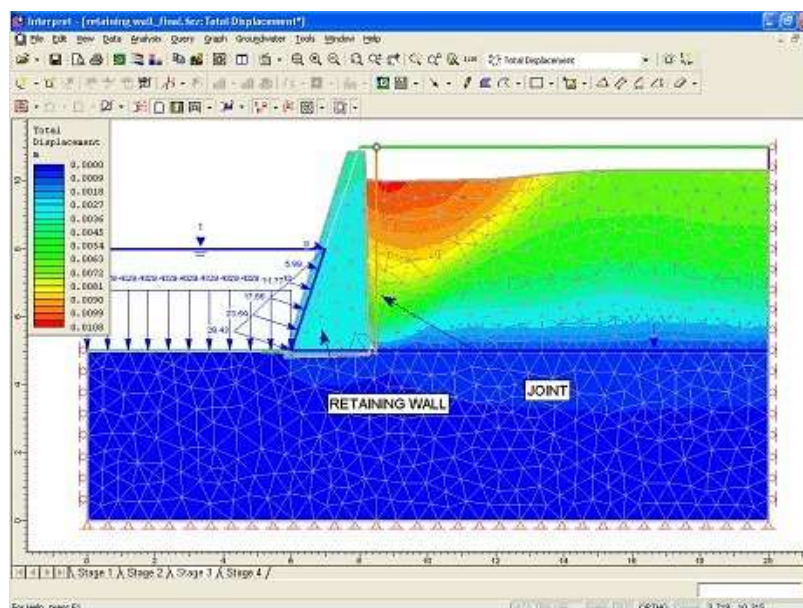
- Πρέπει να διακριτοποιηθεί όλος ο όγκος του πεδίου προς ανάλυση, οπότε απαιτείται μεγάλος χρόνος και την προ και μετά επεξεργασία.
- Λόγω των μεγάλων συστημάτων εξισώσεων που δημιουργούνται απαιτείται τα υπολογιστικά συστήματα να διαθέτουν μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας και μεγάλο δίσκο αποθήκευσης δεδομένων.
- Απαιτούνται εξελιγμένοι αλγόριθμοι για τα καταστατικά μοντέλα κράτυνσης και χαλάρωσης.
- Η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για υψηλού βαθμού ασυνέχεια ή έντονα διατηρημένου εδάφους όταν τα ελαττώματα αυτά κατανέμονται τυχαία και κυριαρχούν στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

### 2.7.1.1 Το πρόγραμμα Phase2

Το Phase2 της εταιρείας Rocscience είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα ελαστοπλαστικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές σε βράχο ή έδαφος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα τεχνικών έργων και περιλαμβάνει σχεδιασμό υποστήριξης, ευστάθεια πρανών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, διήθηση των υπογείων υδάτων και πιθανολογική ανάλυση.

Με το πρόγραμμα μπορούν να σχεδιαστούν σύνθετα μοντέλα με πολλαπλά στάδια και να αναλυθούν κατασκευές όπως σήραγγες ακόμα και σε ασθενή πετρώματα ή πετρώματα με ασυνέχειες, υπόγειες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, υπαίθριες μεταλλευτικές εκμεταλλεύσεις, πρανή, αναχώματα κτλ.

Επίσης, προσφέρεται η δυνατότητα προσθήκης υποστήριξης όπως: εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, σκυρόδεμα, χαλύβδινα συστήματα, τοίχους αντιστήριξης, πασσάλους, αγκυρώσεις, γεωυφάσματα κτλ.



**Εικόνα 2.8 :** Περιβάλλον ανάλυσης κατασκευής με χρήση του προγράμματος Phase2 της Rocscience

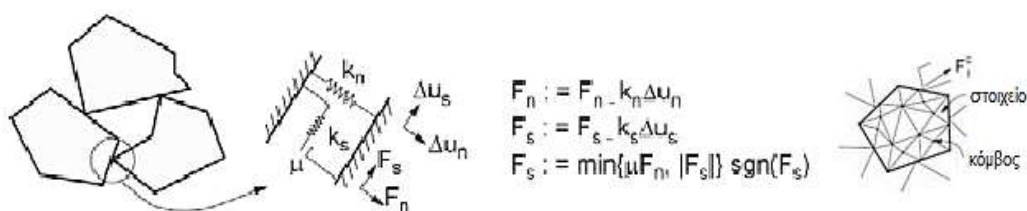
Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του Phase2 είναι η δυνατότητα συνδυαστικής ανάλυσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων με την **τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής** (Shear Strength Reduction Method – SSR). Η επιλογή αυτή είναι αυτοματοποιημένη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με παραμέτρους αντοχής Mohr – Coulomb ή Hoek – Brown.

Τέλος, το πρόγραμμα περιλαμβάνει ανάλυση με παρουσία υπογείων υδάτων και δεν απαιτείται η χρήση ξεχωριστού προγράμματος για την προσομοίωση τους. Τα αποτελέσματα της πίεσης πόρων ενσωματώνονται αυτόματα στην ανάλυση τάσεων.

### 2.7.2 Μέθοδος διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method)

Η αριθμητική μέθοδος διακριτών στοιχείων είναι μία από τις νεότερες μεθόδους που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση και τον υπολογισμό της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς ενός ρωγματομένου πετρώματος που συμπεριφέρεται ως ασυνεχές σώμα. Προτάθηκε από τον Cundal και αρκετές μορφές της εξελίχθηκαν στη δεκαετία του '70.

Η μέθοδος θεωρεί τη μάζα του πετρώματος ως ασυνεχές υλικό αποτελούμενο από ένα σύνολο διακεκριμένων άρρηκτων στοιχείων (ογκοτεμαχίων), άκαμπτων ή παραμορφώσιμων, που διαχωρίζονται μεταξύ τους από τις διεπιφάνειες των ασυνεχειών (οι ασυνέχειες της βραχώμαζας καθορίζουν τη γεωμετρία των στοιχείων διακριτοποίησης του προβλήματος). Τα στοιχεία αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καθένα είναι ελεύθερο να μετακινηθεί γραμμικά και στροφικά (ολίσθηση, συμπίεση, εφελκυστικός αποχωρισμός, περιστροφή) χωρίς περιορισμούς και η παραμόρφωσή του μπορεί να παρακολουθηθεί μέχρι την αστοχία, αν η εκσκαφή είναι ασταθής.



**Σχήμα 2.39 :** Σχηματική απεικόνιση διακριτών άρρηκτων στοιχείων και δυνάμεων στις επαφές

Στη μέθοδο διακριτών στοιχείων οι υπολογισμοί κατά την αριθμητική επίλυση εναλλάσσονται μεταξύ της εφαρμογής του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα στα σωματίδια και μιας καταστατικής σχέσης δύναμης – μετατόπισης στις επαφές. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μεταφορικής και περιστροφικής κίνησης κάθε σωματιδίου λόγω των δυνάμεων που ασκούνται στις επαφές από τα γειτονικά σωματίδια των εφαρμοζόμενων εξωτερικών δυνάμεων και των βαρυτικών δυνάμεων. Η καταστατική σχέση στις επαφές χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων σε αυτές ως αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των σε επαφή σωματιδίων.

Η δυναμική αυτή διαδικασία αναπαριστάται αριθμητικά από έναν χρονοβηματικό αλγόριθμο βάσει του οποίου πραγματοποιούνται υπολογισμοί σε χρονικά βήματα όπου σε κάθε βήμα οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις των σωματιδίων θεωρούνται σταθερές. Με αυτό το σχήμα επίλυσης αν το χρονικό βήμα είναι μικρό, κάθε στιγμή οι δυνάμεις που δρουν σε ένα σωματίδιο προσδιορίζονται την αλληλεπίδρασή του με τα σωματίδια που βρίσκεται σε επαφή. Το χρονικό βήμα θα πρέπει να είναι τόσο μικρό, ώστε να δύναται να θεωρηθεί ότι οποιαδήποτε διαταραχή στο αριθμητικό μοντέλο δε μπορεί να διαδοθεί πέραν από την άμεση γειτονία της κατά της διάρκειά του. Έτσι, στο τέλος προκύπτουν οι τάσεις που ασκούνται στα σημεία του εσωτερικού του ογκοτεμαχίου.

Τρία ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθιστούν τη μέθοδο διακριτών στοιχείων κατάλληλη για μοντελοποίηση ασυνεχών πετρωμάτων (Hoek et al., 1991, Rosengren et al., 1993):

- Προσομοιώνει το ρωγματομένο πέτρωμα ως μια συγκέντρωση στοιχείων (rock blocks) που το ένα επιδρά στο άλλο δια μέσου των γωνιών και των πλευρών επαφής.
- Οι ασυνέχειες θεωρούνται ως συνωριακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων.
- Χρησιμοποιεί έναν σαφή αλγόριθμο που επιτρέπει μεγάλες μετατοπίσεις και περιστροφές μέχρι την αστοχία, αν η εκσκαφή είναι ασταθής και γενικώς όταν υφίσταται μη γραμμική καταστατική συμπεριφορά των συνεχειών.

### 2.7.2.1 Το λογισμικό UDEC

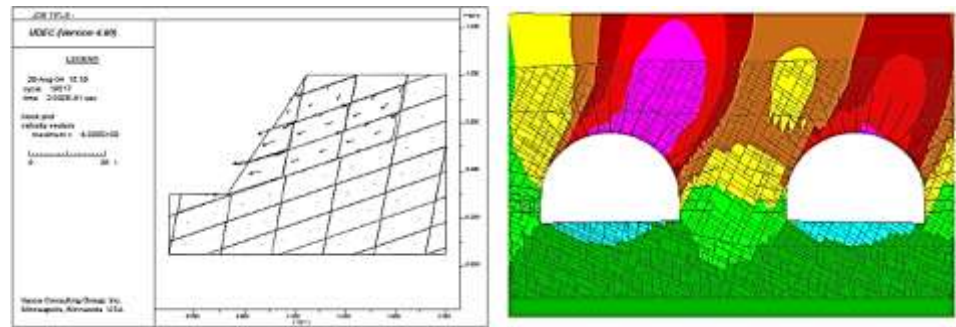
Το πιο αντιπροσωπευτικό εμπορικό λογισμικό της μεθόδου διακριτών στοιχείων είναι το UDEC (Universal Distinct Element Code) της εταιρείας Itasca. Πρόκειται για ένα δισδιάστατο λογισμικό διακριτών στοιχείων που προσομοιώνει την απόκριση ασυνεχών μέσων που υπόκεινται σε στατικές ή δυναμικές φορτίσεις.

Αυτό που κάνει το UDEC να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα λογισμικά αριθμητικής ανάλυσης είναι το γεγονός ότι στο UDEC το υλικό παρουσιάζεται ως ένα σύνολο διακριτών μπλοκ με οριακές συνθήκες τις ασυνέχειες και που μπορούν να κινηθούν, να περιστραφούν και να παραμορφωθούν χωρίς περιορισμούς. Τα παραμορφώσιμα αυτά μπλοκ διακριτοποιούνται εσωτερικά και μπορούν να χωριστούν σε ζώνες διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας (πχ. Mohr-Coulomb, Cam – Clay κτλ.). Το λογισμικό μπορεί να μοντελοποιήσει όλες τις περίπλοκες, μη – γραμμικές συμπεριφορές.

Το UDEC χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα της μηχανικής και των επιστημονικών αναλύσεων που περιλαμβάνει:

- Ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρηνών με ασυνέχειες
- Βαθείες υπόγειες εκσκαφές
- Αποτελέσματα ανατινάξεων
- Υπόγειες κατασκευές
- Υποστήριξη/Ενίσχυση εδάφους
- Μελέτη ακεραιότητας εγκαταστάσεων αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων
- Μελέτη ακεραιότητας βραχωδών κοιλοτήτων αποθήκευσης φυσικού αερίου

- Σεισμική μηχανική
- Σταθερότητα κατασκευών τοιχοποιίας
- Κατασκευές φραγμάτων
- Ροή ρευστών σε ασυνεχή βράχο



**Εικόνα 2.9 : Ανάλυση κατασκευής με χρήση του λογισμικού UDEC της ITASCA**

## 3ο Κεφάλαιο : Ανάλυση συμπεριφοράς βραχωδών πρανών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

### 3.1 Γενικά

Η ανάλυση ευστάθειας βραχωδών πρανών καθορίζει κάτω από ποιες συνθήκες ένα διερευνώμενο φυσικό ή τεχνητό πρανές θα μείνει σταθερό.

Η ανάπτυξη τεχνικών για την προσομοίωση των ασυνεχειών στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Phase2 καθώς και η ανάπτυξη της τεχνικής μείωσης της διατμητικής αντοχής (Shear Strength Reduction Method – SSR) κατέστησαν εφικτό τον υπολογισμό συντελεστών ασφαλείας και για βραχώδη πρανή με ασυνέχειες (Hammam et al., 2009).

Η **γενική συνθήκη ισορροπίας** που ισχύει σε όλες τις επιλύσεις ευστάθειας είναι ότι οι δυνάμεις ή οι ροπές συγκράτησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές της ολίσθησης. Ως εκ τούτου, ο **συντελεστής ασφαλείας** FS (Factor of Safety) καθορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση του πρανούς και οφείλονται στη διατμητική αντοχή προς τις αντίστοιχες δυνάμεις που συμβάλλουν στην αστάθειά του.

$$FS = \frac{\text{Δυνάμεις Ολίσθησης}}{\text{Δυνάμεις Αντίστασης}}$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με τη μονάδα το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας και παρουσιάζει αστοχία όταν γίνει μικρότερος της μονάδας. Όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας πάνω από τη μονάδα, τόσο αυξάνεται η ευστάθεια του πρανούς (Ρόζος, 2007).

Δεδομένου ότι ο συντελεστής ασφαλείας FS ορίζεται ως ένας παράγοντας μείωσης της διατμητικής δύναμης ένας προφανής τρόπος υπολογισμού του με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι να μειωθεί η διατμητική αντοχή έως ότου εμφανιστεί η κατάρρευση. Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι ο λόγος της πραγματικής διατμητικής δύναμης προς τη μειωμένη διατμητική δύναμη κατά την αστοχία.

$$FS = \frac{\text{Πραγματική Διατμητική Δύναμη}}{\text{Μειωμένη Διατμητική Δύναμη κατά την αστοχία}}$$

Η παραπάνω **τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής (Shear Strength Reduction Method – SSR)** χρησιμοποιείται από το 1975 από τον Zienkiewicz και εφαρμόστηκε στη συνέχεια και από άλλους όπως ο Naylor (1982), οι Donald & Giam (1988), οι Matsui & San (1992) κ.α. και χρησιμοποιείται με αυξανόμενο ρυθμό στη μηχανική πρακτική. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημά της είναι ότι η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας εντοπίζεται αυτόματα.

Παρά το γεγονός ότι η **ανάλυση FEM – SSR** είναι μια εναλλακτική λύση στις συμβατικές μεθόδους οριακής ισορροπίας, η ικανότητά της να συνδυάζει άμεσα την ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών με την αστοχία άρρηκτου υλικού προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην προσομοίωση προβλημάτων ευστάθειας τέτοιου τύπου. Η μέθοδος μπορεί να προσομοιώσει ευρύ φάσμα συμπεριφορών των πρανών από σφηνοειδή ολίσθηση έως ανατροπή και περιστροφικές αστοχίες χωρίς περιορισμούς σχετικά με το είδος, το σχήμα και τη θέση και μπορεί εύκολα να χειριστεί περιπτώσεις στις οποίες ασυνέχειες σταματούν στο άρρηκτο υλικό χωρίς να κατ' ανάγκη να διασταυρώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας διακριτά μπλοκ (Hammam et al., 2009).

## 3.2 Επιρροή του μεγέθους του έργου και του δικτύου ασυνεχειών στην ευστάθεια βραχωδών πρανών και στο μηχανισμό αστοχίας

Η ικανότητα της μεθόδου FEM – SSR εξετάστηκε από τους *R.E. Hammam, T. Yacoub* και *J.H. Curran* (2009) σε τρία απλά παραδείγματα τεμαχισμένων βραχωδών πρανών. Στα παραδείγματα εξετάζεται, επίσης, η επιρροή του μεγέθους του έργου (μέγεθος εκσκαφής) και της μορφής του δικτύου των ασυνεχειών στο συντελεστή ασφαλείας και στο μηχανισμό αστοχίας του πρανούς.

Και στα τρία παραδείγματα θεωρήθηκε **πρανές κλίσης 1:3**, ενώ κάθε παράδειγμα είχε **διαφορετικό δίκτυο κατανομής των ασυνεχειών**.

Σε γενικές γραμμές στις μικρές κλίμακες οι ασυνέχειες ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στη συμπεριφορά από ότι οι ιδιότητες του άρρηκτου βράχου. Έτσι, στα μικρού ύψους πρανή οι συνήθεις μηχανισμοί αστοχίας ελέγχονται από τις ασυνέχειες (πχ. επίπεδες σφήνες). Όσο αυξάνεται η κλίμακα του έργου εμφανίζονται πιο σύνθετοι μηχανισμοί, όπως βαθμιδωτές αστοχίες και περιστροφικές διατμητικές αστοχίες, και που μπορούν να ακολουθήσουν καμπύλες διαδρομές όπως εκείνες που προκύπτουν στους εδαφικούς σχηματισμούς. Επίσης, μπορούν να συμβούν ανατροπές και φαινόμενα λυγισμού. Στις κλίμακες αυτές είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθούν προβλέψεις σχετικά με την ευστάθεια των βραχωδών πρανών και των αναμενόμενων τρόπων αστοχίας. Αυτό συμβαίνει διότι η ευστάθεια δεν ελέγχεται μόνο από τις ασυνέχειες, τις ιδιότητες τους και την κατανομή τους στο χώρο, αλλά και από τις ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος, την κατανομή των τάσεων και τις υδρογεωλογικές συνθήκες.

Λαμβάνοντας υπόψη και τον ανωτέρω παράγοντα, εξετάστηκαν **έξι διαφορετικά ύψη πρανών: 10.0m, 20.0m, 30.0m, 60.0m, 90.0m και 120.0m**.

Οι **ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας** των ασυνεχειών και του άρρηκτου πετρώματος δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Υλικό	Ιδιότητες
Άρρηκτος βράχος	Ειδικό βάρος = 0.027 MN/m <sup>3</sup>
	Μέτρο ελαστικότητας = 20.000 MPa
	Λόγος Poisson = 0.30
	Εφελκυστική αντοχή = 0 MPa
	Συνοχή = 1.0 MPa
	Γωνία τριβής = 30°
Ασυνέχειες	Γωνία διαστολικότητας = 0°
	Κλίση 1 <sup>ου</sup> συνόλου : 0°
	Κλίση 2 <sup>ου</sup> συνόλου : 45°
	Αποστάσεις = 3.0 m
	Ορθή ακαμψία = 100.000 MPa/m
	Διατμητική ακαμψία = 10.000 MPa/m
	Εφελκυστική αντοχή = 0 MPa
	Συνοχή = 0.50 MPa
Γωνία τριβής = 20°	

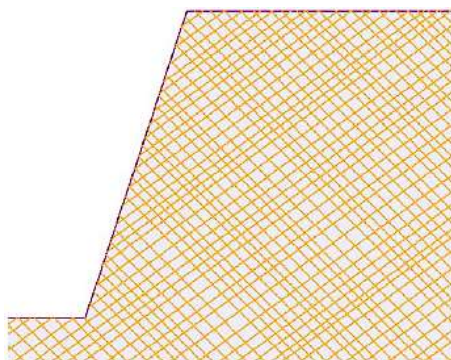
**Πίνακας 3.1 : Συνοπτικός πίνακας των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας**

Όσον αφορά τα άκρα των ασυνεχειών, στα παραδείγματα εξεταστήκαν δύο συνθήκες:

1. τα άκρα των ασυνεχειών θεωρούνται “ανοικτά” που σημαίνει ότι οι δύο επιφάνειες σε επαφή μπορούν να κινηθούν ελεύθερα η μία σε σχέση με την άλλη
2. τα άκρα των ασυνεχειών θεωρούνται “κλειστά” γεγονός που απαγορεύει τη σχετική μετακίνηση

Οι συντελεστές ασφαλείας προσδιορίστηκαν με **ανοχή 0.05**, βαθμός ακρίβειας που θέτει μια καλή ισορροπία μεταξύ γρήγορου υπολογισμού και ακριβούς συντελεστού ασφαλείας, και σημειώθηκε ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας κάθε περίπτωσης.

### Παράδειγμα I



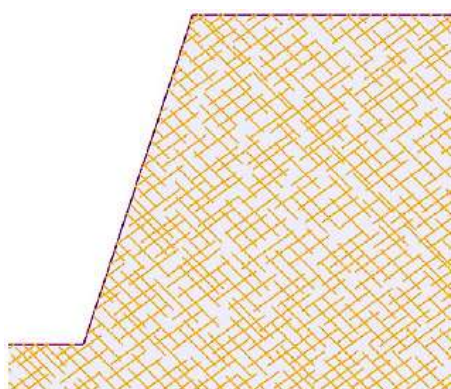
Βραχώμαζα με δύο συστήματα ασυνεχειών απείρου μήκους, παράλληλα μεταξύ τους.

1<sup>ο</sup> σύνολο με κλίση: 36° , 2<sup>ο</sup> σύνολο με κλίση: -45°

Αποστάσεις μέσης τιμής 2.50m ± 0.50m

**Σχήμα 3.1 :** Γεωμετρία ασυνεχειών στο Παράδειγμα I

### Παράδειγμα II



Βραχώμαζα με δύο συστήματα ασυνεχειών πεπερασμένου μήκους, παράλληλα μεταξύ τους.

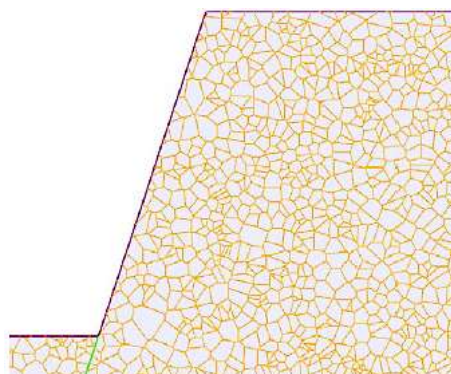
1<sup>ο</sup> σύνολο με κλίση: 36° , 2<sup>ο</sup> σύνολο με κλίση: -45°

Αποστάσεις μέσης τιμής: 2.50m ± 0.50m

Μήκη μέσης τιμής: 10.0m ± 1.0m

**Σχήμα 3.2 :** Γεωμετρία ασυνεχειών στο Παράδειγμα II

### Παράδειγμα III



Βραχώμαζα με ασυνέχειες πολυγωνικής κατανομής Voronoi.

