



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας με αναλυτικές
και αριθμητικές μεθόδους

Μαρία Ευαγγελία Στόγια

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας με αναλυτικές
και αριθμητικές μεθόδους

Μαρία Ευαγγελία Στόγια

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις .../10/2018:

Π. Νομικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Λουπασάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με θέμα «Υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους» εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Όλη η ερευνητική μελέτη πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του Ε.Μ.Π από τον Μάρτιο μέχρι τον Ιούλιο του 2018, υπό την επίβλεψη του κ. Π. Νομικού, Αν. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας υπήρξαν πολλοί άνθρωποι που με την συνεχή καθοδήγηση και τις συμβουλές τους, με οδήγησαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της και θα ήθελα να τους αναφέρω ξεχωριστά, εκφράζοντας την ευγνωμοσύνη μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, **κ.Παύλο Νομικό**, Αν. Καθηγ. Ε.Μ.Π., για την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος θέματος, για τις ανεκτίμητες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, αλλά και συνολικότερα για το ενδιαφέρον που μου ενέπνευσε το επιστημονικό αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στα μέλη του εργαστηρίου, **κ.Γιώργο Παπαντωνόπουλο** μέλος ΕΔΙΠ και **κ. Μιχαήλ Λοτίδη** ΥΔ για την άψογη συνεργασία και την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχαν.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, στους γονείς μου, **Κατερίνα και Κώστα** και στην αδερφή μου **Παναγιώτα**, για τη διαρκή τους στήριξη και το γεγονός ότι αποτέλεσαν για εμένα αστείρευτη πηγή έμπνευσης και ενθάρρυνσης όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις πεπερασμένων διαφορών με τον κώδικα FLAC 2D, όπου μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού ασυνεχειών σε ανισότροπη βραχώμαζα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αναλυτική επίλυση προσδιορισμού της αντοχής της βραχώμαζας με ασυνέχειες, με βάση τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας. Για τις ανάγκες των αριθμητικών προσομοιώσεων αξιοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα, ήτοι το μοντέλο Mohr Coulomb που εφαρμόστηκε στις ζώνες που αντιστοιχούν στο πέτρωμα και το μοντέλο Ubiquitous Joint το οποίο αντίστοιχα εφαρμόστηκε στις ζώνες που αντιπροσωπεύουν τις ασυνέχειες. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 8 σειρές παραμετρικών αναλύσεων, όπου οι δύο πρώτες περιλάμβαναν βραχώμαζα χωρίς ασυνέχειες, για τον έλεγχο του κώδικα, και οι υπόλοιπες 6 με ασυνέχειες, είτε σε όλο το μοντέλο είτε ως διακριτά επίπεδα. Σε κάθε σειρά πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις της ίδιας βραχομάζας με ασυνέχειες διαφορετικού προσανατολισμού έκαστη. Οι αντοχές του αριθμητικού υλικού που προέκυψαν σε κάθε σειρά αριθμητικών δοκιμών συγκρίθηκαν με τις αναλυτικές λύσεις προσδιορισμού αντοχής της βραχομάζας, επιβεβαιώνοντας ικανοποιητικά η μία μέθοδος την άλλη. Με το πέρας των εν λόγω προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον σειρά αριθμητικών αναλύσεων που περιελάμβανε 7 μοντέλα πρανούς όπου μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην ευστάθεια του πρανούς.