Πυκνότητα: 0.20m<sup>2</sup>

(αριθμός πολυγώνων ανά μονάδα επιφανείας)

**Σχήμα 3.3 :** Γεωμετρία ασυνεχειών στο Παράδειγμα III

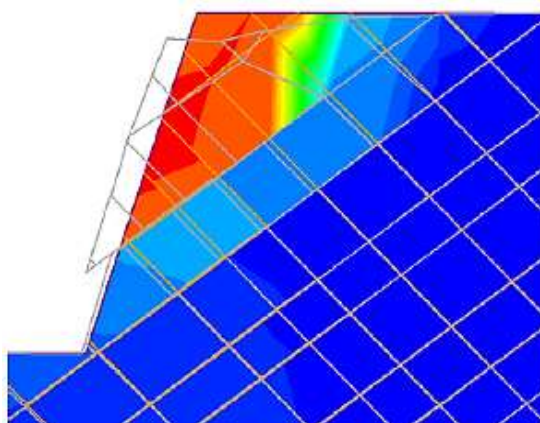
Στον επόμενο πίνακα σημειώνονται οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν για όλες τις περιπτώσεις και στη συνέχεια ενδεικτικές εικόνες των αποτελεσμάτων των αναλύσεων:

Ύψος πρανούς	Παράδειγμα I		Παράδειγμα II		Παράδειγμα III	
	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα
10.0 m	2.80	4.40	5.60	9.35	6.85	15.55
20.0 m	1.30	1.75	2.40	3.10	4.60	5.45
30.0 m	1.05	1.30	1.35	1.85	2.40	2.90
60.0 m	0.70	0.75	0.90	1.05	1.50	1.60
90.0 m	0.60	0.60	0.80	0.85	1.15	1.20
120.0 m	0.55	0.55	0.70	0.65	1.15	1.20

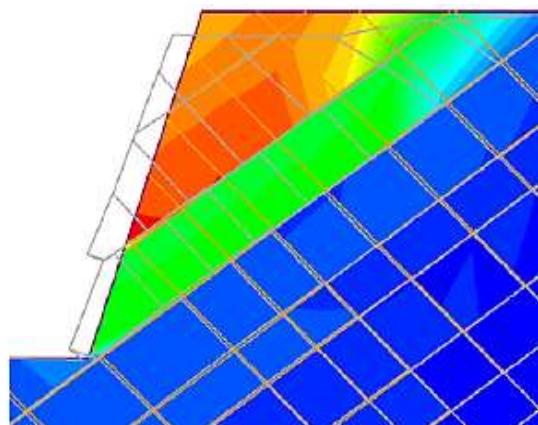
**Πίνακας 3.2 :** Συνοπτικός πίνακας συντελεστών ασφαλείας των πρανών για τις διάφορες περιπτώσεις (Hammam ,et al., 2009)



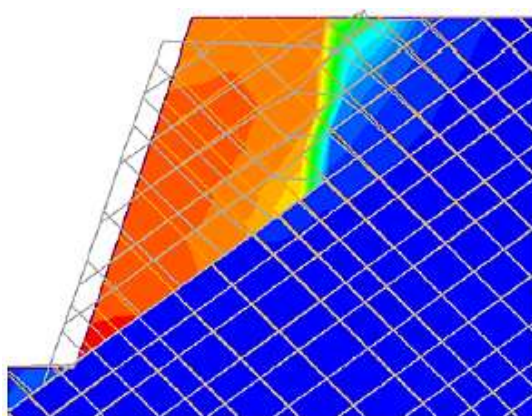
## Παράδειγμα Ι



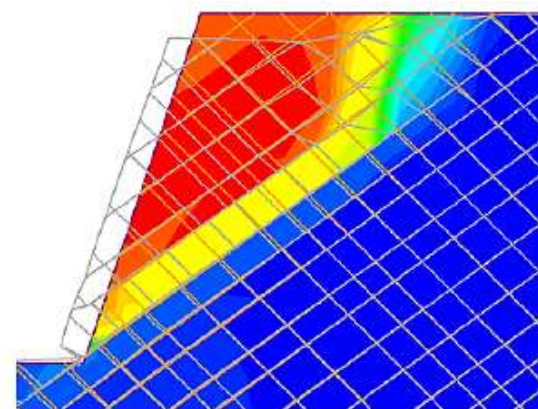
Εικόνα 3.1 : Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς ύψους 10.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



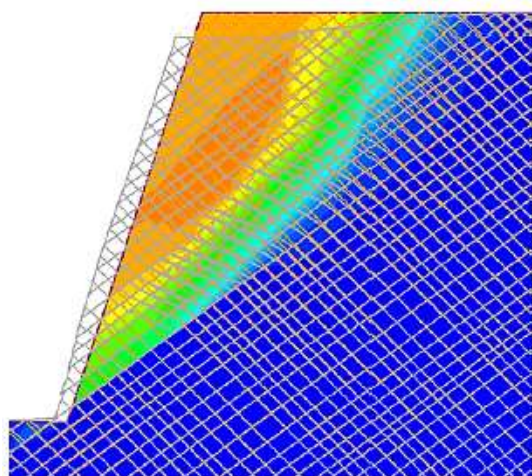
Εικόνα 3.2 : Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς ύψους 10.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



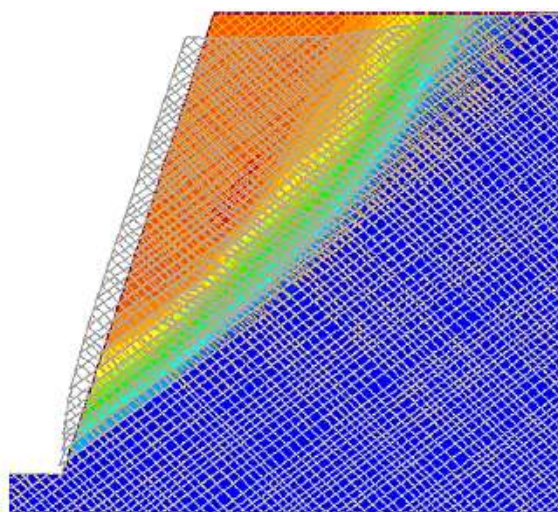
Εικόνα 3.3 : Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς ύψους 20.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



Εικόνα 3.4 : Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς ύψους 20.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)

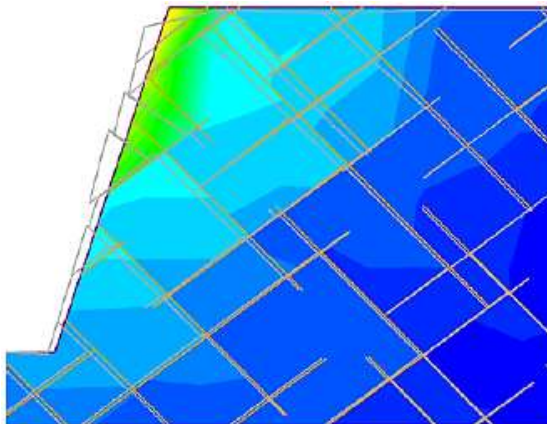


Εικόνα 3.5 : Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς ύψους 60.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)

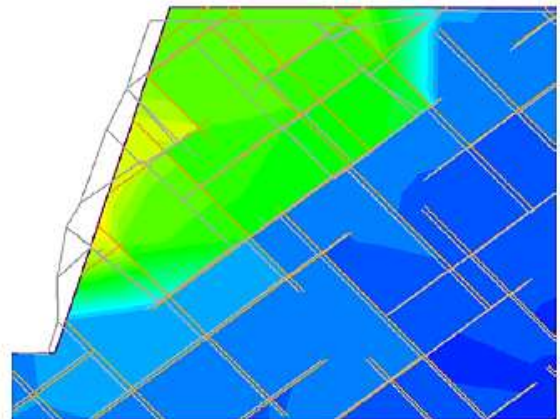


Εικόνα 3.6 : Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς ύψους 90.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)

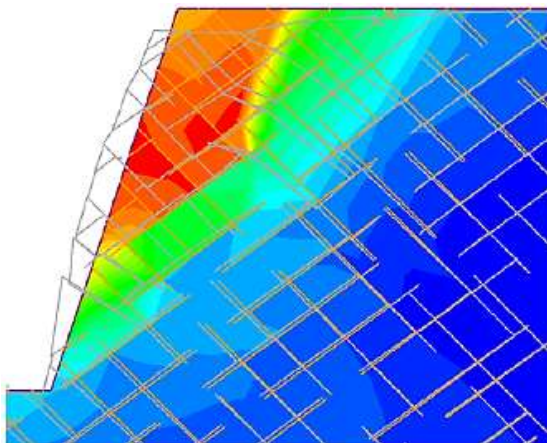
## Παράδειγμα II



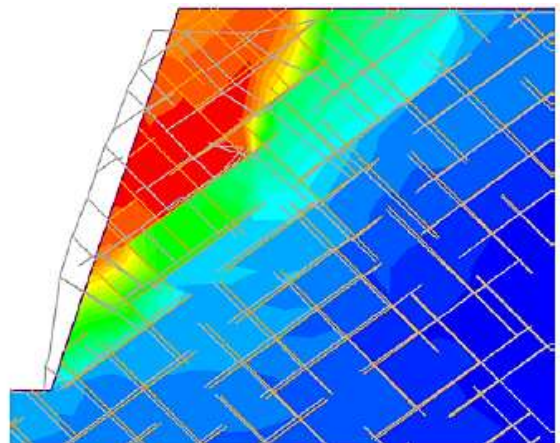
Εικόνα 3.7 : Μηχανισμός αστοχίας πρσανούς ύψους 10.0m με "ανοικτά" άκρα ασυνεχειών (Hammam et al., 2009)



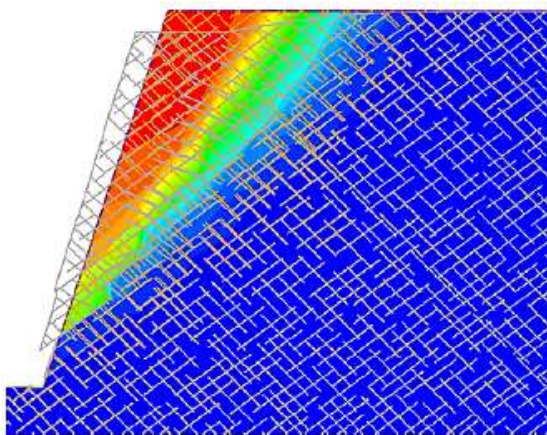
Εικόνα 3.8 : Μηχανισμός αστοχίας πρσανούς ύψους 10.0m με "κλειστά" άκρα ασυνεχειών (Hammam et al., 2009)



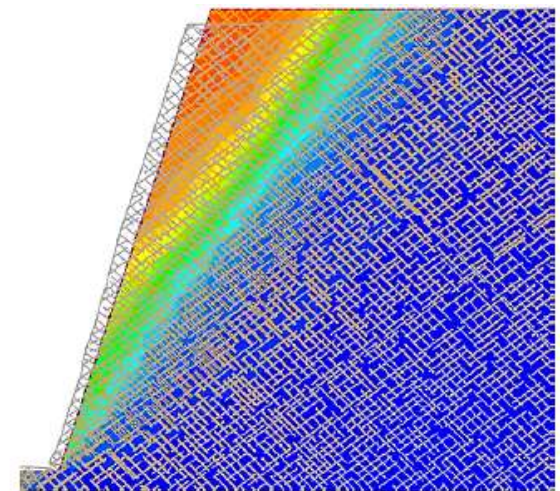
Εικόνα 3.9 : Μηχανισμός αστοχίας πρσανούς ύψους 20.0m με "ανοικτά" άκρα ασυνεχειών (Hammam et al., 2009)



Εικόνα 3.10 : Μηχανισμός αστοχίας πρσανούς ύψους 20.0m με "κλειστά" άκρα ασυνεχειών (Hammam et al., 2009)

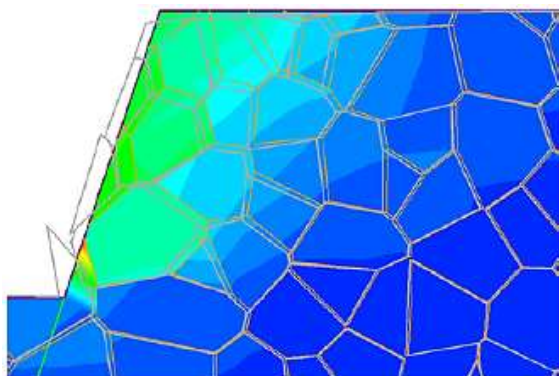


Εικόνα 3.11 : Μηχανισμός αστοχίας πρσανούς ύψους 60.0m με "ανοικτά" άκρα ασυνεχειών (Hammam et al., 2009)

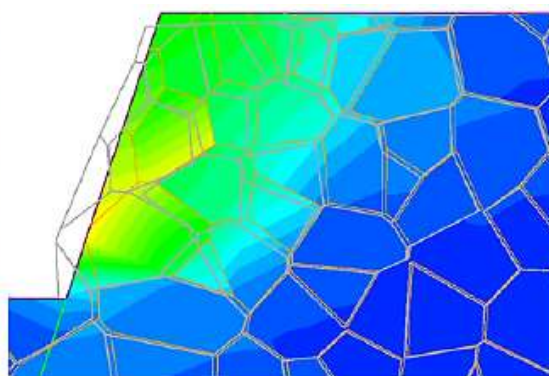


Εικόνα 3.12 : Μηχανισμός αστοχίας πρσανούς ύψους 120.0m με "ανοικτά" άκρα ασυνεχειών (Hammam et al., 2009)

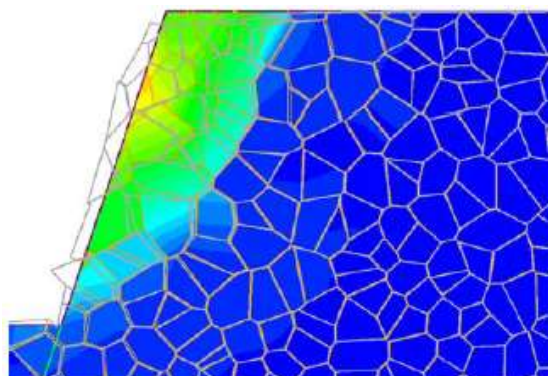
### **Παράδειγμα III**



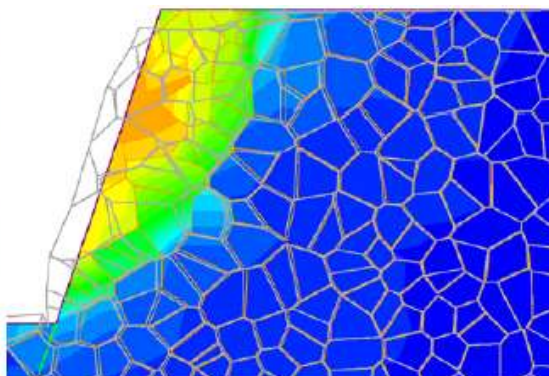
**Εικόνα 3.13 :** Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



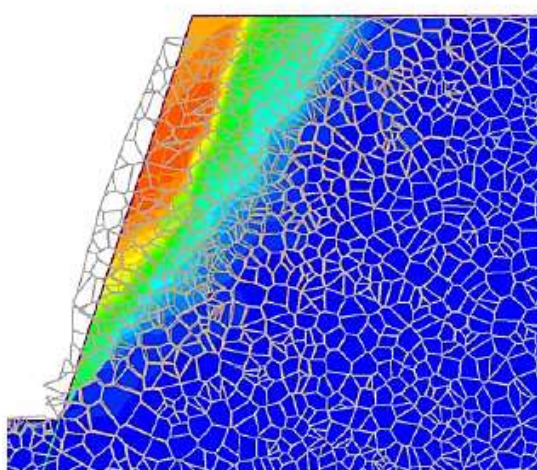
**Εικόνα 3.14 :** Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 10.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



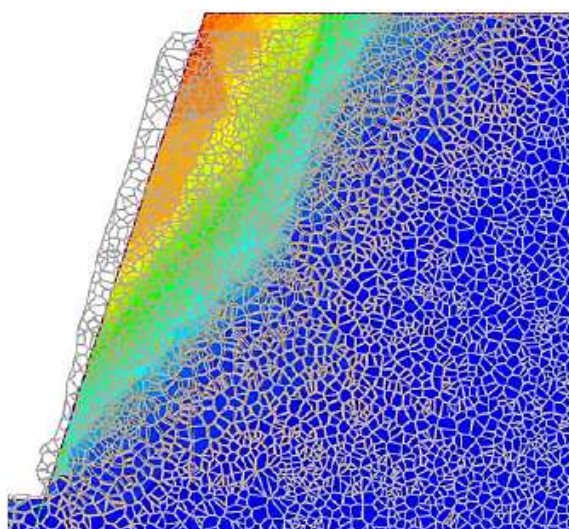
**Εικόνα 3.15 :** Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



**Εικόνα 3.16 :** Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 20.0m με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



**Εικόνα 3.17 :** Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 60.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)



**Εικόνα 3.18 :** Μηχανισμός αστοχίας πρανούς ύψους 120.0m με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. (Hammam et al., 2009)

Από τις τιμές των συντελεστών ασφαλείας που δίνονται στον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι η συνδυαστική μέθοδος FEM – SSR “συλλαμβάνει” τις επιδράσεις της κλίμακας του έργου σε συνδυασμό με την παρουσία των συστημάτων ασυνεχειών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε μικρού ύψους πρηνή οι συντελεστές ασφαλείας διέφεραν μεταξύ των δύο περιπτώσεων “ανοικτών” και “κλειστών” άκρων των ασυνεχειών, ενώ σε μεγάλα ύψη πρηνών (από 90.0m και άνω) ο παράγοντας αυτός δεν έχει σημασία καθώς οι διαφορές εξαλείφονται και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας σχεδόν συμπίπτουν. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων υποστήριξης όπως αγκυρώσεις, κοχλιώσεις και πλέγματα σε πρηνή μικρού και μεσαίου μεγέθους που ουσιαστικά αναγκάζουν τα εκτεθειμένα άκρα των ασυνεχειών να κινηθούν μαζί ως ένα σώμα, όπως, επίσης, την αναποτελεσματικότητα μιας τέτοιας υποστήριξης σε πρηνή μεγάλου ύψους υποδεικνύοντας την ανάγκη εξέτασης άλλων μεθόδων σταθεροποίησής τους.

Σαφής διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ “ανοικτών” και “κλειστών” άκρων των ασυνεχειών φαίνεται στο Παράδειγμα I για πρηνές ύψους 10.0m. Η αστοχία και στις δύο περιπτώσεις συνέβη λόγω ολισθήσεων τεμαχίων με τη διαφορά, όμως, ότι στην περίπτωση των “κλειστών” άκρων στην ολίσθηση εμπλέκεται μεγαλύτερος αριθμός τεμαχίων.

Στο Παράδειγμα I, σε ένα ύψος πρηνούς 20.0m υπάρχει αστοχία κατά μήκος ασυνέχειας κοντά στον πόδα του πρηνούς, αλλά αυτή εμπλέκει και περισσότερη κίνηση κατά μήκος του άρρηκτου υλικού στα ανώτερα τμήματα. Σε μεγαλύτερα ύψη (60.0m και πάνω) η αστοχία αποκτά χαρακτηριστικά περιστροφικού τύπου διατηρώντας, όμως, την τάση για ολίσθηση κατά μήκος ασυνέχειας κοντά στον πόδα.

Στο Παράδειγμα II, λόγω της μικρότερης εμμονής των ασυνεχειών, δε σχηματίζονται τόσο διακριτά μπλοκ και οι μηχανισμοί αστοχίας που προκύπτουν είναι πιο σύνθετοι από τους αντίστοιχους στο Παράδειγμα I. Ο μηχανισμός αστοχίας για πρηνές ύψους 60.0m περιλαμβάνει μια σειρά από τοπικές σταδιακές αστοχίες με ελαφρώς καμπύλο σχήμα, ενώ για πρηνές ύψους 120.0m η αστοχία γίνεται βήμα-βήμα σε τοπική κλίμακα στην περίπτωση των ασυνεχειών με “ανοικτά” άκρα και με περισσότερο καμπύλη μορφή στα “κλειστά” άκρα.

Στο Παράδειγμα III, οι μηχανισμοί αστοχίας έχουν στο σύνολό τους καμπύλη μορφή. Αυτό υποδεικνύει ότι όταν δεν υπάρχει κάποιο κυρίαρχο επίπεδο αδυναμίας οι μηχανισμοί αστοχίας των βραχωδών πρηνών έχουν παρόμοια μορφή με αυτούς που συναντώνται στα εδαφικά πρηνή.

### 3.3 Επιρροή των επιπέδων αδυναμίας στην ευστάθεια βραχωδών πρηνών

Στην ενότητα αυτή διερευνάται η επιρροή ενός επιπέδου αδυναμίας όπως ασυνέχειες, επίπεδα στρώσεων κτλ. στη συμπεριφορά του γεωυλικού και κατ' επέκταση στην ευστάθεια ενός βραχωδούς πρηνούς. Για το σκοπό αυτό οι Azami A., Yacoub T. και Curran J. (2012) πραγματοποίησαν δύο αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (συνδυαστική μέθοδος FEM – SSR) ως εξής:

- Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση εξετάστηκαν οι επιπτώσεις του προσανατολισμού των ασυνεχειών στο συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας. Θεωρήθηκαν γωνίες από 0° έως 180°. Για καλύτερη κατανόηση θεωρήθηκε και ένα επιπλέον μοντέλο χωρίς ασυνέχειες (ισότροπο μέσο).
- Στη 2<sup>η</sup> περίπτωση οι ασυνέχειες θεωρήθηκαν οριζόντιες και η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών κυμαινόταν από 10% έως 100% της διατμητικής αντοχής του άρρηκτου υλικού.

Και στις δύο περιπτώσεις το κενό που δημιουργείται από τις ασυνέχειες είναι μικρό, αλλά ικανό ώστε το υλικό να θεωρείται ανισότροπο. Επιπλέον, για τα επίπεδα αδυναμίας θεωρήθηκαν δύο ακόμη περιπτώσεις:

- α. προσομοίωση με χρήση πυκνού δικτύου ασυνεχειών
- β. προσομοίωση με ενσωματωμένα επίπεδα αδυναμίας στο υλικό (ανισότροπο υλικό)

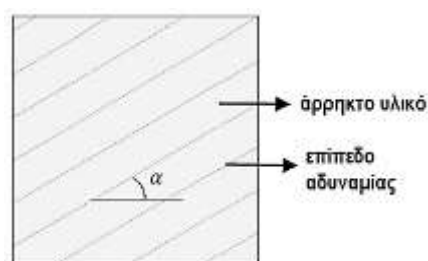
Η αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με **τριγωνική διακριτοποίηση με έξι κόμβους**. Θεωρήθηκε το κριτήριο αστοχίας **Mohr – Coulomb**.

Οι ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας των ασυνεχειών και του άρρηκτου πετρώματος δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Υλικό	Ιδιότητες
Άρρηκτος βράχος	Ειδικό βάρος = 0.020 MN/m <sup>3</sup> Μέτρο ελαστικότητας = 20.0 MPa Λόγος Poisson = 0.30 Συνοχή = 1.0 MPa Γωνία τριβής = 37°
Ασυνέχειες	Ορθή ακαμψία = 100.0 MPa Διατμητική ακαμψία = 10.0 MPa Συνοχή = 0.44 MPa Γωνία τριβής = 20°

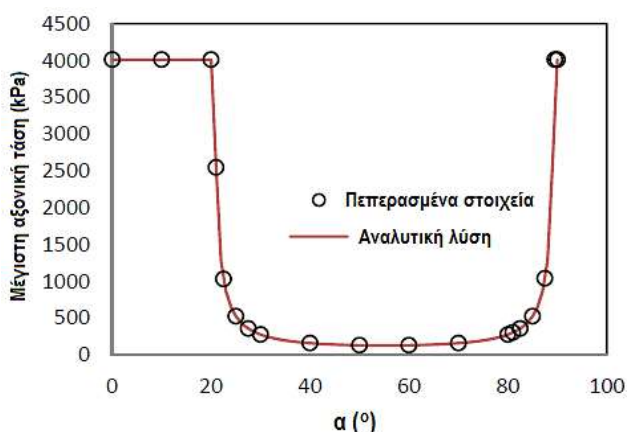
**Πίνακας 3.3 :** Συνοπτικός πίνακας των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας

Σε αρχικό στάδιο, για να επεξηγηθούν οι επιδράσεις που προκαλούνται από την ανισοτροπία των επιπέδων αδυναμίας πραγματοποιήθηκε, επιπλέον, σειρά από μονοαξονικές δοκιμές σε δοκίμια.



**Σχήμα 3.4 :** Τυπικός όγκος ελέγχου υλικού με ένα επίπεδο αδυναμίας γωνίας κλίσης  $\alpha$

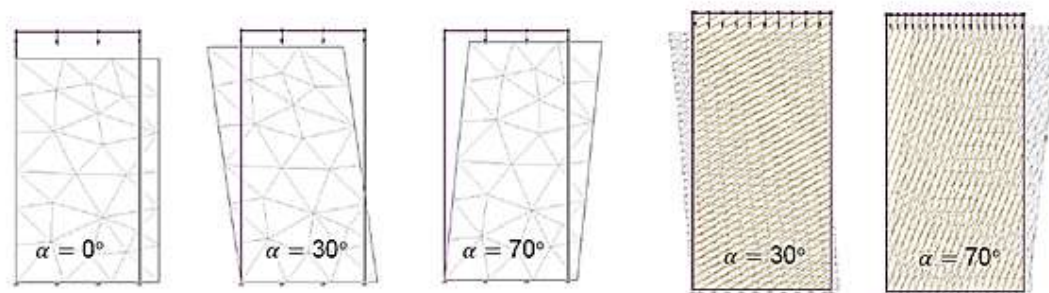
Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων επαληθεύουν τη θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα.



**Σχήμα 3.5 :** Μεταβολή της μέγιστης αξονικής τάσης του υλικού συναρτήσει της κλίσης του επιπέδου αδυναμίας (Azami et al., 2012)

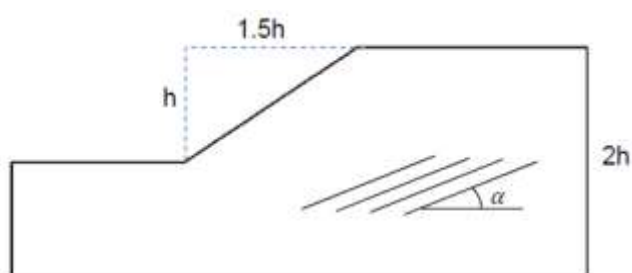
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι μορφές παραμόρφωσης για διάφορες γωνίες κλίσης των ασυνεχειών ( $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$  και  $\alpha=70^\circ$ ). Για κλίση  $\alpha=0^\circ$  το δοκίμιο αστοχεί λόγω αστοχίας του άρρηκτου υλικού. Στις άλλες δύο περιπτώσεις η αστοχία συντελείται κατά μήκος του επιπέδου αδυναμίας.

Ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι στο δοκίμιο με  $\alpha=30^\circ$  η κατεύθυνση της παραμόρφωσης είναι σύμφωνη με την κατεύθυνση της παραμόρφωσης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν  $\alpha=70^\circ$ . Παρόμοιες συμπεριφορές προκύπτουν και στην περίπτωση που υπάρχουν διακριτά επίπεδα ασυνεχειών.



Σχήμα 3.6 : Αρχικά και παραμορφωμένα δοκίμια για διάφορες γωνίες κλίσης  $\alpha$ . (Azami et al., 2012)

Στην ανάλυση ευστάθειας βραχώδους πρηνούς με τη συνδυαστική μέθοδο FEM – SSR χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω σχεδιαστικό μοντέλο:

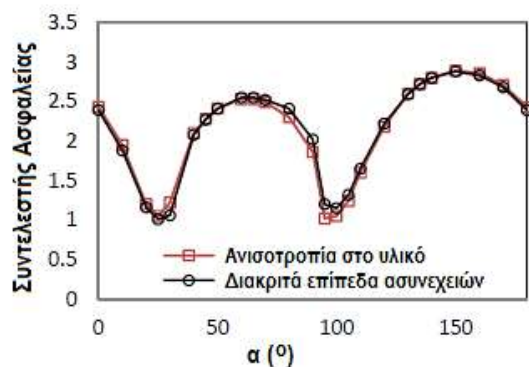


Σχήμα 3.7 : Γεωμετρικά στοιχεία του υπό ανάλυση βραχώδους πρηνούς

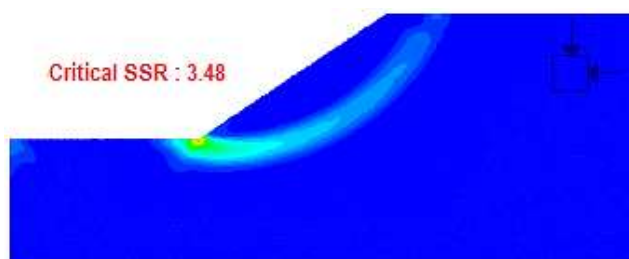
Στον επόμενο πίνακα σημειώνονται οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν στην 1<sup>η</sup> περίπτωση και στη συνέχεια ενδεικτικές εικόνες των αποτελεσμάτων των αναλύσεων:

Γωνία κλίσης $\alpha$ (°)	Διακριτά επίπεδα ασυνεχειών	Ανισοτροπία στο υλικό
-	3.48	3.48
0	2.39	2.43
10	1.88	1.95
20	1.16	1.20
25	1.01	1.05
30	1.06	1.22
40	2.08	2.10
45	2.27	2.28
50	2.41	2.41
60	2.55	2.53
65	2.55	2.53
70	2.52	2.49
80	2.41	2.30
90	2.02	1.86
100	1.15	1.05
110	1.65	1.60
120	2.22	2.18
130	2.59	2.60
135	2.72	2.72
140	2.80	2.80
150	2.88	2.89
160	2.83	2.86
170	2.68	2.71

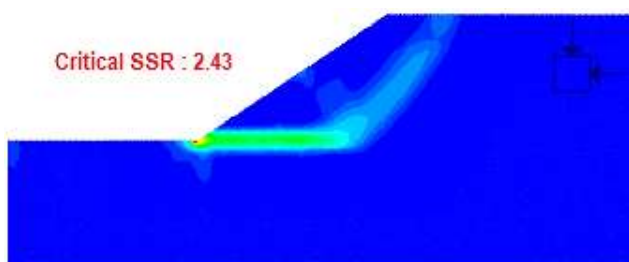
Πίνακας 3.4 : Συνοπτικός πίνακας συντελεστών ασφαλείας των πρηνών για τις διάφορες περιπτώσεις. (Azami et al., 2012)



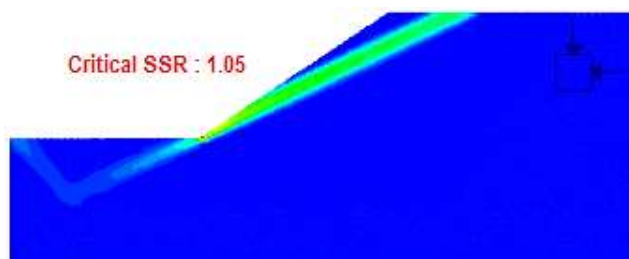
Σχήμα 3.8 : Μεταβολές του συντελεστή ασφαλείας ως προς τη γωνία κλίσης των επιπέδων αδυναμίας. (Azami et al., 2012)



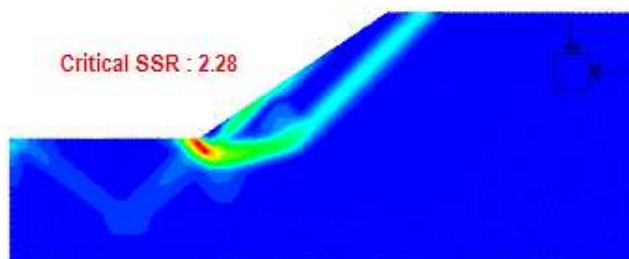
Εικόνα 3.19 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από άρρηκτο υλικό χωρίς επίπεδα αδυναμίας. (Azami et al., 2012)



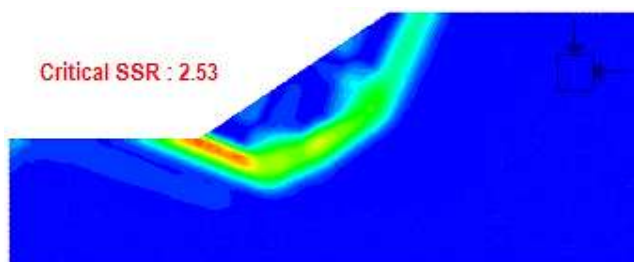
Εικόνα 3.20 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=0^\circ$ . (Azami et al., 2012)



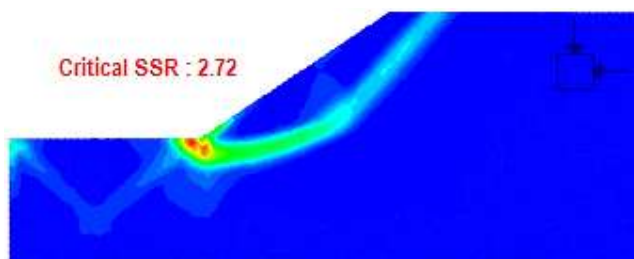
Εικόνα 3.21 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=25^\circ$ . (Azami et al., 2012)



Εικόνα 3.22 : Μηχανισμός αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=45^\circ$ . (Azami et al., 2012)



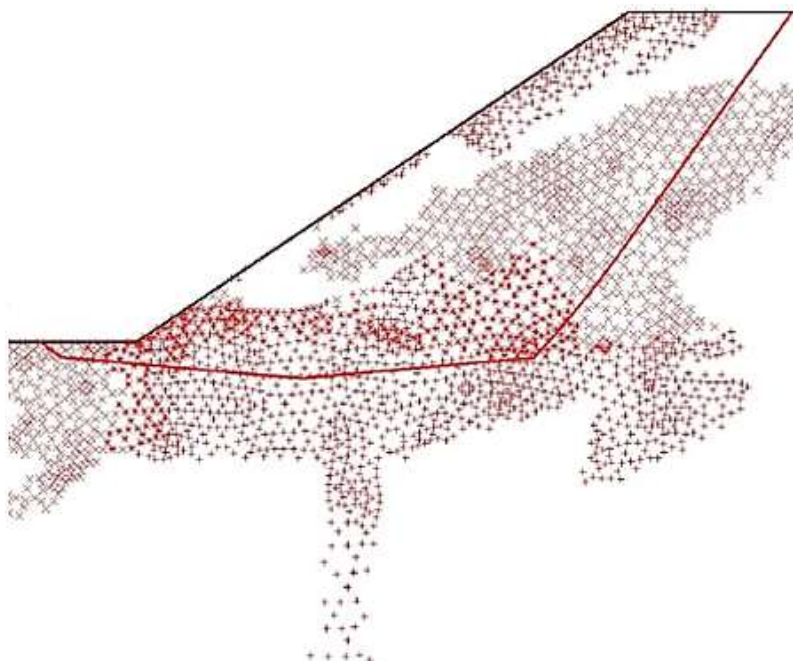
**Εικόνα 3.23 :** Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=65^\circ$ . (Azami et al., 2012)



**Εικόνα 3.24 :** Μηχανισμός αστοχίας πρηνούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=135^\circ$ . (Azami et al., 2012)

Η υψηλές τιμές της παραμόρφωσης στις εικόνες των πρηνών υποδεικνύουν την περιοχή της επιφάνειας ολίσθησης. Η μορφή της επιφάνειας ολίσθησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Όταν δεν υπάρχουν επίπεδα αδυναμίας η επιφάνεια είναι κυκλική, ενώ για γωνίες  $0^\circ$  και  $25^\circ$  η μη-κυκλική επιφάνεια αστοχίας είναι περισσότερο εμφανής.

Για καλύτερη κατανόηση των μορφών αστοχίας παρουσιάζονται, επιπλέον, τα δύο παρακάτω σχήματα:



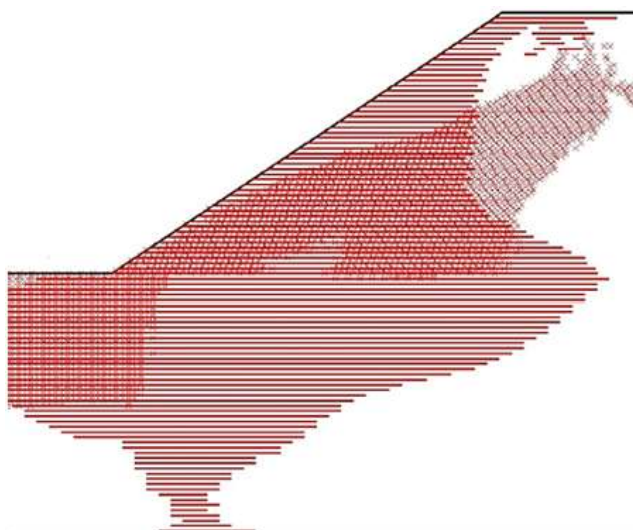
**Σχήμα 3.9 :** Προβλεπόμενη μορφή αστοχίας πρηνούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=0^\circ$ . (Azami et al., 2012)

Στο Σχήμα 3.9 το σύμβολο “x” παριστάνει αστοχία του άρρηκτου υλικού, ενώ το σύμβολο “+” αστοχία κατά μήκος των επιπέδων αδυναμίας. Είναι ξεκάθαρη η συγκέντρωση του συμβόλου “+” στον πόδα του πρηνούς όπου είχε προβλεφθεί σύμφωνα με την Εικόνα 3.20 οριζόντια επιφάνεια αστοχίας και υποδεικνύεται ότι στην περιοχή αυτή η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι η αστοχία κατά μήκος των επιπέδων αδυναμίας. Όσο η



επιφάνεια αστοχίας τείνει να σχηματίζεται προς το πάνω μέρος του πρανούς υπάρχουν και ενδείξεις “x” για αστοχία του άρρηκτου υλικού. Σε κάποια σημεία, ωστόσο, υπάρχουν και τα δύο σύμβολα και συντελούνται και οι δύο μορφές αστοχίας.

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το Σχήμα 3.10 στο οποίο η αστοχία κατά μήκος των επιπέδων δυναμίας συμβολίζεται με οριζόντιες κόκκινες γραμμές και η αστοχία του άρρηκτου υλικού με το σύμβολο “x”.

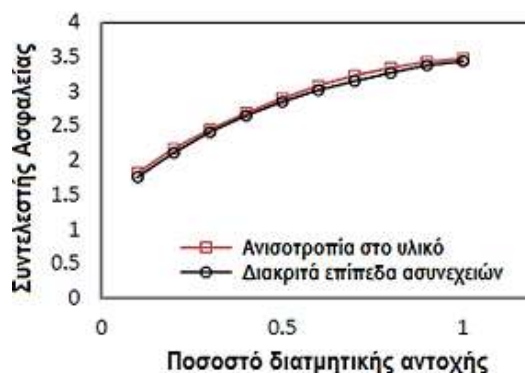


Σχήμα 3.10 : Προβλεπόμενη μορφή αστοχίας πρανούς από ανισότροπο υλικό κλίσης  $\alpha=0^\circ$ . (Azami et al., 2012)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συντελεστών ασφαλείας που υπολογίστηκαν στη 2<sup>η</sup> περίπτωση ανάλυσης με οριζόντιες ασυνέχειες και κυμαινόμενη τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών:

Ποσοστό αντοχής	Διακριτά επίπεδα ασυνεχειών	Ανισοτροπία στο υλικό
1.0	3.44	3.48
0.90	3.38	3.43
0.80	3.27	3.34
0.70	3.15	3.23
0.60	3.02	3.08
0.50	2.85	2.90
0.40	2.65	2.69
0.30	2.41	2.45
0.20	2.11	2.17
0.10	1.76	1.82

Πίνακας 3.5 : Συνοπτικός πίνακας συντελεστών ασφαλείας του πρανούς για  $\alpha=0^\circ$  ως προς το ποσοστό διατμητικής αντοχής. (Azami et al., 2012)



Σχήμα 3.11 : Μεταβολές του συντελεστή ασφαλείας ως προς το ποσοστό διατμητικής αντοχής (Azami et al., 2012)

Οι τιμές που προκύπτουν για τους συντελεστές ασφαλείας στην περίπτωση των των διακριτών επιπέδων ασυνεχειών είναι στο σύνολό τους μικρότερες από τις αντίστοιχες της περίπτωσης ανισότροπου υλικού, όμως, παρόλα αυτά υπάρχει μια καλή συμφωνία των δύο προσεγγίσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος που απαιτήθηκε για την ανάλυση ενός μοντέλου με ανισότροπο υλικό ήταν σχεδόν το ένα δέκατο του αντίστοιχου χρόνου για ανάλυση με διακριτά επίπεδα ασυνεχειών.

Συμπερασματικά, με τη βοήθεια και των παραπάνω αναλύσεων, γίνεται κατανοητό ότι η σταθερότητα ενός πρηνούς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία και τη διαμόρφωση των επιπέδων αδυναμίας στο υλικό και συνολικά στη βραχόμαζα όπως, επίσης, και η μορφή της επιφάνειας αστοχίας που επηρεάζεται άμεσα από την κλίση τους.

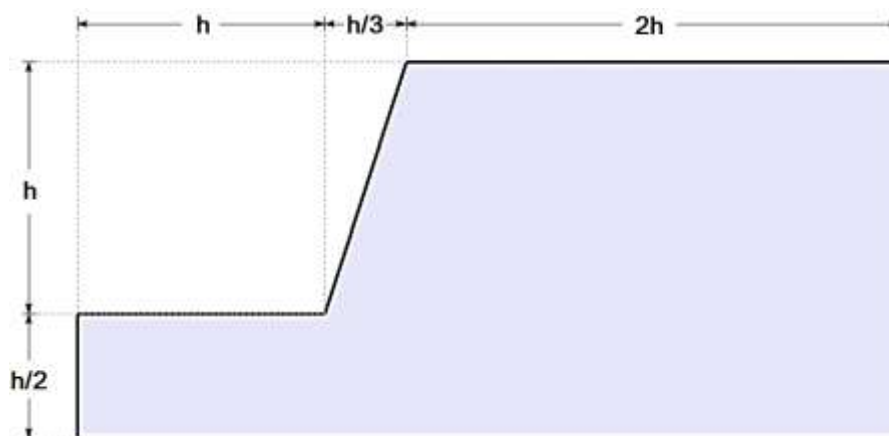


## 4ο Κεφάλαιο : Ανάλυση συμπεριφοράς βραχωδών πρανών με δύο συστήματα ασυνεχειών

### 4.1 Γενικά στοιχεία ανάλυσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το **πρώτο πρακτικό αντικείμενο** της διπλωματικής εργασίας. Με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Phase2 v8.0, που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, προέκυψαν οι συντελεστές ασφαλείας βάσει της τεχνικής μείωσης της διατμητικής αντοχής. Σκοπός της ανάλυσης είναι η εξέταση της επιρροής του μεγέθους του έργου (μέγεθος εκσκαφής) και της μορφής του δικτύου των ασυνεχειών στο συντελεστή ασφαλείας και στο μηχανισμό αστοχίας του πρανούς, όπως έγινε και από τη Rocscience.

Αναλύθηκαν **πρανή κλίσης 1:3** με τρία διαφορετικά ύψη (**10m, 30m και 100m**), κερματισμένα με δύο συστήματα ασυνεχειών κάθετα μεταξύ τους (**cross jointed**) για τρεις περιπτώσεις κλίσης του κυρίως συστήματος ασυνεχειών ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $90^\circ$ ) και για δύο περιπτώσεις άκρων των ασυνεχειών (κλειστά και ανοικτά).



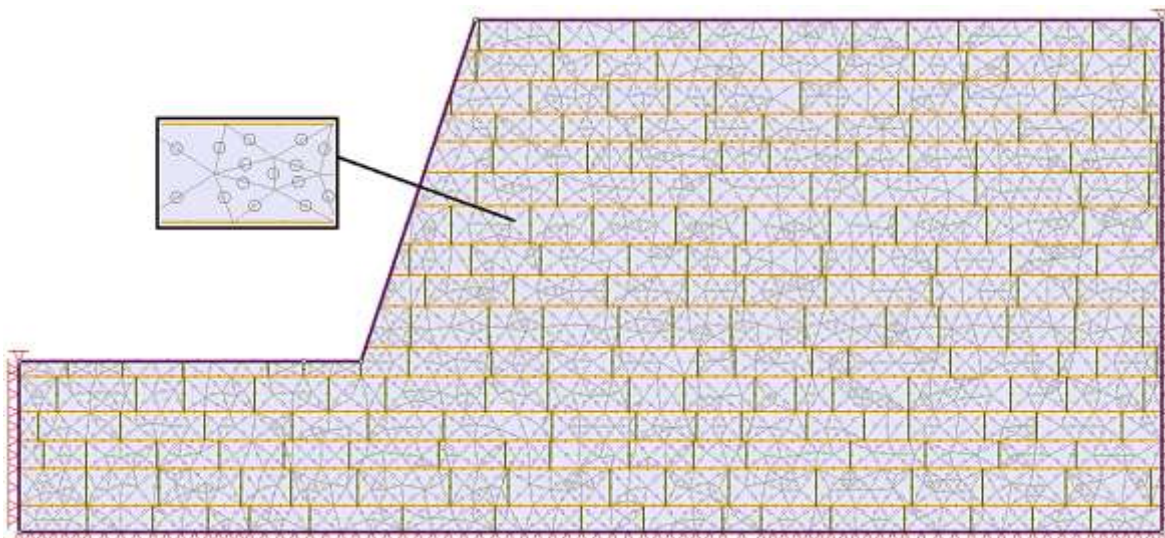
Σχήμα 4.1 : Γεωμετρικό προσομοίωμα πρανούς προς ανάλυση

Οι **ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας** των ασυνεχειών και του άρρηκτου πετρώματος δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Υλικό	Ιδιότητες
Άρρηκτος βράχος	Ειδικό βάρος = 0.027 MN/m <sup>3</sup>
	Μέτρο ελαστικότητας = 40.000 MPa
	Λόγος Poisson = 0.30
	Εφελκυστική αντοχή = 3.33 MPa
	Συνοχή = 13.0 MPa
	Γωνία τριβής = 35°
Ασυνέχειες	Γωνία διαστολικότητας = 0°
	Ορθή ακαμψία = 100.000 MPa/m
	Διατμητική ακαμψία = 50.000 MPa/m
	Εφελκυστική αντοχή = 0 MPa
	Συνοχή = 0.01 MPa
	Γωνία τριβής = 30°

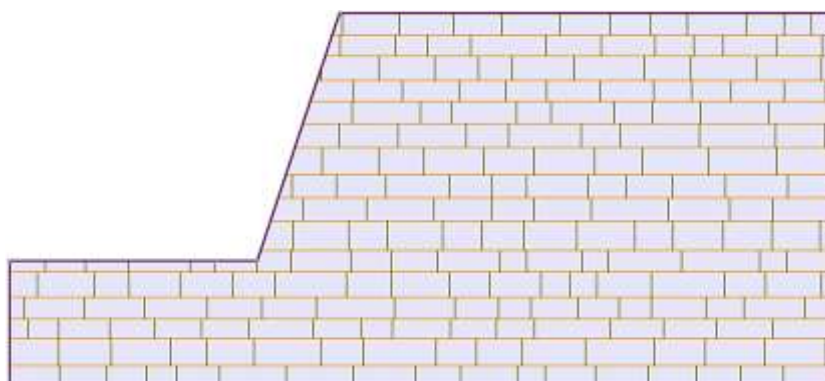
Πίνακας 4.1 : Συνοπτικός πίνακας των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας

Η διακριτοποίηση (6-κομβά τριγωνικά στοιχεία) και οι οριακές συνθήκες (αρθρώσεις) που ορίστηκαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

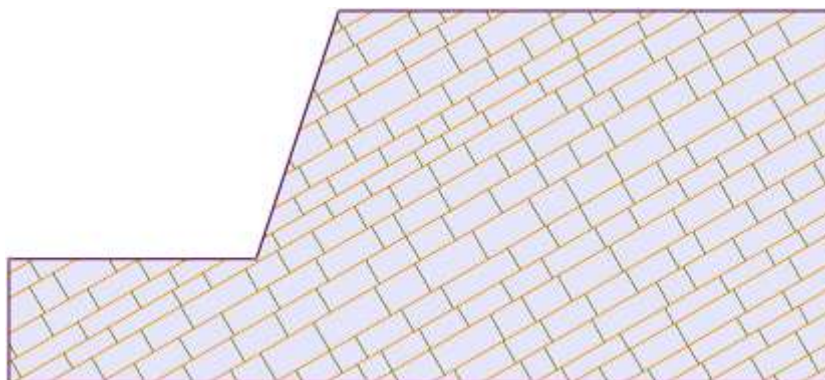


**Σχήμα 4.2 : Διακριτοποίηση και οριακές συνθήκες ανάλυσης**

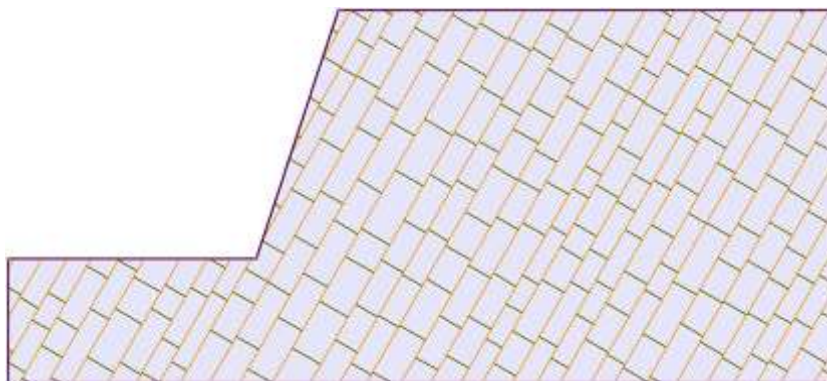
Οι 4 μορφές των ασυνεχειών που προσομοιώθηκαν φαίνονται στα επόμενα σχήματα (με πορτοκαλί χρώμα το κύριο σύστημα):



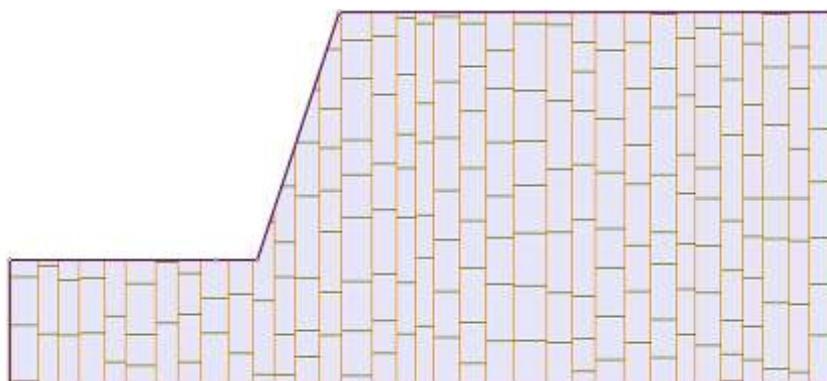
**Σχήμα 4.3 : Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών 0°**



**Σχήμα 4.4 : Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών 30°**



Σχήμα 4.5.: Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών 60°

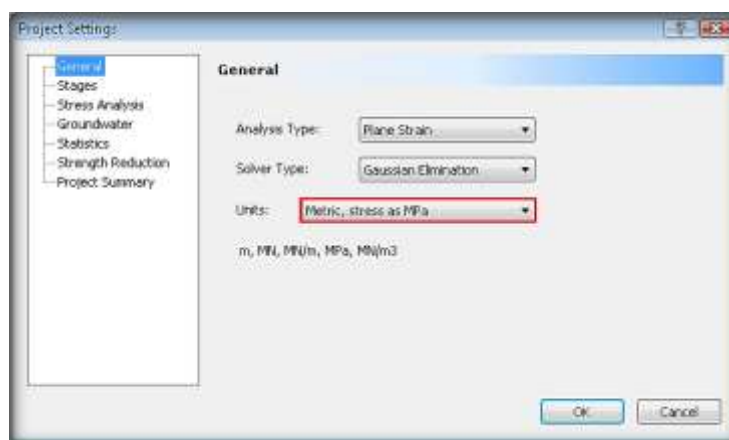


Σχήμα 4.6.: Προσομοίωμα με κλίση του κυρίου συστήματος ασυνεχειών 90°

## 4.2 Σχεδιασμός του μοντέλου ανάλυσης

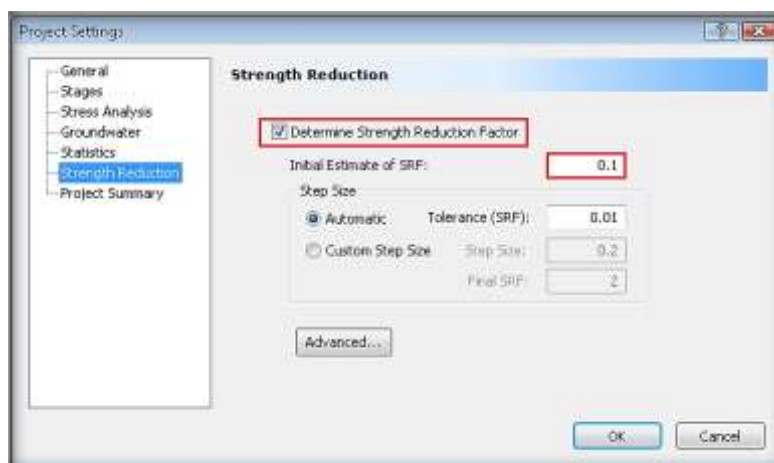
Ο σχεδιασμός του μοντέλου ανάλυσης στο πρόγραμμα Phase2 v8.0 περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Μετά την ενεργοποίηση του προγράμματος ορίζονται, αρχικά, κάποιες βασικές ιδιότητες της ανάλυσης με την εντολή **Analysis** → **Project Settings** ως εξής:
  - Στην επιλογή **General** επιλέγονται ως μονάδα μέτρησης της πίεσης τα MPa



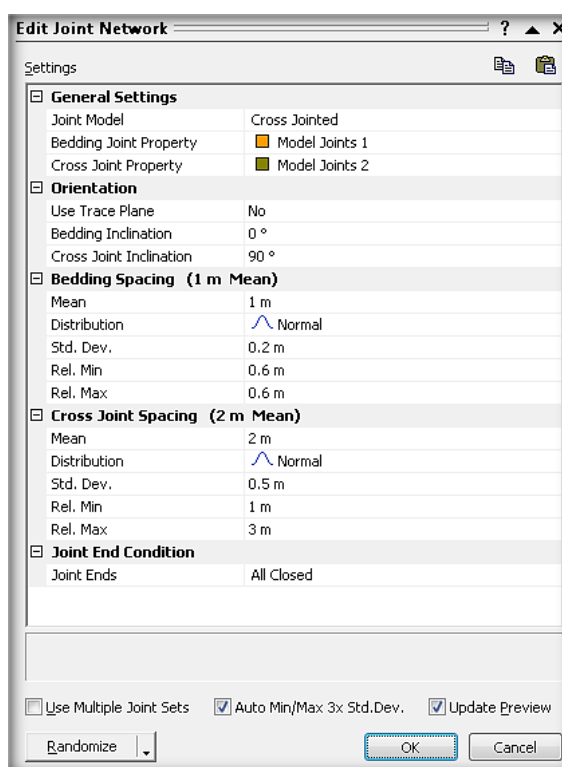
Εικόνα 4.1.: Ορισμός στο πρόγραμμα Phase2 v8.0 των μονάδων μέτρησης

- Στην επιλογή **Strength Reduction** τσεκάρεται η ανάλυση με τη μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής SSR και θέτεται ως βήμα μείωσης (Initial Estimate of SSR) το 0.1



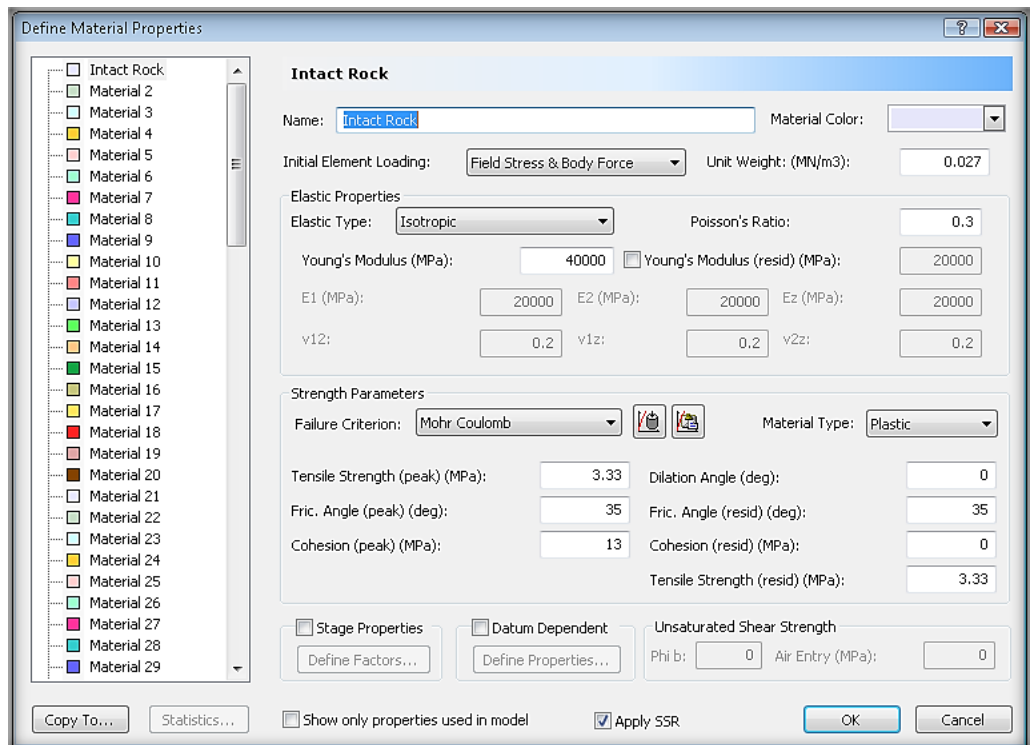
Εικόνα 4.2 : Επιλογή στο πρόγραμμα Phase2 v8.0 της ανάλυσης SSR

- Στη συνέχεια, σχεδιάζεται η γεωμετρία του προς ανάλυση έργου με χρήση της εντολής: **Boundaries** → **Add External** και δίνοντας τις κατάλληλες συντεταγμένες.
- Έπειτα, σχεδιάζεται η γεωμετρία των δικτύων των ασυνεχειών με την εντολή: **Boundaries** → **Joint Networks** → **Add Joint Networks**. Με κλικ μέσα στα όρια του έργου και ENTER στην οθόνη εμφανίζεται τότε το παράθυρο διαλόγου ορισμού του δικτύου.
  - Για τα παραπάνω μοντέλα επιλέγεται **Joint Model** → **Cross Jointed** και έπειτα ορίζονται οι γωνίες κλίσης, οι αποστάσεις και οι συνθήκες των άκρων των ασυνεχειών: **Joint End Condition** → **All Closed / All Open**

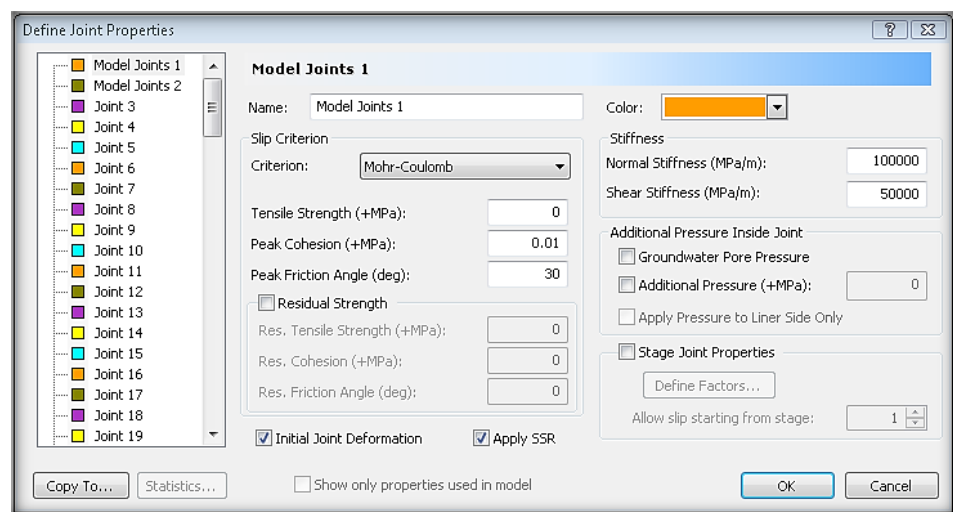


Εικόνα 4.3 : Παράθυρο ορισμού της γεωμετρίας του δικτύου ασυνεχειών

- Μετά το σχεδιασμό και του δικτύου των ασυνεχειών ορίζονται οι ιδιότητες του υλικού του πρανούς με την εντολή: **Properties** → **Define Materials** και των ασυνεχειών με την εντολή: **Properties** → **Define Joints**

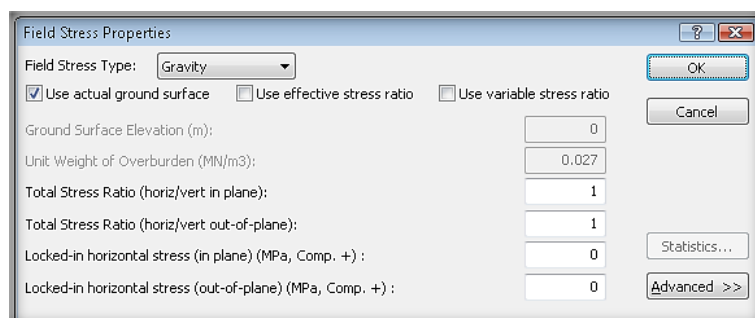


**Εικόνα 4.4 :** Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων του άρρηκτου υλικού



**Εικόνα 4.5 :** Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων των ασυνεχειών

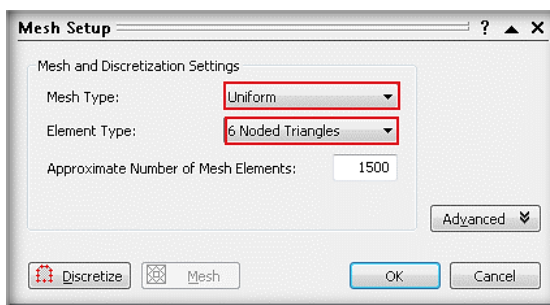
- Όσον αφορά το πεδίο των τάσεων με την εντολή: **Loading** → **Field Stress** επιλέγεται ο τύπος Gravity με την υπόθεση ότι οι οριζόντιες τάσεις είναι ίσες με τις κατακόρυφες τάσεις.



**Εικόνα 4.6 :** Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων του τασικού πεδίου

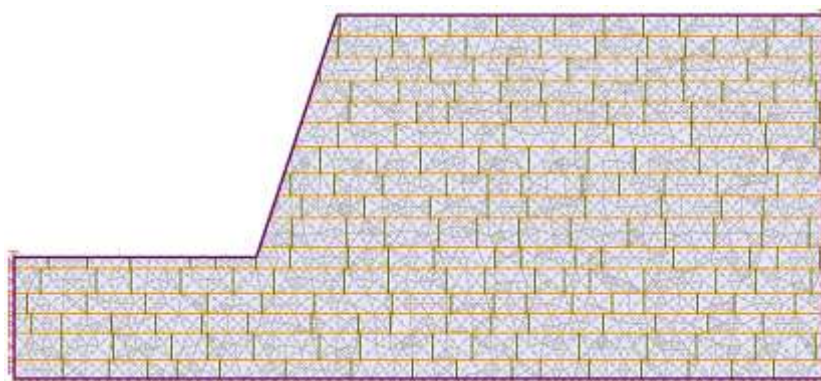


- Το επόμενο βήμα είναι η διακριτοποίηση του μοντέλου με πεπερασμένα στοιχεία. Σε πρώτο στάδιο ορίζονται οι ιδιότητες του δικτύου διακριτοποίησης με την εντολή: **Mesh** → **Mesh Setup**.
  - Δεδομένης της ανάλυσης με τη μέθοδο μείωσης της διαμητρικής αντοχής SSR επιλέγεται ο τύπος Uniform με 6-κομβά στοιχεία όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.7 : Παράθυρο ορισμού των ιδιοτήτων του δικτύου διακριτοποίησης

- Σε δεύτερο στάδιο, με την εντολή: **Mesh** → **Discretize and Mesh** το μοντέλο διακριτοποιείται και αυτομάτως τοποθετούνται και κάποιες οριακές συνθήκες περιορισμού των μετακινήσεων.
- Οι οριακές συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο φαίνονται στην επόμενη εικόνα. Η μετατροπή τους γίνεται από την εντολή: **Displacements** → **Restrain X,Y** (αρθρώσεις).



Σχήμα 4.7 : Διακριτοποίηση και οριακές συνθήκες στο μοντέλο ανάλυσης

- Η επίλυση του μοντέλου γίνεται με την εντολή **Compute** και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με την εντολή **Interpret**.

### 4.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης

Οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν από την ανάλυση όλων των περιπτώσεων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ύψος πρανούς	Κλίση κυρίου συστήματος 0°		Κλίση κυρίου συστήματος 30°		Κλίση κυρίου συστήματος 60°		Κλίση κυρίου συστήματος 90°	
	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα	“Ανοικτά” άκρα	“Κλειστά” άκρα
10.0 m	-	-	1.24	2.16	0.79	7.86	-	-
30.0 m	18.69	18.50	1.08	1.16	0.49	0.70	13.73	14.33
100.0 m	6.88	7.40	0.84	0.81	0.30	0.30	7.21	7.77

Πίνακας 4.2 : Συνοπτικός πίνακας των συντελεστών ασφαλείας της ανάλυσης

### **Πρανή ύψους 10.0m**

Στα πρανή ύψους 10.0m και για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $0^\circ$  και  $90^\circ$  δεν βρέθηκε κάποιος συντελεστής μείωσης της διατμητικής αντοχής που να προκαλεί αστοχία παρότι πολλές από τις ασυνέχειες διαρρέουν. Οι μετακινήσεις που προκαλούνται τείνουν να έχουν τη μορφή κύκλου ολίσθησης, αλλά είναι πάρα πολύ μικρές (της τάξης του  $10^{-5}$ ) για να προκληθεί αστοχία.

Για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $30^\circ$  οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν ήταν 2.16 για “κλειστά” άκρα ασυνεχειών και 1.24 για “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. Η μικρότερη τιμή στην περίπτωση των “ανοικτών” άκρων δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή τα διάφορα μπλοκ που προκύπτουν από τις ασυνέχειες μπορούν να κινηθούν μεταξύ τους και να περιστραφούν. Στα πρανή με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών η αστοχία εκδηλώνεται πιο πάνω από τον πόδα του πρανού με ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών και επιπλέον υπάρχει κίνηση και μεμονωμένων τεμαχίων. Στα πρανή με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών η αστοχία πραγματοποιείται, επίσης, με ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών, αλλά δεν υπάρχουν κινήσεις μεμονωμένων τεμαχίων και λόγω των συνθηκών των άκρων οι μετακινήσεις γίνονται με μια ενιαία μάζα. Τέλος, παρατηρείται αποκόλληση και περιστροφή τεμαχίου στον πόδα.

Τέλος, για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $60^\circ$  η αστοχία τόσο στην περίπτωση των “ανοικτών”, όσο και στην περίπτωση των “κλειστών” άκρων εκδηλώνεται με ολίσθηση κατά μήκος ασυνεχειών. Όπως και στα πρανή με γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $30^\circ$  στα “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών η αστοχία συνδυάζεται και με κινήσεις μεμονωμένων τεμαχίων, ενώ στα “κλειστά” άκρα κινείται πολύ μεγαλύτερη μάζα.

### **Πρανή ύψους 30.0m**

Στα πρανή ύψους 30.0m και για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $0^\circ$  οι συντελεστές μείωσης της διατμητικής αντοχής που προκαλούν την αστοχία είναι 18.50 και 18.69 για “κλειστά” και “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών αντίστοιχα. Η τιμή στα “κλειστά” άκρα προέκυψε μικρότερη από την αντίστοιχη των “ανοικτών” άκρων, γεγονός μη αναμενόμενο, ωστόσο, η διαφορά τους δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η αστοχία εκδηλώνεται περιστροφικά κοντά στον πόδα του πρανού και στην περίπτωση των “ανοικτών” άκρων υπάρχουν, επιπλέον, κάποιες μεμονωμένες κινήσεις των μπλοκ.

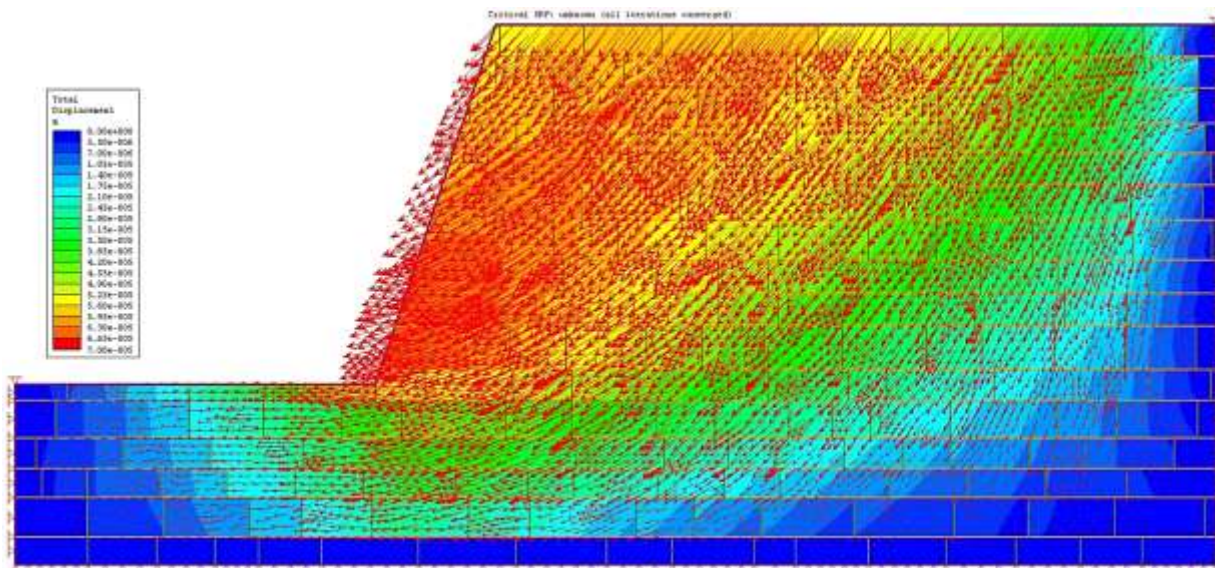
Για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $30^\circ$  οι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν ήταν 1.16 για “κλειστά” άκρα ασυνεχειών και 1.08 για “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών. Στα πρανή με “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών η αστοχία εκδηλώνεται με ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών και περιστροφές τεμαχίων κοντά στον πόδα. Στα πρανή με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών η αστοχία πραγματοποιείται, επίσης, με ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών με τη διαφορά και πάλι ότι δεν υπάρχουν κινήσεις μεμονωμένων τεμαχίων.

Για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών  $60^\circ$  τα πρανή δεν ευσταθούν και αστοχούν κατευθείαν με ολίσθηση κατά μήκος ασυνεχειών καθώς οι συντελεστές προκύπτουν μικρότεροι της μονάδας.

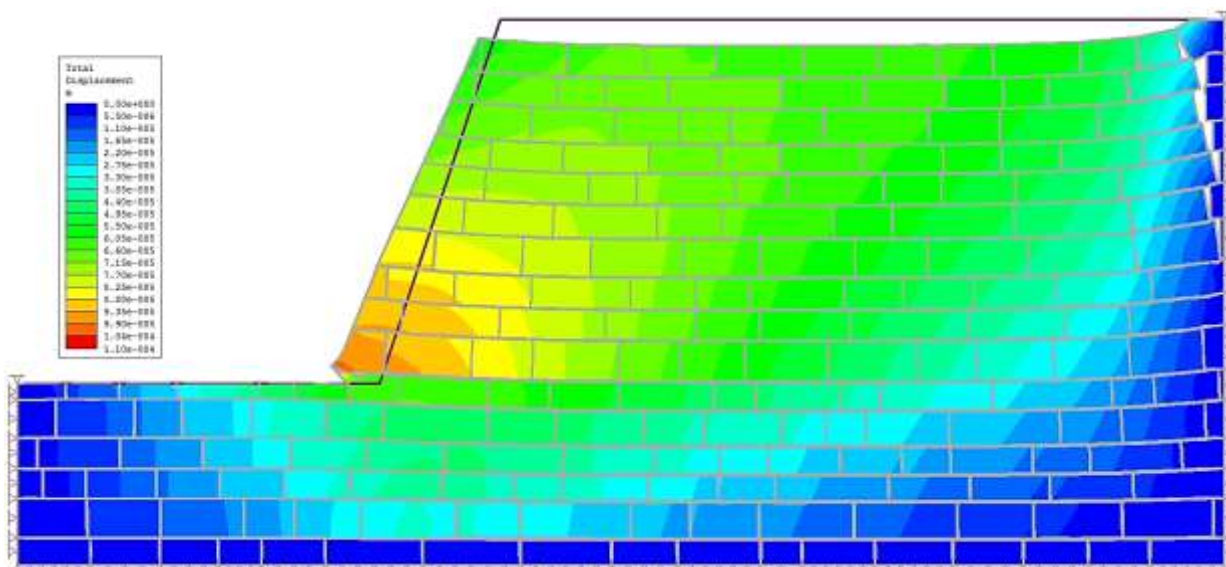
Τέλος, στην περίπτωση γωνίας του κυρίου συστήματος ασυνεχειών  $90^\circ$  οι συντελεστές προκύπτουν μεγάλοι με τιμές 14.33 και 13.73 για “κλειστά” και “ανοικτά” άκρα ασυνεχειών αντίστοιχα. Στην περίπτωση των “ανοικτών” άκρων εκδηλώνονται για πρώτη φορά ανατροπές τεμαχίων, ενώ στα “κλειστά” άκρα η αστοχία εκδηλώνεται με μετακίνηση του πρανού ως ενιαίο σώμα σε συνδυασμό με περιστροφή στον πόδα.

### **Πρανή ύψους 100.0m**

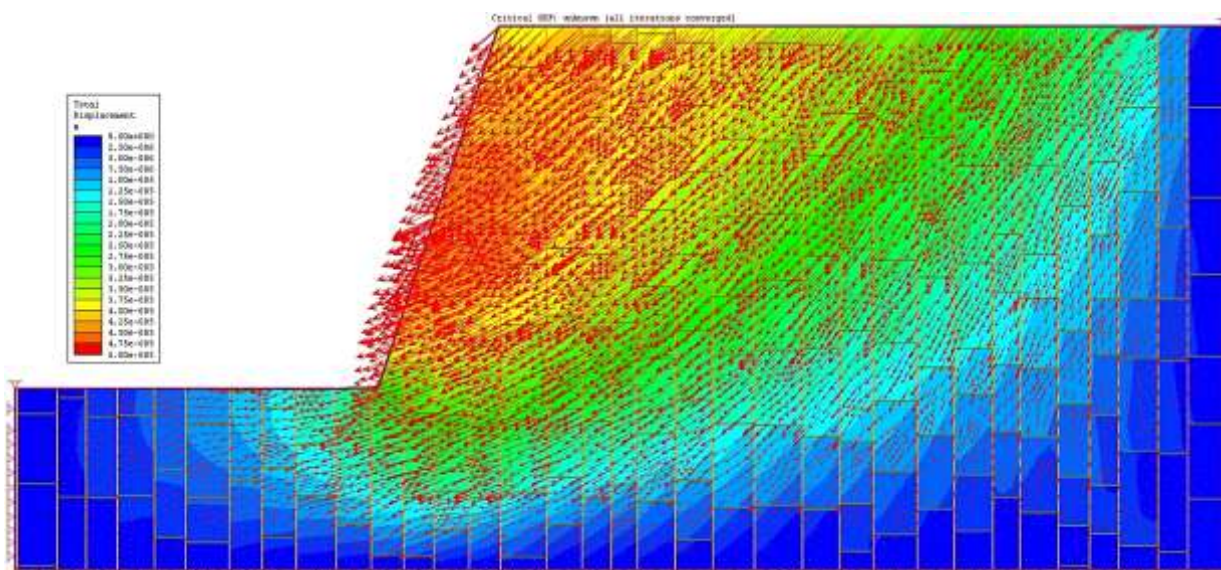
Στα πρανή ύψους 100.0m η αστοχία τείνει να έχει σε όλες τις περιπτώσεις μορφή κύκλου ολίσθησης. Τα αποτελέσματα μεταξύ των περιπτώσεων “ανοικτών” και “κλειστών” άκρων των ασυνεχειών σχεδόν συμπίπτουν, καθώς αυξανόμενης της κλίμακας του έργου μειώνεται η επιρροή του παράγοντα αυτού. Χαρακτηριστικές είναι μόνο οι περιπτώσεις με κύριο σύστημα ασυνεχειών  $30^\circ$  και  $60^\circ$  όπου τα πρανή δεν ευσταθούν και αστοχούν κατευθείαν.



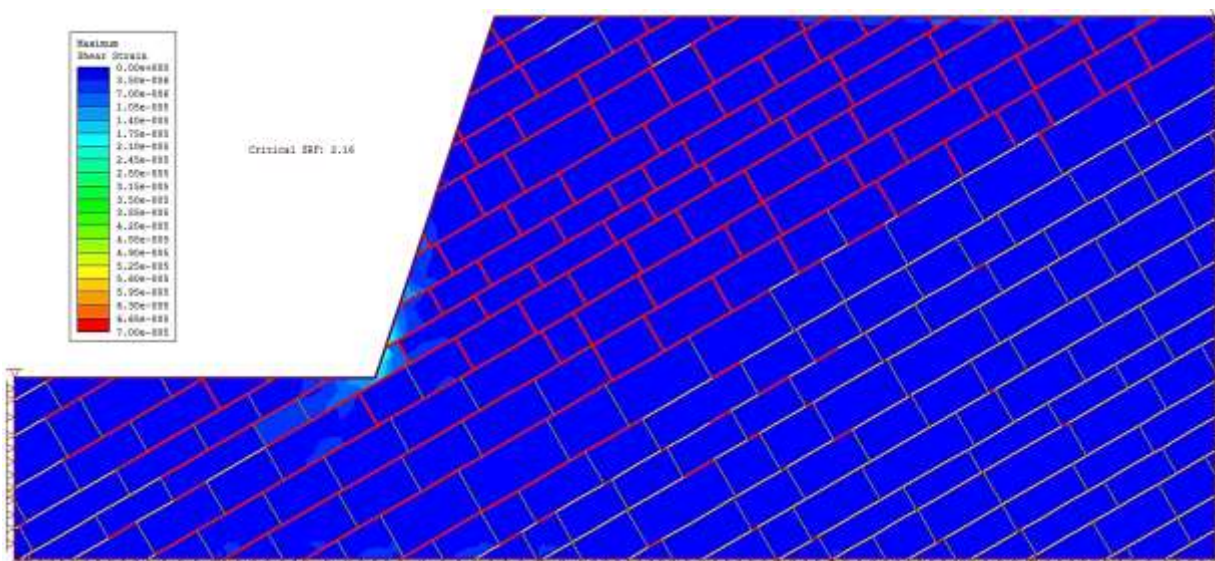
Εικόνα 4.8 : Μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 0°



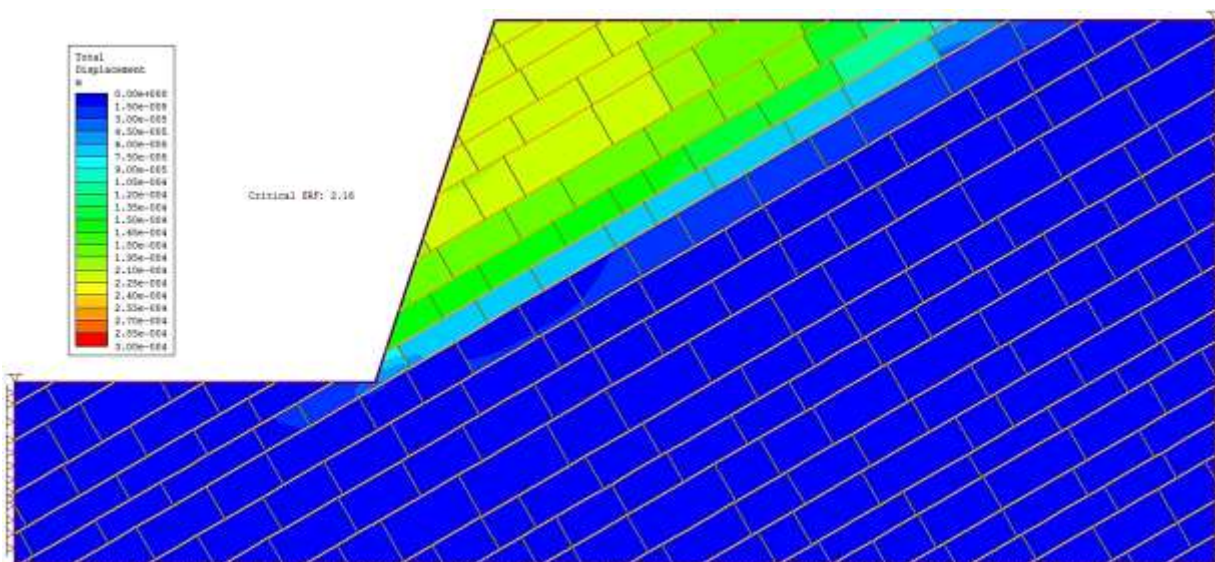
Εικόνα 4.9 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 0°



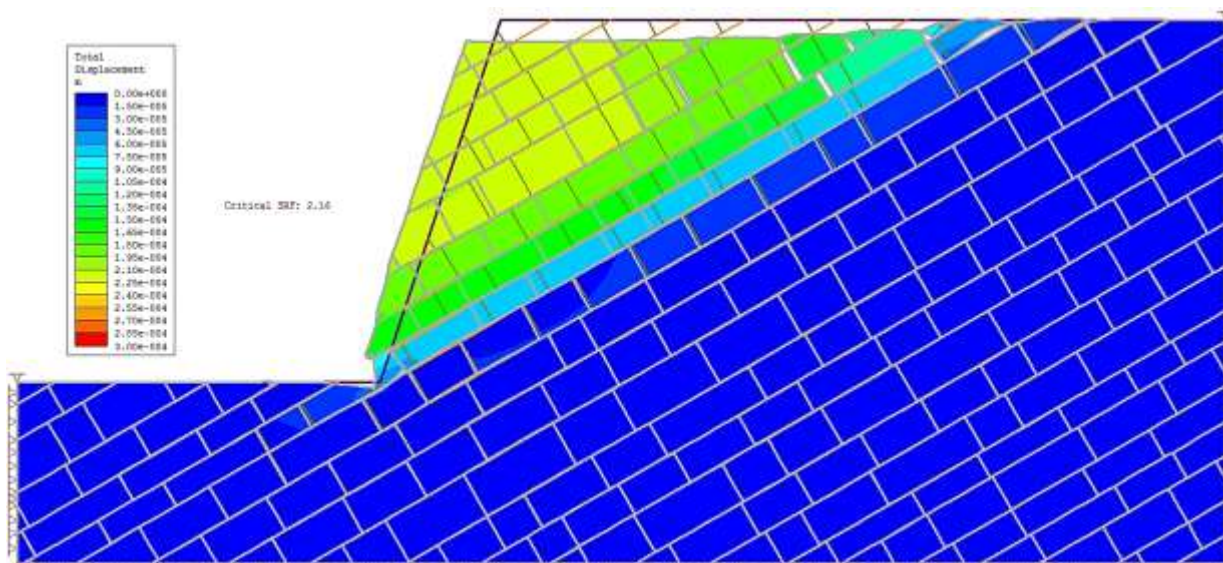
Εικόνα 4.10 : Μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 90°



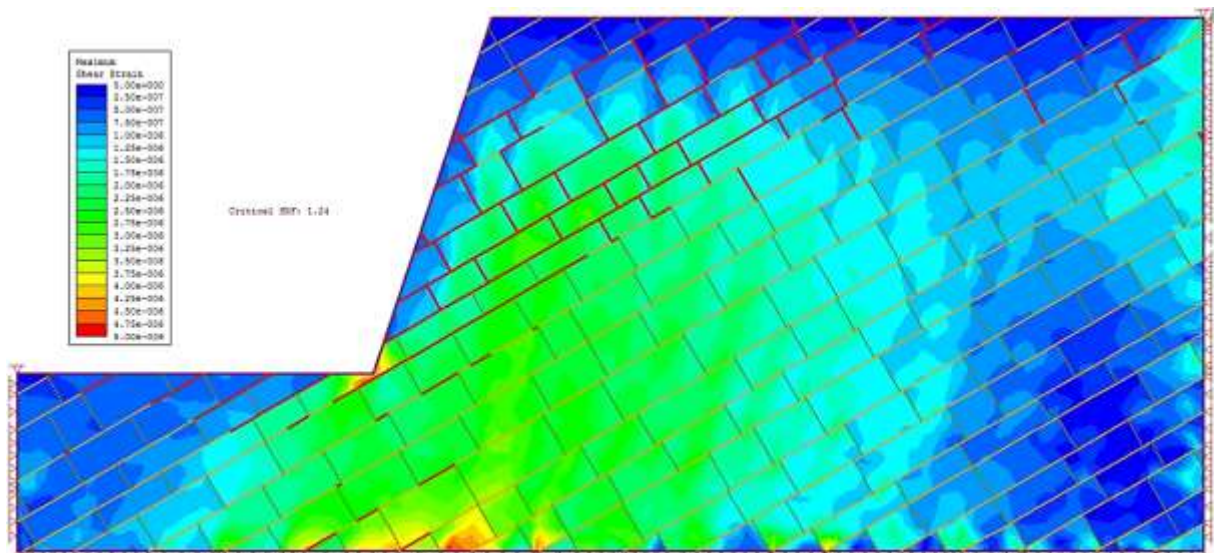
Εικόνα 4.11 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρηνές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “κλειστά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία



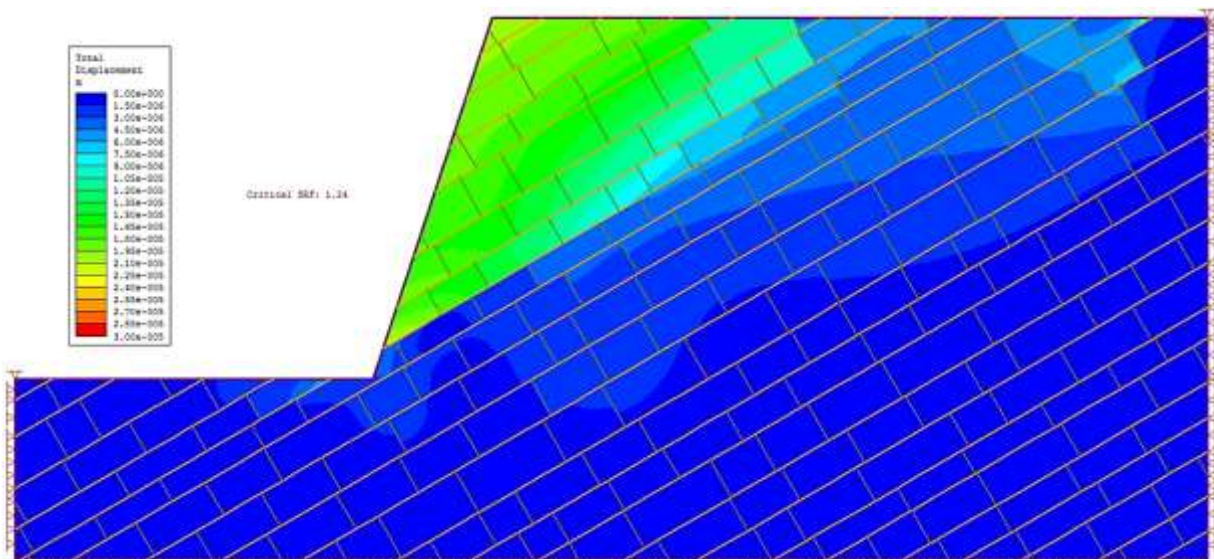
Εικόνα 4.12 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



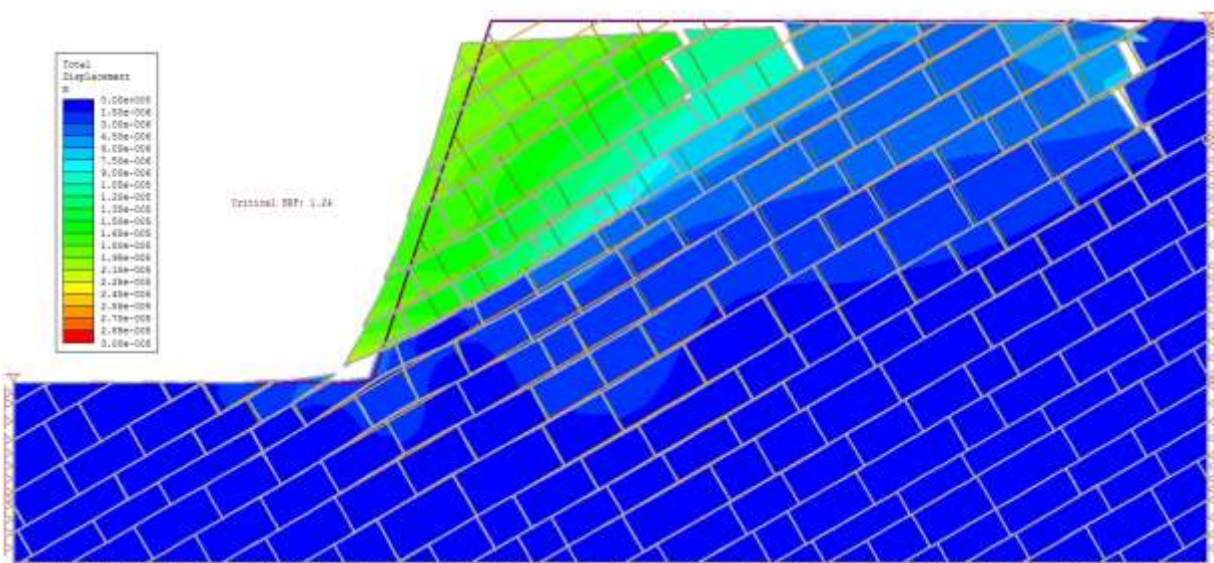
Εικόνα 4.13 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρηνούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



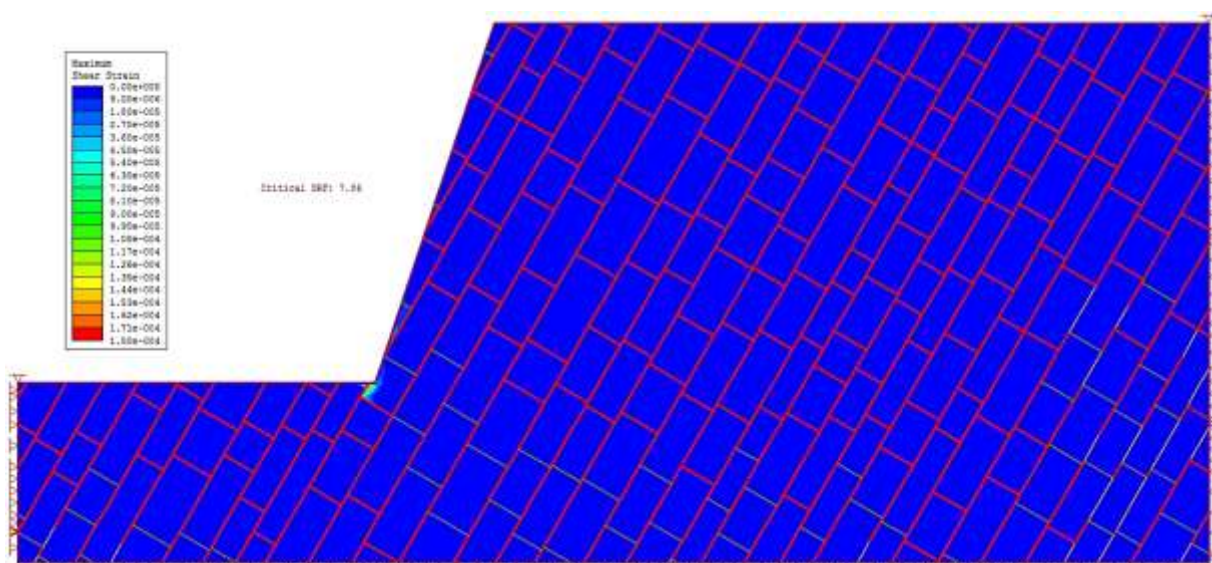
Εικόνα 4.14 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “ανοικτά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρέυσει κατά την αστοχία



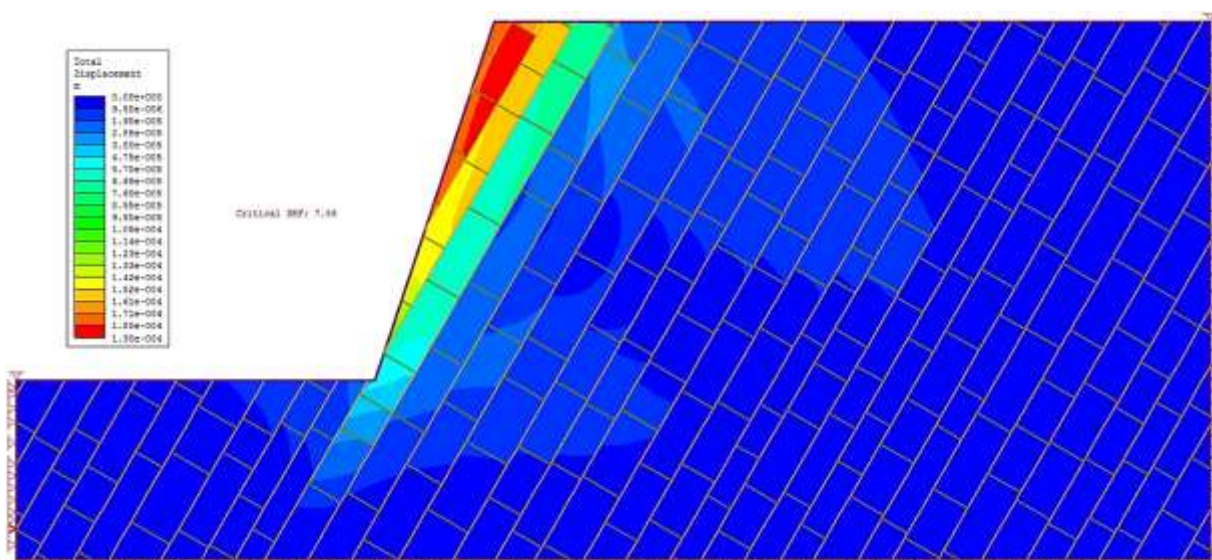
Εικόνα 4.15 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



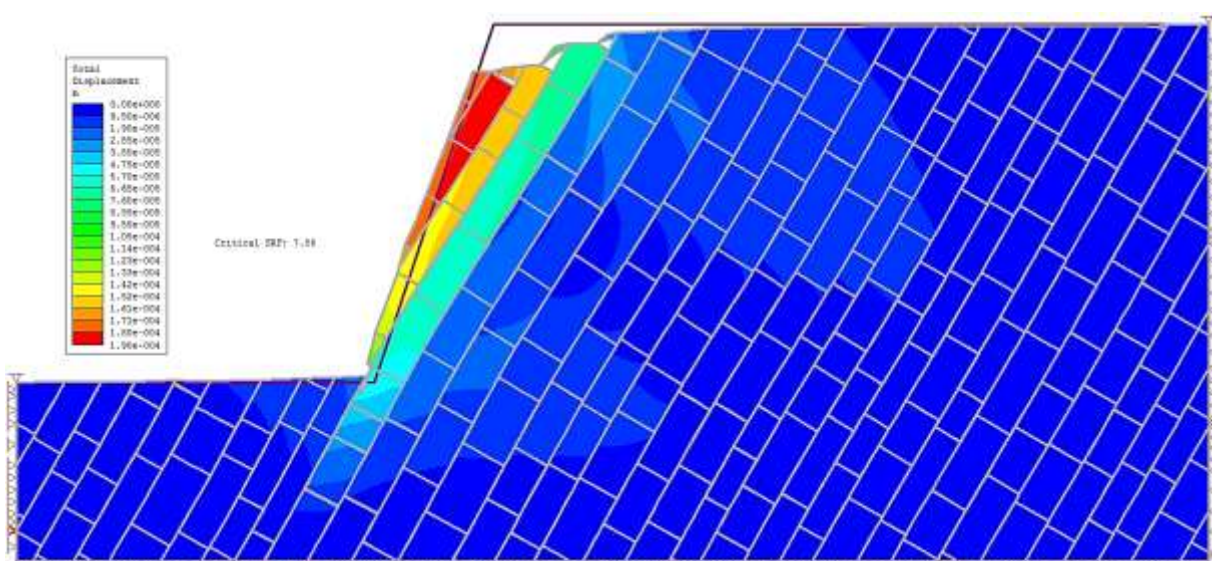
Εικόνα 4.16 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



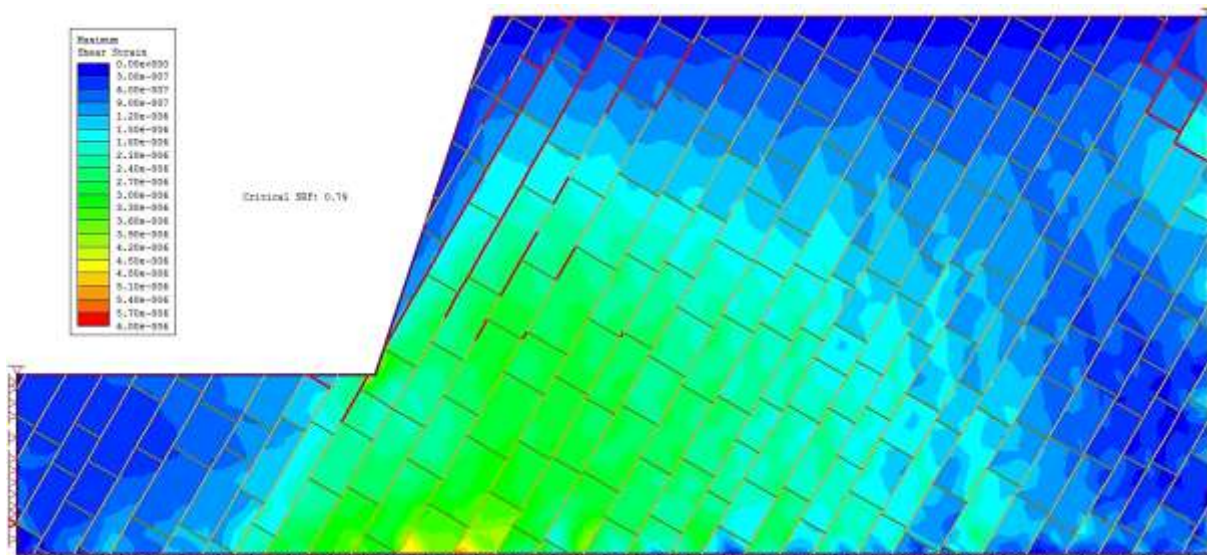
Εικόνα 4.17 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρηνές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “κλειστά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία



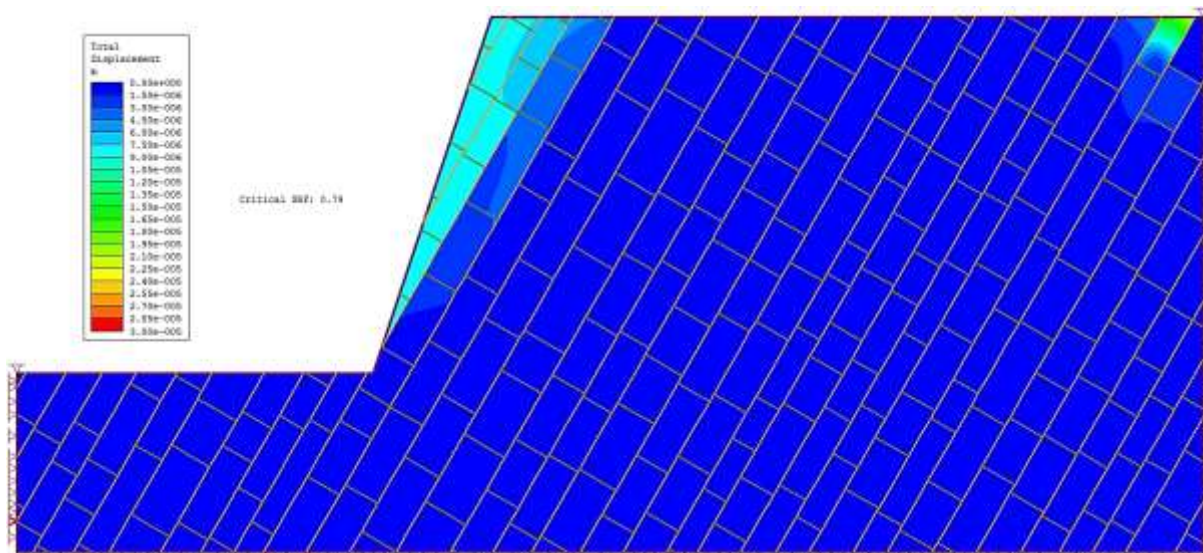
Εικόνα 4.18 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



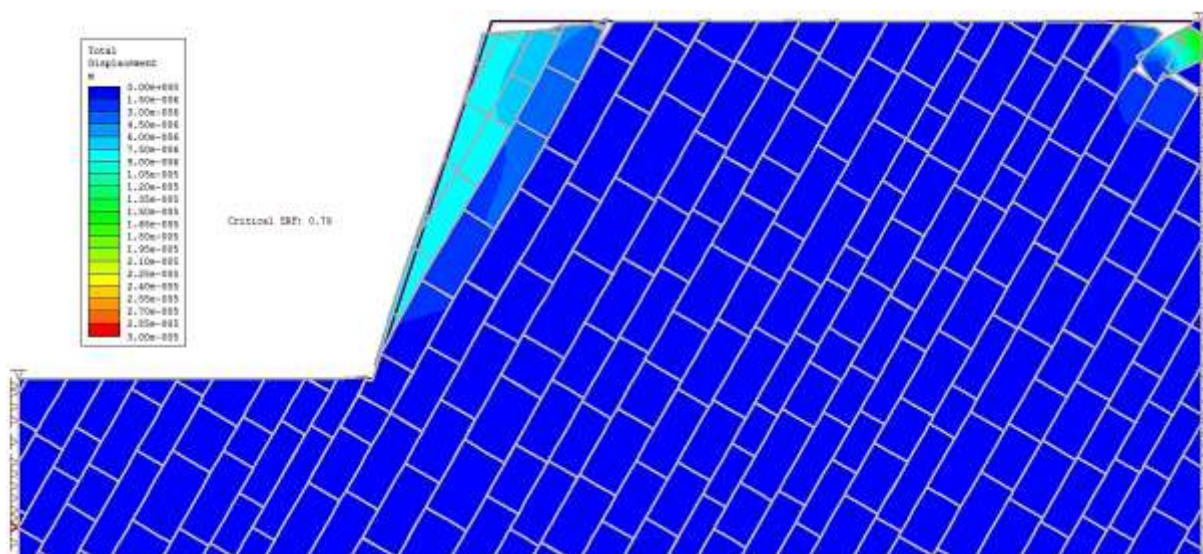
Εικόνα 4.19 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρηνούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



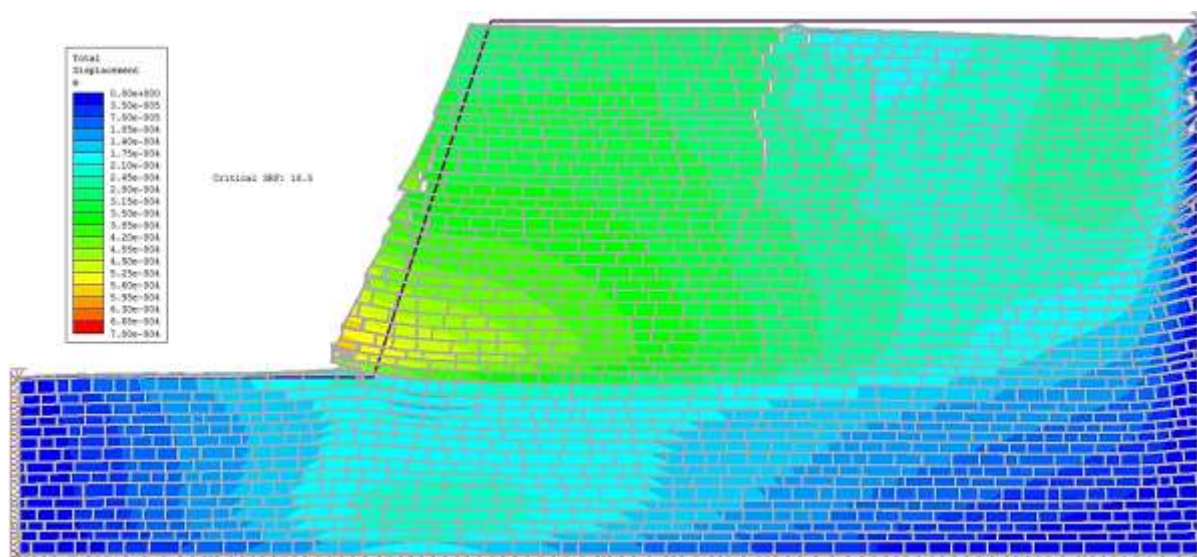
Εικόνα 4.20 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “ανοικτά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρέυσει κατά την αστοχία



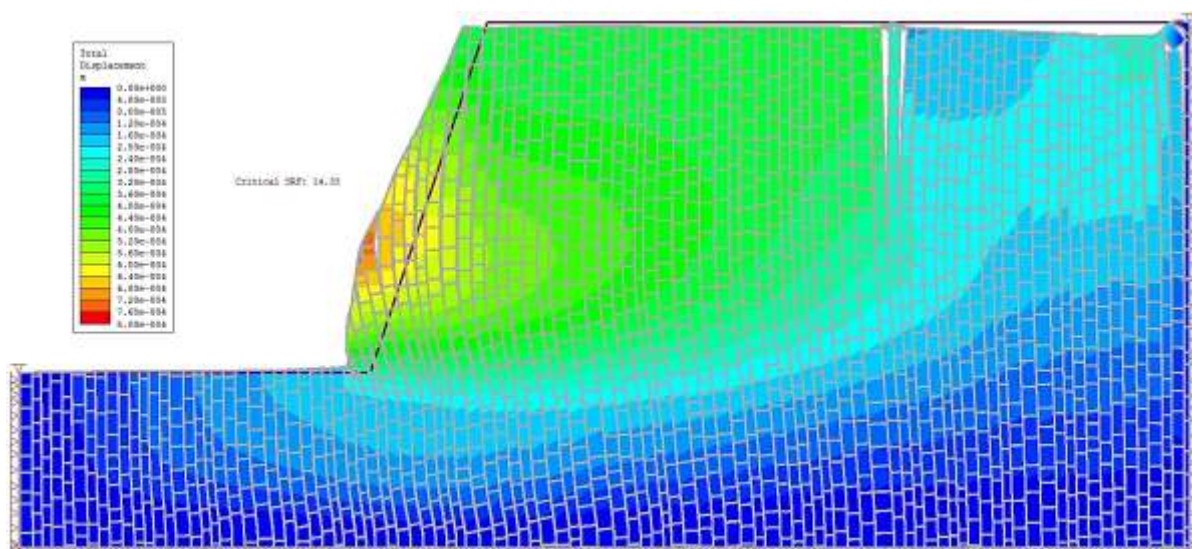
Εικόνα 4.21 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



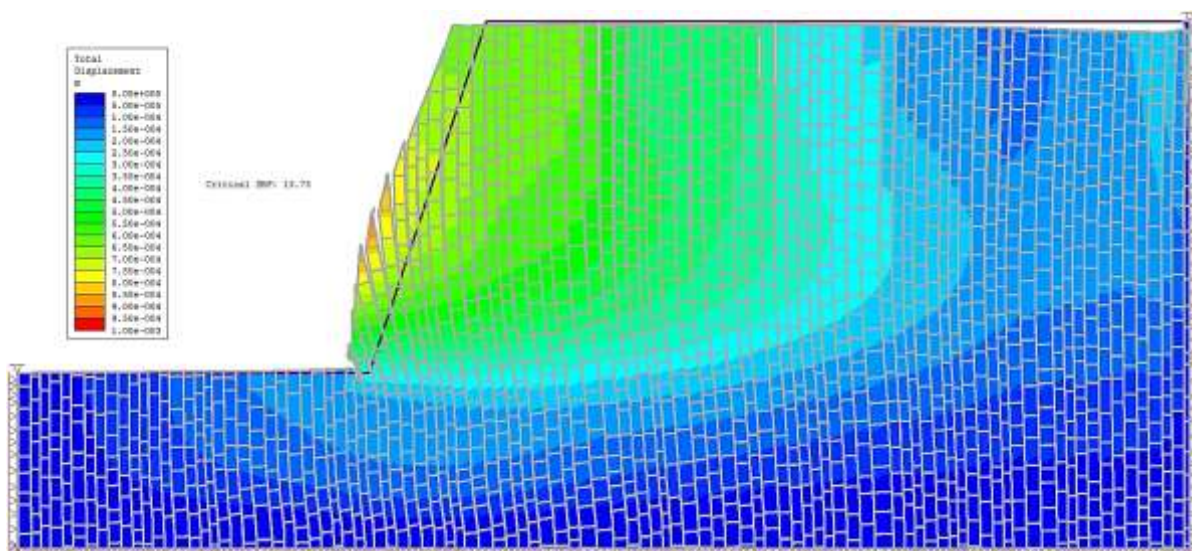
Εικόνα 4.22 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 10.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



Εικόνα 4.23 : Συνολικές παραμορφώσεις και παραμορφωμένο σχήμα του πρανού ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 0° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία

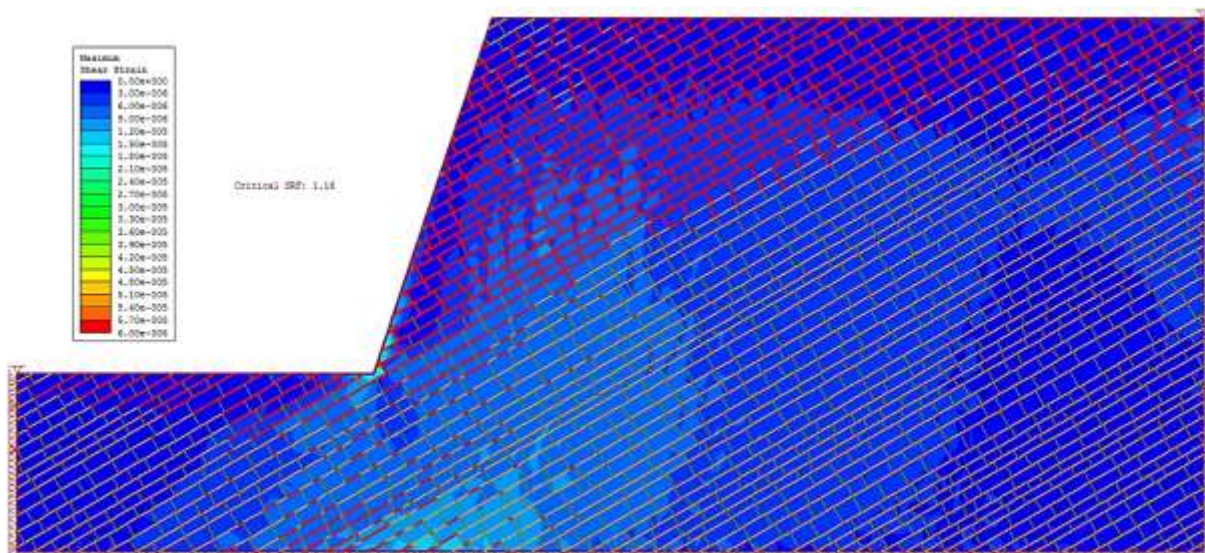


Εικόνα 4.24 : Συνολικές παραμορφώσεις και παραμορφωμένο σχήμα του πρανού ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 90° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία

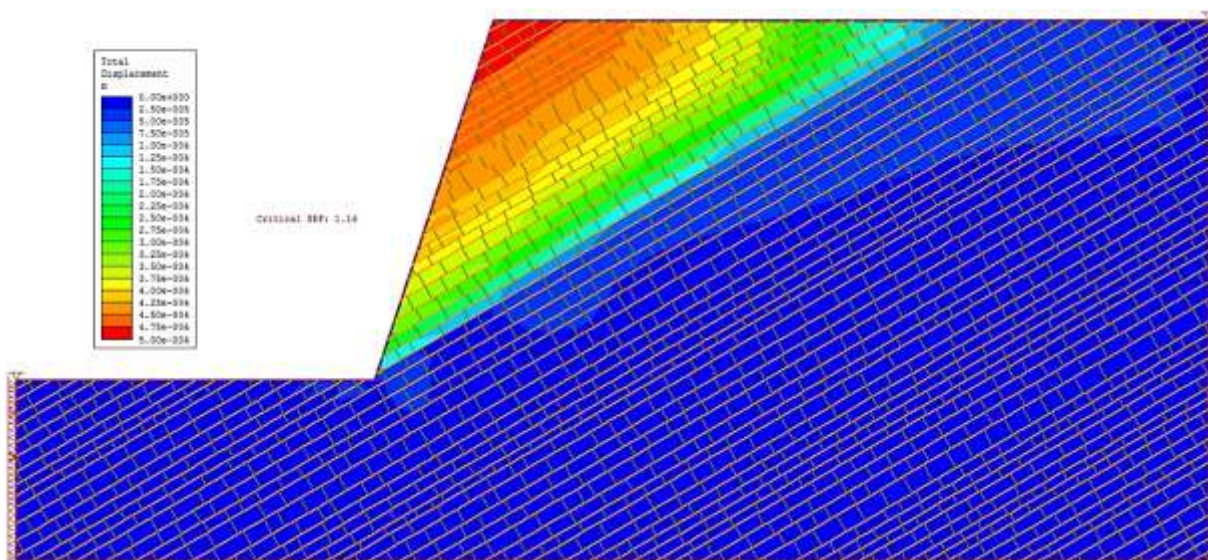


Εικόνα 4.25 : Συνολικές παραμορφώσεις και παραμορφωμένο σχήμα του πρανού ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 90° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία

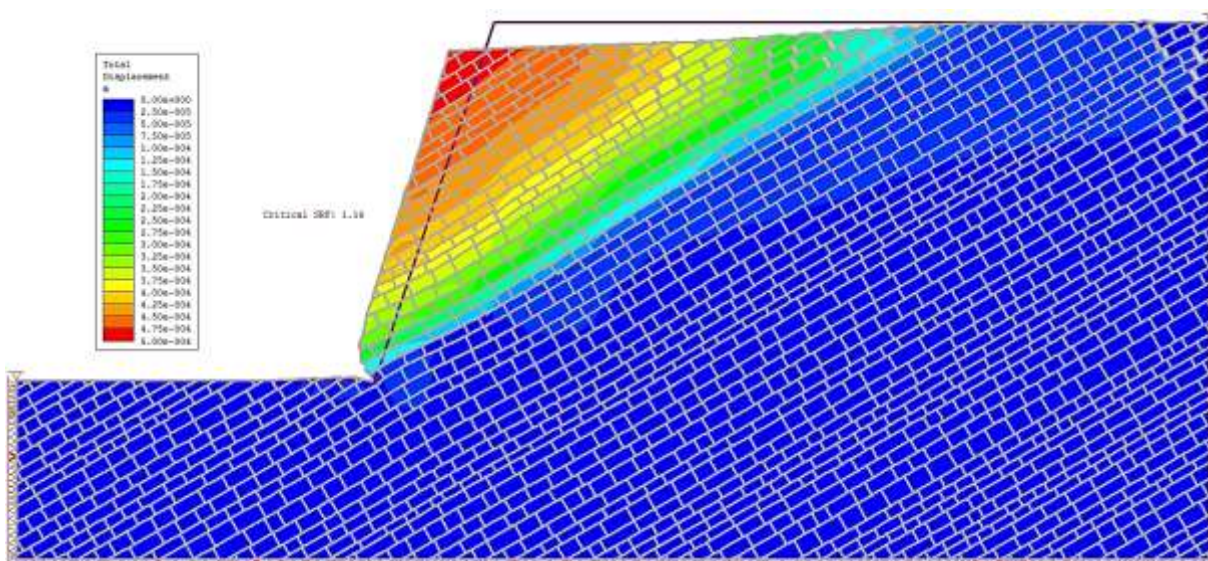




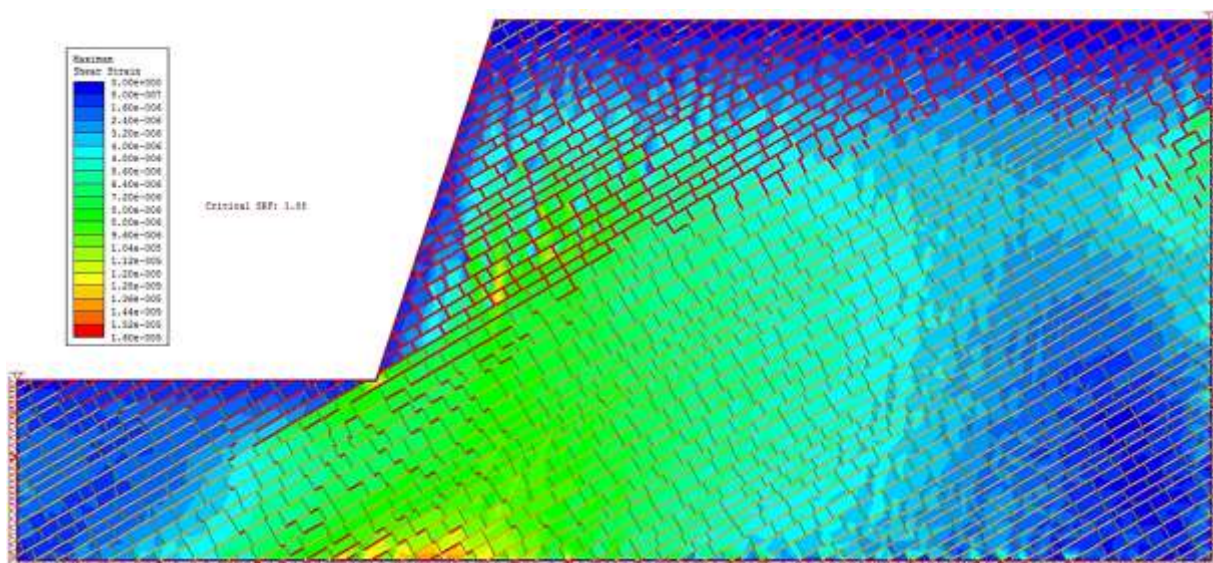
Εικόνα 4.26 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “κλειστά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρέυσει κατά την αστοχία



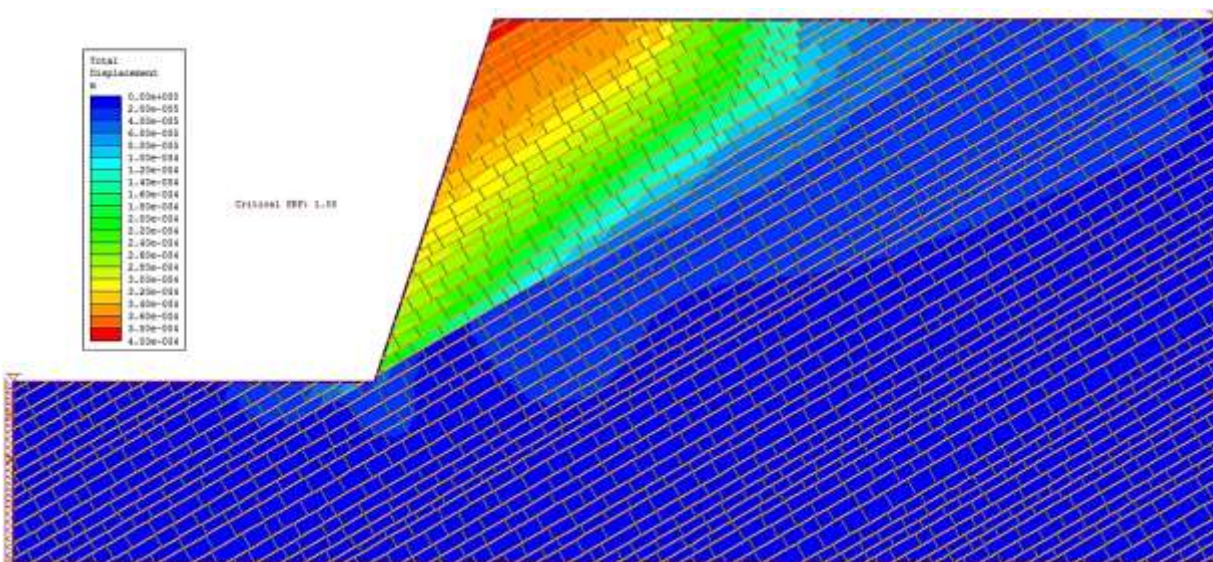
Εικόνα 4.27 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



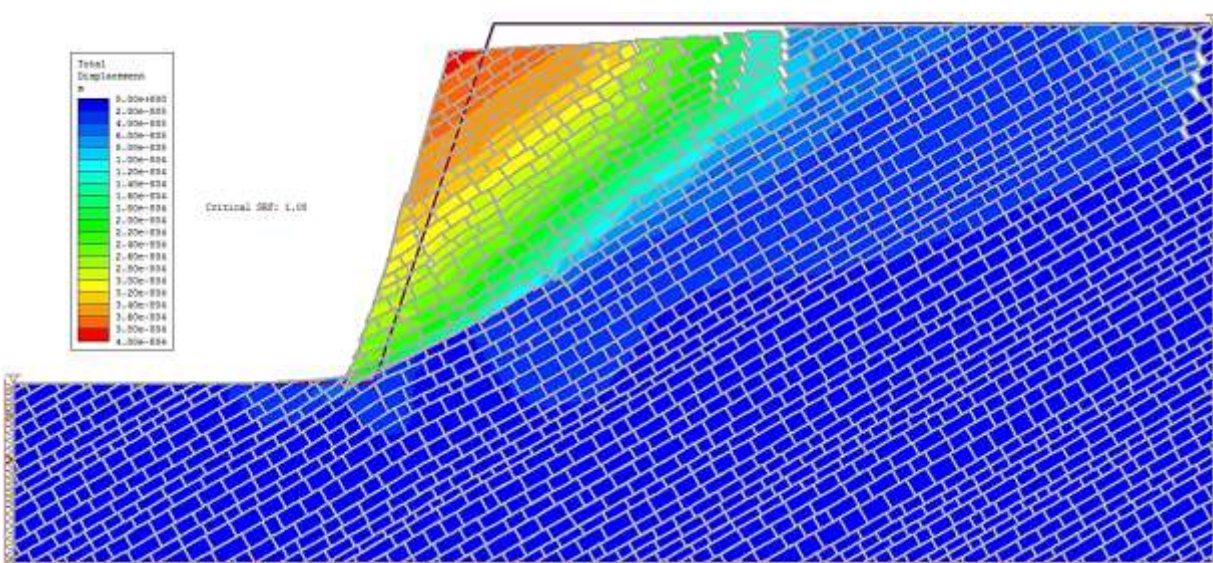
Εικόνα 4.28 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



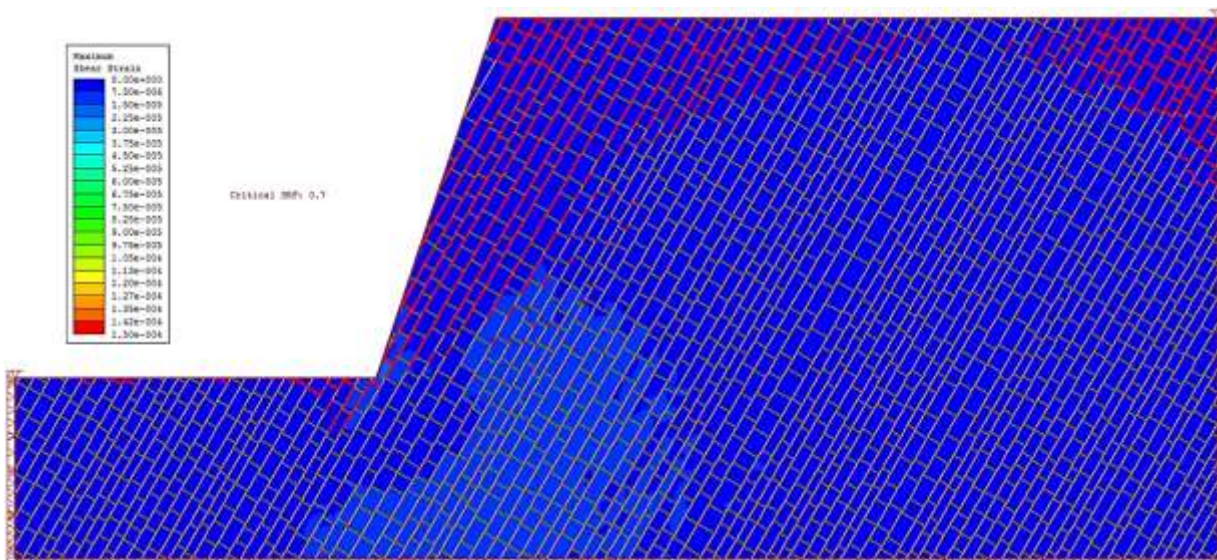
Εικόνα 4.29 : Μένιστες διαμητικές τροχές στο πρηνές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “ανοικτά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρέυσει κατά την αστοχία



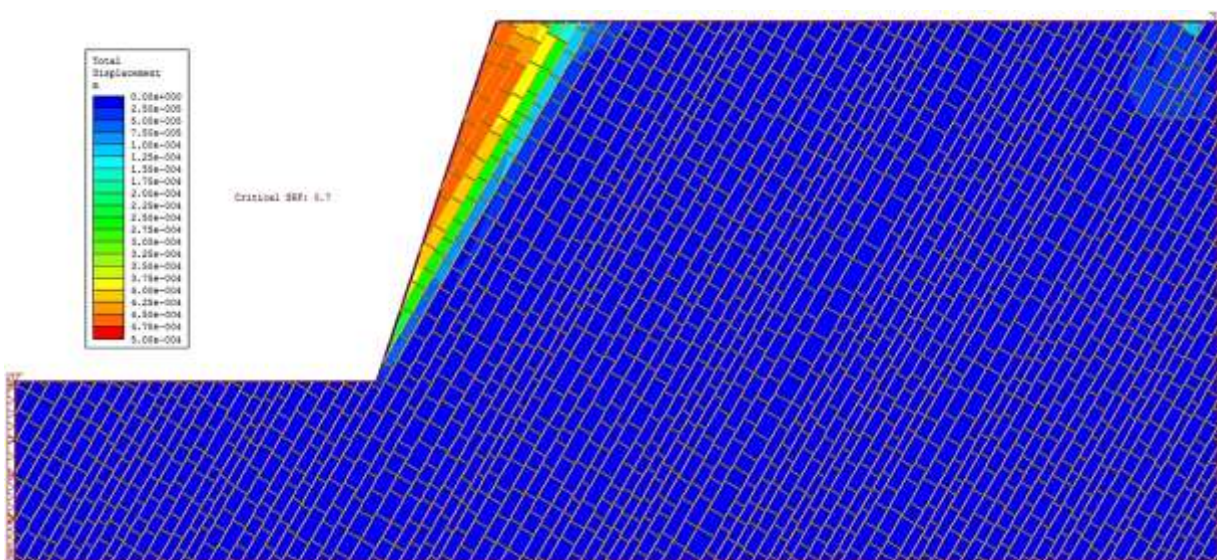
Εικόνα 4.30 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



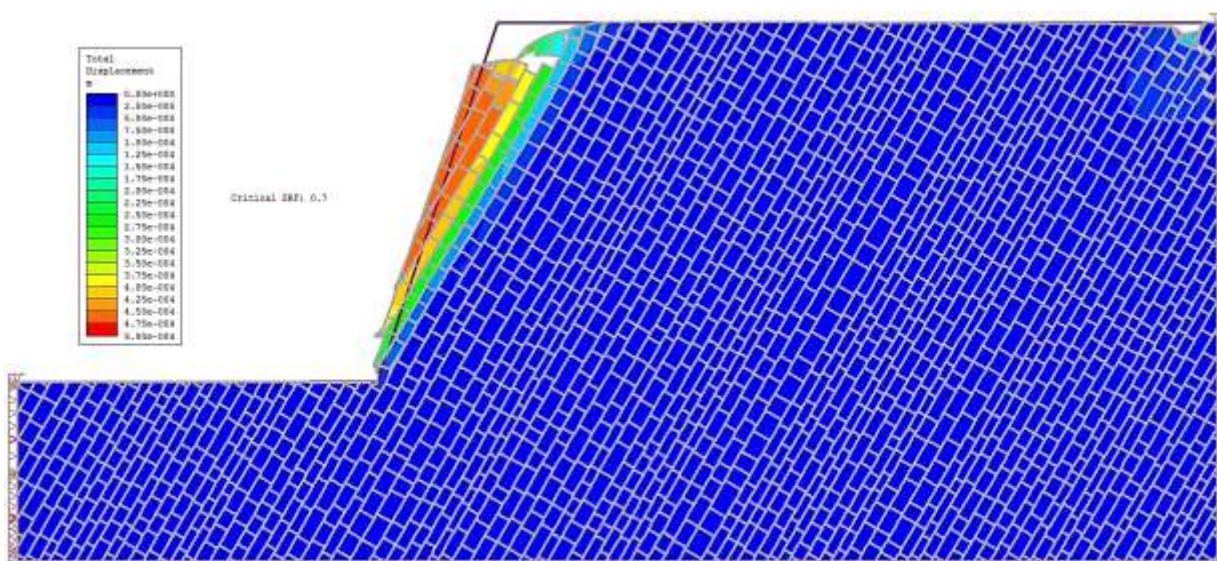
Εικόνα 4.31 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρηνούς ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



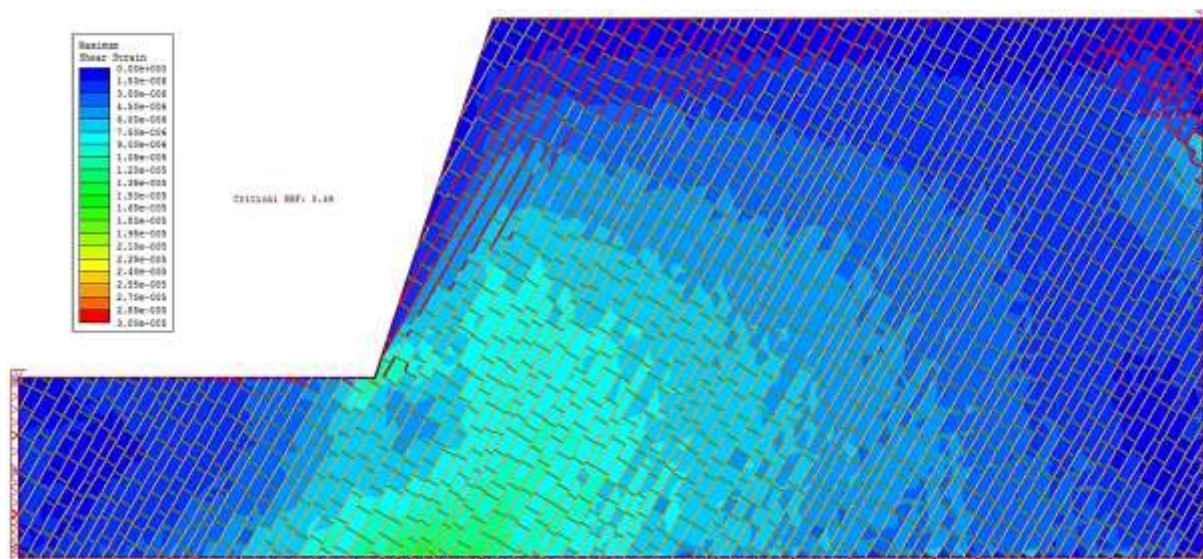
Εικόνα 4.32 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “κλειστά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρέυσει κατά την αστοχία



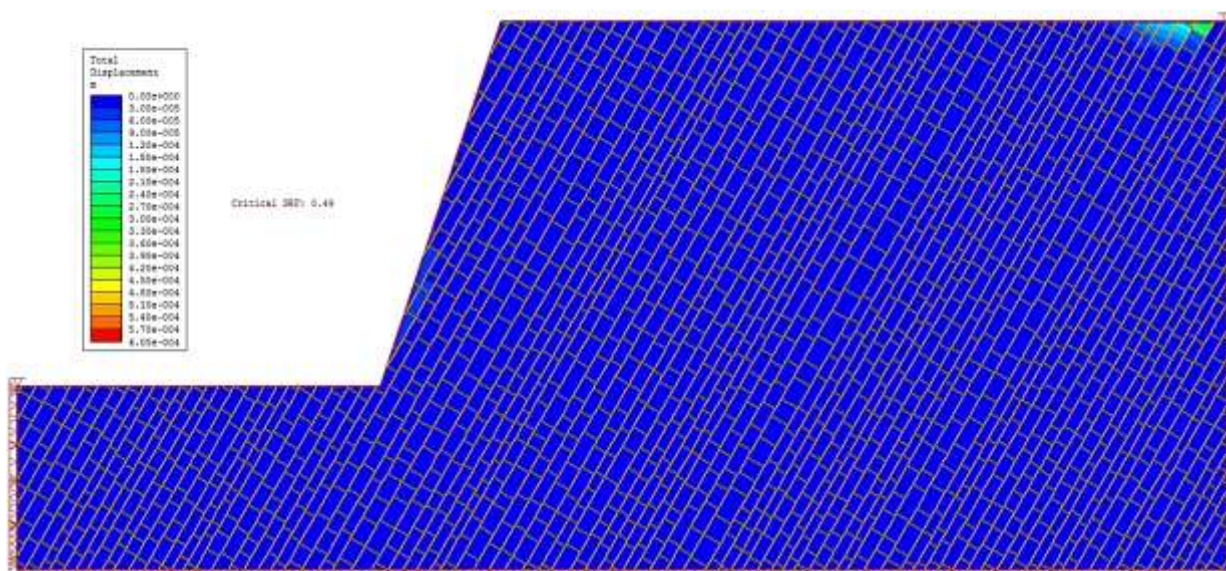
Εικόνα 4.33 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρανές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



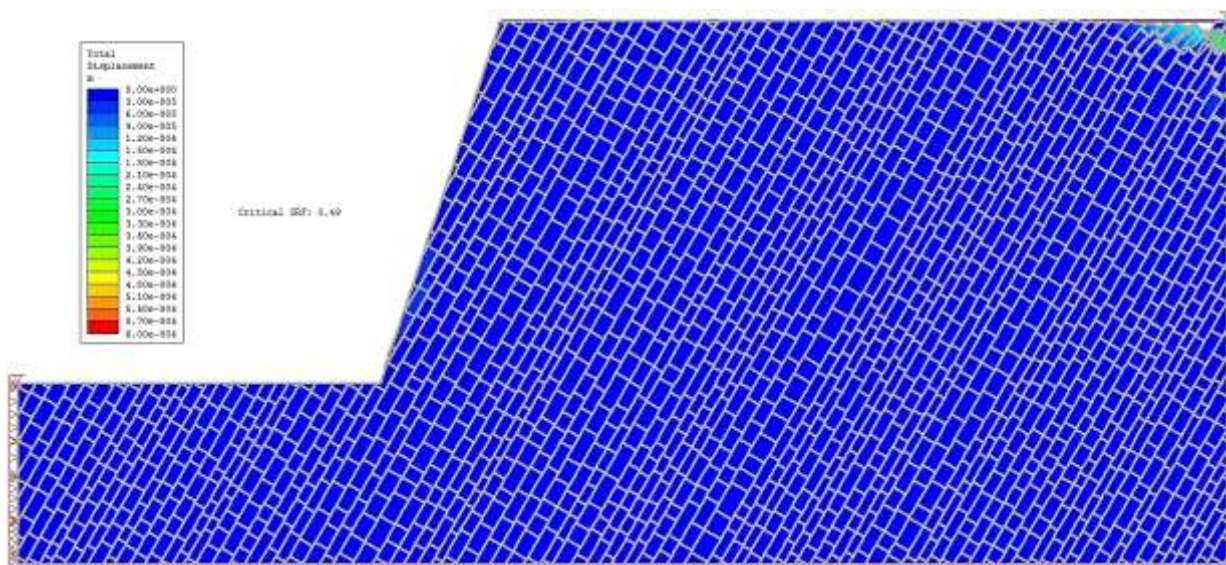
Εικόνα 4.34 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “κλειστά” άκρα κατά την αστοχία



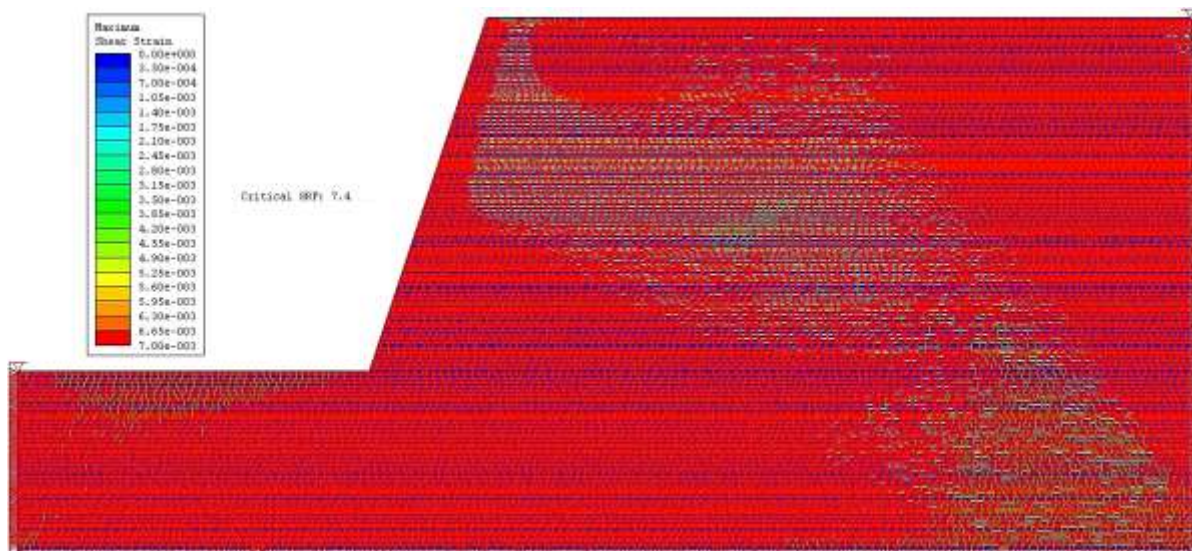
Εικόνα 4.35 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρηνές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “ανοικτά” άκρα και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία



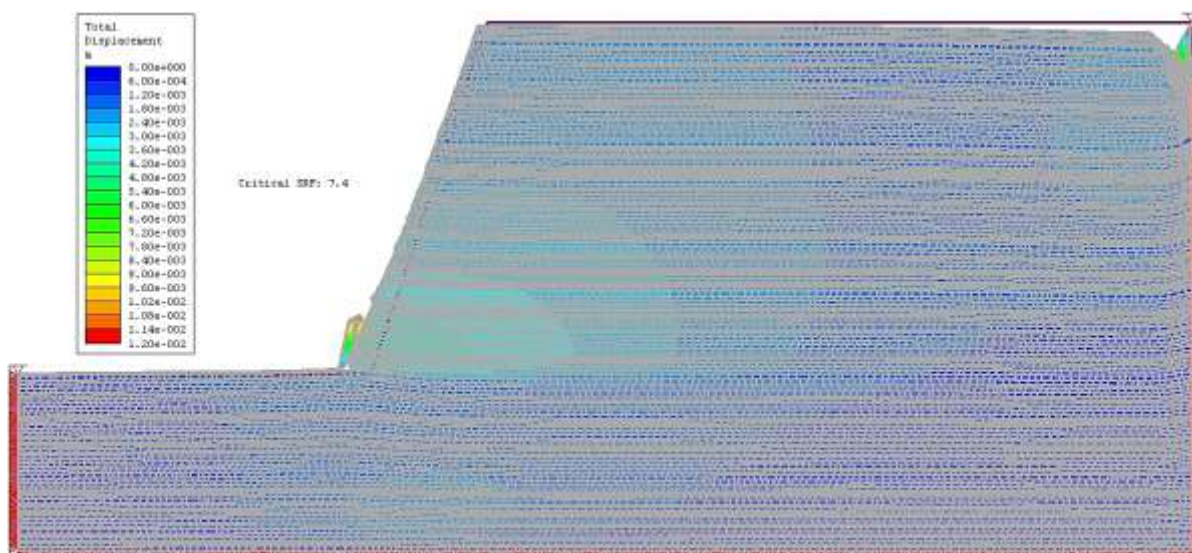
Εικόνα 4.36 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνές ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



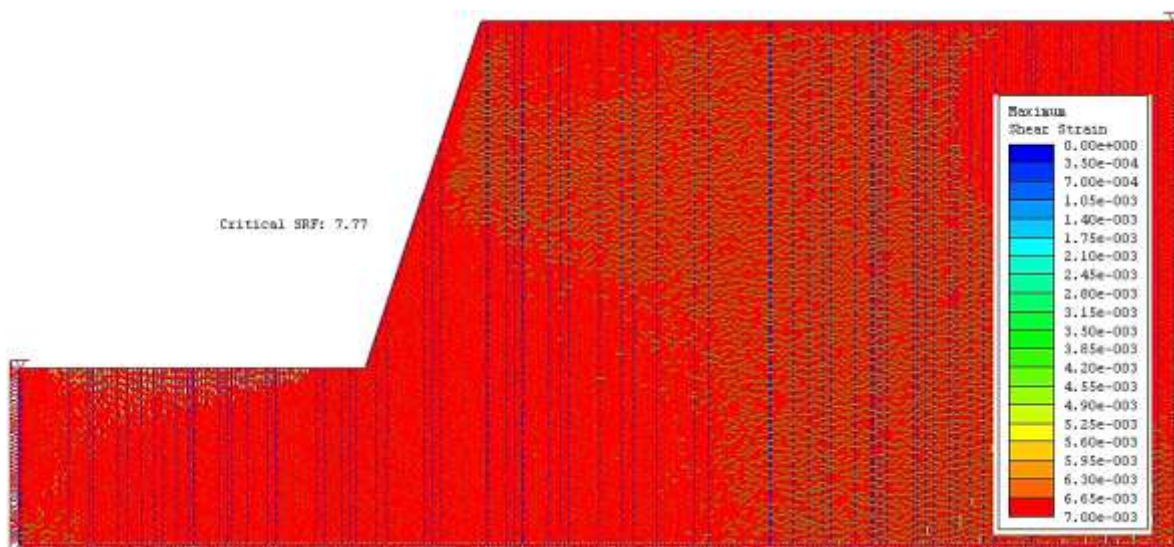
Εικόνα 4.37 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρηνούς ύψους 30.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° με “ανοικτά” άκρα κατά την αστοχία



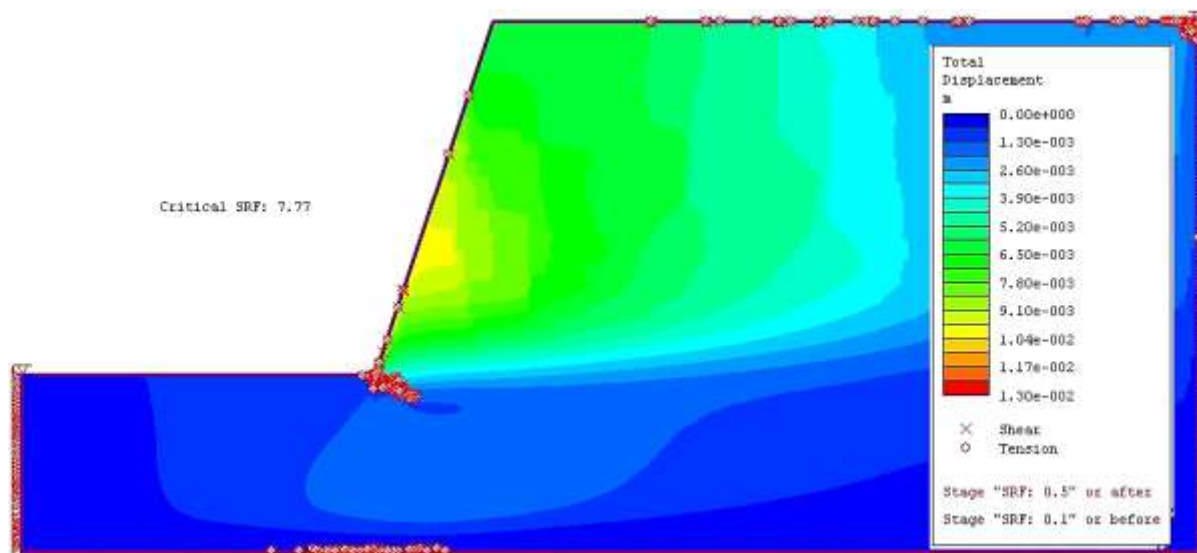
Εικόνα 4.38 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 0° και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία



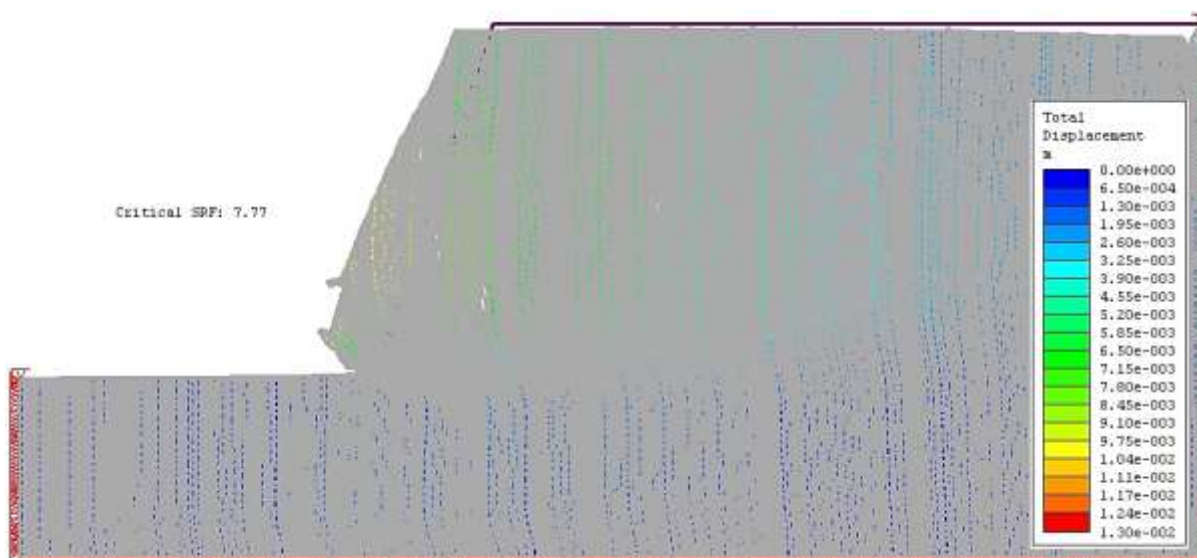
Εικόνα 4.39 : Συνολικές μετακινήσεις και παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 0° κατά την αστοχία



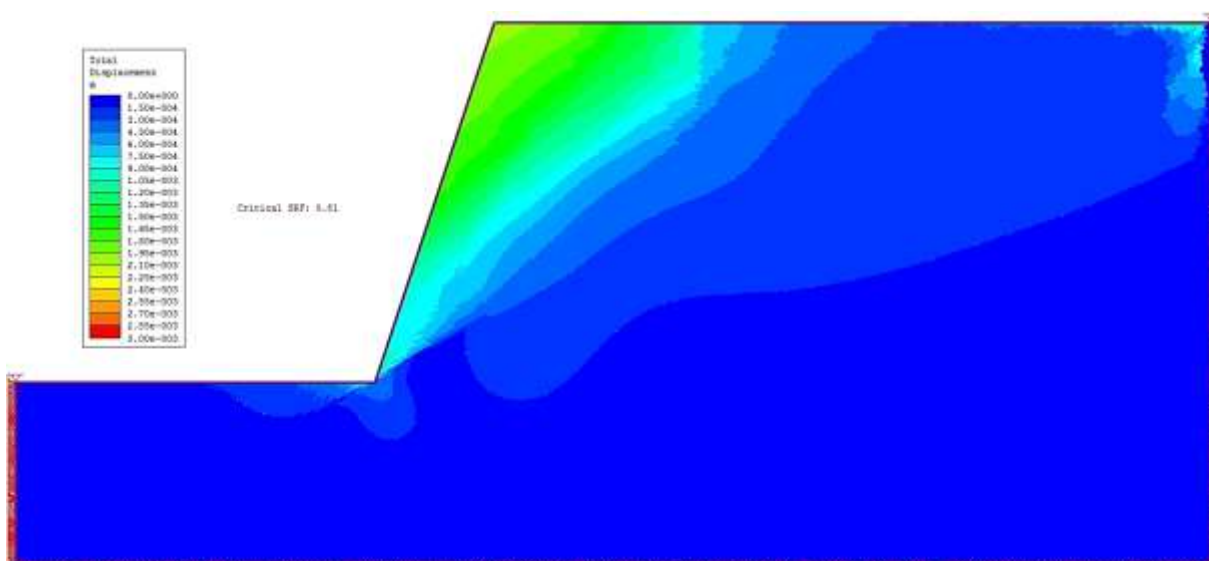
Εικόνα 4.40 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρανές ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 90° και ασυνέχειες που έχουν διαρρεύσει κατά την αστοχία



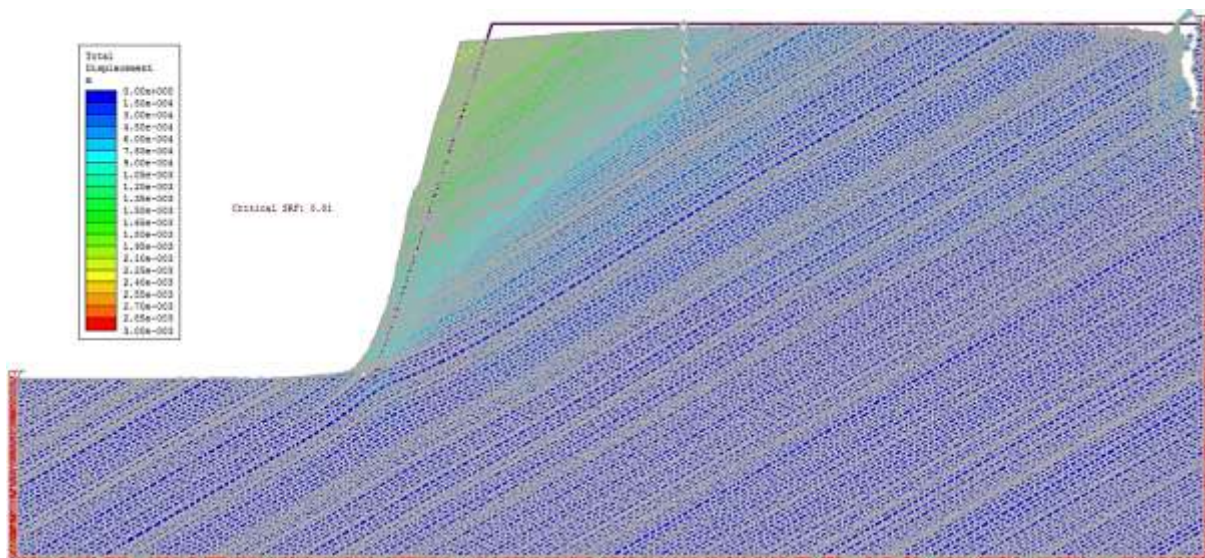
Εικόνα 4.41 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνές ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 90° και σημεία που έχουν διαρρέψει κατά την αστοχία



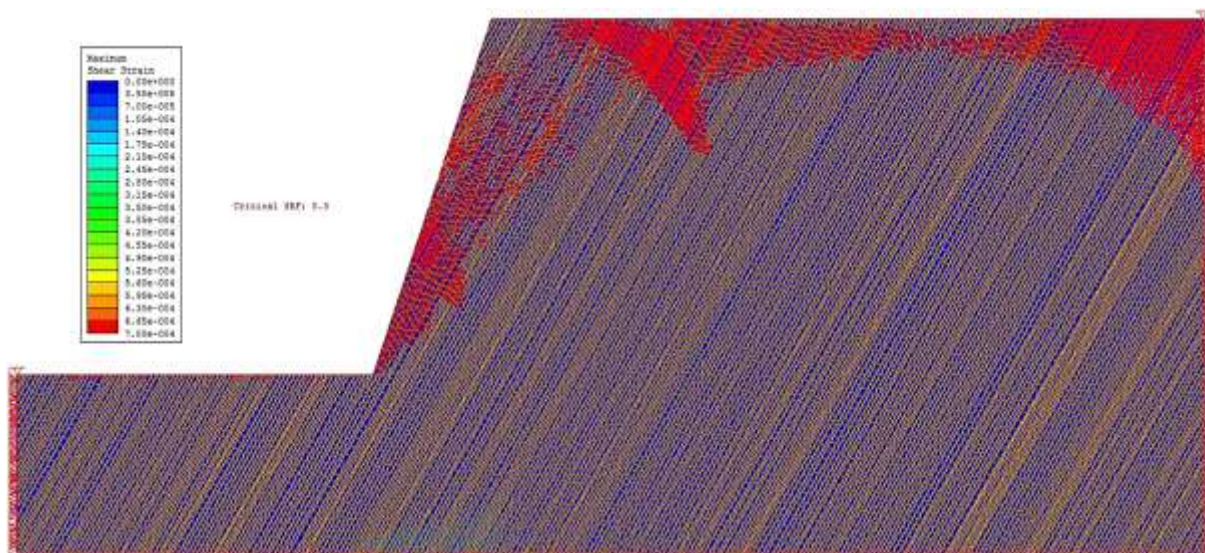
Εικόνα 4.42 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρηνούς ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 90° κατά την αστοχία



Εικόνα 4.43 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνές ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° κατά την αστοχία



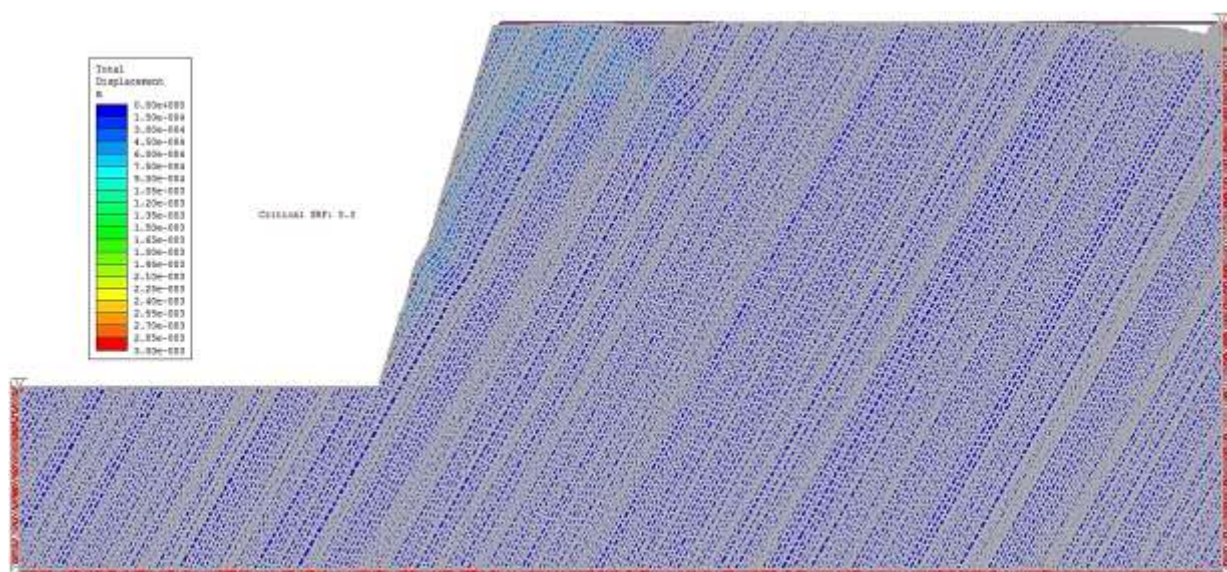
Εικόνα 4.44 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρηνός ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 30° κατά την αστοχία



Εικόνα 4.45 : Μέγιστες διατμητικές τροπές στο πρηνός ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° και ασυνέχειες που έχουν διαρρέυσει κατά την αστοχία



Εικόνα 4.46 : Συνολικές μετακινήσεις στο πρηνός ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° κατά την αστοχία



Εικόνα 4.47 : Παραμορφωμένο σχήμα του πρανούς ύψους 100.0m για γωνία του κύριου συστήματος ασυνεχειών 60° κατά την αστοχία

#### 4.4 Συμπερασματικά στοιχεία της ανάλυσης

Οι αναλύσεις είχαν ως σκοπό την μελέτη της επίδρασης της κλίμακας του έργου, της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών και των συνθηκών των άκρων τους στο μηχανισμό αστοχίας.

Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται πλήρως η μεγάλη επιρροή που ασκεί βασικά η **κλίμακα του έργου** στο μηχανισμό της αστοχίας. Στα πρανά μικρού ύψους (10.0m) η αστοχία εκδηλώνεται κυρίως με ολισθήσεις κατά μήκος ασυνεχειών. Με αύξηση της κλίμακας (30.0m) η αστοχία συνοδεύεται και από περιστροφικές κινήσεις, ενώ στα πρανά πολύ μεγάλου ύψους (100.0m) η αστοχία τείνει να έχει μορφή κύκλου ολίσθησης με την ευστάθεια να μην ελέγχεται τόσο από τις ασυνέχειες, αλλά από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος.

Η **γωνία κλίσης των ασυνεχειών** επηρεάζει, επίσης, τον μηχανισμό αστοχίας και ειδικά σε μεγάλες κλίμακες στις οποίες δυσμενείς συνδυασμοί προκαλούν ακόμη και άμεση αστοχία και κατάρρευση της μάζας του πρανούς. Ευμενέστερη είναι η περίπτωση οριζόντιων και κάθετων ασυνεχειών που δύσκολα αστοχεί και κατά την αστοχία έχουν διαρρεύσει σχεδόν στο σύνολό τους οι ασυνέχειες. Στις γωνίες αυτές είναι χαρακτηριστική η πιθανότητα εκδήλωσης αστοχίας με τη μορφή ανατροπών σε μεγάλες γωνίες κλίσης των ασυνεχειών (>80°).

Όσον αφορά τις **συνθήκες των άκρων των ασυνεχειών** είναι εμφανής η μεγάλη επιρροή του παράγοντα αυτού στα πρανά μικρής κλίμακας δεδομένου ότι τα “κλειστά” άκρα περιορίζουν τη σχετική κίνηση μεταξύ των μεμονωμένων τεμαχίων και οι μετακινήσεις αφορούν σχεδόν όλη τη μάζα του πρανούς. Επίσης, είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στην αστοχία πρανών με “κλειστά” άκρα ασυνεχειών εμπλέκεται μεγαλύτερος αριθμός ασυνεχειών που έχουν διαρρεύσει. Στα μεγάλα ύψη πρανών ο παράγοντας αυτός δεν επιφέρει καμιά αλλαγή στα αποτελέσματα και δεν επιβάλλεται να λαμβάνεται υπόψη.

Τέλος, πέραν του μηχανισμού αστοχίας, η κλίμακα του έργου επιδρά και στα μεγέθη των μετακινήσεων και των τροπών που εκδηλώνονται καθώς στα πρανά ύψους 10.0m είναι της τάξης του  $10^{-5}$  ενώ στα πρανά ύψους 100.0m είναι πολύ μεγαλύτερα, της τάξης του  $10^{-3}$ .





# Συμπεράσματα

Τα πετρώματα μπορούν να συμπεριφερθούν είτε ισότροπα είτε ανισότροπα ανάλογα με τη σύσταση και τον τρόπο γένεσής τους. Η βραχομάζα μπορεί και αυτή να συμπεριφέρεται είτε ισότροπα είτε ανισότροπα ανάλογα με τη δομή της. Καθοριστικός παράγοντας σε αυτό είναι το πλήθος και η γεωμετρία των ασυνεχειών, καθώς και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

Η ελαστική ανισότροπη συμπεριφορά περιλαμβάνει πολλές περιπτώσεις κατασταστικών μοντέλων. Οι δύο κυριότερες είναι η ορθότροπη και η εγκάρσια ισότροπη συμπεριφορά. Οι συμπεριφορές αυτές αυτές μπορούν να περιγράψουν ανισότροπα πετρώματα ή και βραχομάζες που περιέχουν λίγα και χαρακτηριστικά συστήματα ασυνεχειών.

Η **επιρροή της ανισοτροπίας** στη συμπεριφορά της βραχομάζας σε ένα γεωτεχνικό έργο μπορεί να είναι ισχυρή και όταν δε ληφθεί υπόψη μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα και σε υπερεκτίμηση των ιδιοτήτων της βραχομάζας. Έτσι, κατά την κατασκευή του έργου μπορούν να εκδηλωθούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τις αναμενόμενες και να εκδηλωθούν μη αναμενόμενες ασταθείς καταστάσεις.

Σημαντική είναι, επίσης, και η **επιρροή της κλίμακας**. Αυξανόμενης της γεωμετρικής κλίμακας ενός έργου αυξάνεται και ο αριθμός των περιεχόμενων ασυνεχειών, δηλαδή των επιπέδων αδυναμίας. Έτσι, η κλίμακα καθιστάται μια σημαντική παραμέτρος χαρακτηρισμού της συμπεριφοράς της βραχομάζας ως ισότροπης ή ανισότροπης και πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό καθώς επηρεάζει σε κάθε περίπτωση το μηχανισμό αστοχίας.

Όσον αφορά την ευστάθεια βραχωδών πρηνών έρευνα των τελευταίων χρόνων έχει οδηγήσει στη δυνατότητα προσομοίωσης και ανάλυσης τους με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τη τεχνική μείωσης της διατμητικής αντοχής (FEM – SSR). Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία η διατμητική αντοχή μειώνεται σταδιακά έως ότου επέλθει η αστοχία. Το ποσοστό μείωσης της διατμητικής αντοχής που επέφερε την αστοχία είναι ο συντελεστής ασφαλείας του εξεταζόμενου βραχώδους πρηνούς.

Με χρήση του προγράμματος Phase2 v8.0 της Rocscience εξετάστηκε η δυνατότητα της μεθόδου να προσομοιώσει και να εξετάσει προβλήματα ευστάθειας. Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε επιβεβαιώνονται πλήρως όλα τα παραπάνω στοιχεία με την κλίμακα να ασκεί τη μεγαλύτερη επιρροή στην ανάπτυξη του μηχανισμού αστοχίας. Η γωνία κλίσης των ασυνεχειών επηρεάζει, επίσης, τον μηχανισμό αστοχίας και ειδικά σε μεγάλες κλίμακες στις οποίες δυσμενείς συνδυασμοί προκαλούν ακόμη και άμεση αστοχία και κατάρρευση της μάζας του πρηνούς.

Το πρόγραμμα Phase2 v8.0 παρέχει, επιπλέον, τη δυνατότητα διαφοροποίησης των συνθηκών των άκρων των ασυνεχειών που περιέχονται στο μοντέλο ανάλυσης. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα “κλειστά” άκρα περιορίζουν τη σχετική κίνηση μεταξύ των μεμονωμένων τεμαχίων και οι μετακινήσεις αφορούν σχεδόν όλη τη μάζα του πρηνούς και εμπλέκουν μεγαλύτερο αριθμό ασυνεχειών κατά την αστοχία. Ο παράγοντας αυτός, ωστόσο, δεν είναι τόσο ουσιώδης στην περίπτωση πρηνών μεγάλης γεωμετρικής κλίμακας.

Η ανάλυση καταλήγει στο ότι ικανότητα της μεθόδου FEM – SSR να συνδυάζει άμεσα την ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών με την αστοχία άρρηκτου υλικού, να προσομοιώνει ευρύ φάσμα συμπεριφορών των πρηνών (ανατροπή, ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών, περιστροφικές αστοχίες κτλ.) και να εντοπίζει αυτόματα την κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας την καθιστά ικανή και ανταγωνιστική λύση στην προσομοίωση προβλημάτων ευστάθειας.

Ωστόσο, δεδομένου ότι κάθε μέθοδος παρουσιάζει τα θετικά και τα αρνητικά της στοιχεία κατά την επίλυση ενδέικνυται η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ δύο ή περισσότερων μεθόδων για να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό σχεδιαστικό αποτέλεσμα. Αυτό έχει ιδιαίτερη αξία στις μεγάλες κλίμακες στις οποίες είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθούν προβλέψεις σχετικά με την ευστάθεια των βραχωδών πρηνών και των αναμενόμενων τρόπων αστοχίας, καθώς η ευστάθεια στις περιπτώσεις αυτές δεν ελέγχεται μόνο από τις ασυνέχειες, τις ιδιότητες

τους και την κατανομή τους στο χώρο, αλλά και από τις ιδιότητες αντοχής και παραμορφωσιμότητας του άρρηκτου πετρώματος, την κατανομή των τάσεων και τις υδρογεωλογικές συνθήκες.

# Βιβλιογραφία

1. Α. Σοφινός, Π. Νομικός • 2008 • “Προχωρημένη Μηχανική των Πετρωμάτων” • ΕΜΠ – ΔΠΜΣ ΣΚΥΕ
2. Χαλακατεβάκης Νικόλαος • 2010 • Διδακτορική Διατριβή: “Αναλυτικός υπολογισμός κερματισμένης βραχώμαζας” • ΕΜΠ – Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών
3. Σταύρος Κ. Μπαντής • 2008 • “Τεχνική Γεωλογία” • Εκδόσεις GUTENBERG
4. Σταύρος Κ. Μπαντής • 2010 • “Βραχομηχανική Ι, Θεωρία & Εφαρμογές” • ΑΠΘ
5. Ιωάννης Κ. Κουκουβέλας • 2010 • “Τεκτονική Γεωλογία” • Εκδόσεις Leader Books
6. Walter Wittke • 2014 • “Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model” • Published by John Wiley & Sons
7. Azami A., Yacoub T. & Curran J. • 2012 • “Effects of Strength Anisotropy on the Stability of Slopes” • 65th Canadian Geotechnical Conference, CGS Geo-Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada
8. R.E. Hammah & T. Yacoub, J. Curran • 2009 • “Variation of Failure Mechanisms of Slopes in Jointed Rock Masses with Changing Scale” • 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto
9. Riahi A., Hammah E.R., Curran J.H. • 2010 • “Limits of Applicability of the Finite Explicit Joint Model in the Analysis of Jointed Rock Problems” • ARMA (American Rock Mechanics Association)
10. Rocscience • 2004 • “A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique” • Article prepared for RocNews, Summer 2004