Abstract

In the present work numerical explicit finite difference simulations were performed with the FLAC 2D code, where the effect of the discontinuity orientation was studied on an anisotropic rock mass. The results of the simulations were compared with the analytical solution to determine the strength of the rock mass with discontinuities, based on the theory of the single plane of weakness. For the needs of numerical simulations two different constitutive models were used, namely the Mohr Coulomb model that applied applied to the zones corresponding to the intact rock and the Ubiquitous Joint model respectively applied to the zones representing the discontinuities. Altogether, eight sets of parametric analyses were performed, the first two containing a non-discontinuous rock mass for validating the code, and the remaining six with discontinuities, either across the model or as distinct planes. In each series 10 simulations of the same rock mass with different orientation of discontinuities were performed. The strength of the numerical material obtained in each set of numerical tests was compared to the analytical solutions for determining the strength of the rock mass. The numerical and analytical results were in good agreement. Finally, a further series of numerical analyses was carried out which included 7 rock slope models where the influence of the discontinuity orientation on the rock slope stability was examined.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα σχημάτων	1
Περιεχόμενα πινάκων	11
Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	12
Στόχοι διπλωματικής εργασίας	12
1 Θεωρητικό υπόβαθρο	14
1.1 Γενικά για τη βραχομάζα	14
1.1.1 Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας –Ορισμοί.....	14
1.1.2 Αναγκαιότητα εκτίμησης.....	15
1.1.3 Χαρακτηριστικές δομές βραχομάζας	15
1.2 Τεχνική περιγραφή των βραχωδών υλικών και μαζών	20
1.2.1 Αντοχή.....	20
1.2.2 Βραχομάζα χωρίς ασυνέχειες.....	22
1.2.3 Κερματισμένη βραχομάζα με ανισότροπη συμπεριφορά.....	30
1.3 Κατακερματισμένη βραχομάζα με ισότροπη συμπεριφορά.....	32
1.3.1 Γενικά.....	32
1.3.2 Αναλυτικές επιλύσεις	33
1.3.3 Κριτήρια αστοχίας – το κριτήριο Hoek - Brown.....	35
1.4 Σχολιασμός	38
1.4.1 Μειονεκτήματα των μεθοδολογιών.....	40
1.5 Πειραματική έρευνα σε κερματισμένα υλικά	42
1.5.1 Μονοαξονική δοκιμή- Δοκιμές των Goldstein et al. (1966) και Hayashi al. (1966) ..	42
1.5.2 Μονοαξονική Δοκιμή του Lama (1974).....	43
1.5.3 Μονοαξονικές Δοκιμές των Singh et al. (2002).....	44
1.5.4 Διαξονικές και τριαξονικές δοκιμές- Δοκιμές των Brown(1970), Brown & Trollope(1970), Brown & Hudson(1972).....	46
2 Μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης – Ο κώδικας FLAC2D	49
2.1 Αριθμητικές μέθοδοι.....	49
2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)	50
2.3 Μέθοδος διακριτών στοιχείων	54
2.4 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM)	56
2.5 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών στο πρόγραμμα FLAC	59
2.5.1 Γενικά.....	59
2.5.2 Εξισώσεις κίνησης και ισορροπίας.....	61
2.5.3 Διατύπωση των καταστατικών εξισώσεων	62
2.5.4 Περιγραφή Μοντέλου Ubiquitous Joint	64

3	Αναλυτικός υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας.....	67
3.1	Θεωρία μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας.....	67
3.2	Αριθμητική εφαρμογή.....	72
4	Αριθμητικός υπολογισμός αντοχής ανισότροπης βραχομάζας: προετοιμασία μοντέλων και αποτελέσματα.....	74
4.1	Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων.....	74
4.2	Σειρά U_{bJ1} -με πλευρική πίεση.....	76
4.2.1	Γωνία κλίσης 0°	76
4.2.2	Γωνία κλίσης 10°	78
4.2.3	Γωνία κλίσης 20°	79
4.2.4	Γωνία κλίσης 30°	81
4.2.5	Γωνία κλίσης 40°	82
4.2.6	Γωνία κλίσης 50°	84
4.2.7	Γωνία κλίσης 60°	85
4.2.8	Γωνία κλίσης 70°	87
4.2.9	Γωνία κλίσης 80°	88
4.2.10	Γωνία κλίσης 90°	90
4.3	U_{bj} χωρίς πλευρική πίεση.....	91
4.3.1	Γωνία κλίσης 0°	92
4.3.2	Γωνία κλίσης 10°	94
4.3.3	Γωνία κλίσης 20°	96
4.3.4	Γωνία κλίσης 30°	98
4.3.5	Γωνία κλίσης 40°	100
4.3.6	Γωνία κλίσης 50°	102
4.3.7	Γωνία κλίσης 60°	104
4.3.8	Γωνία κλίσης 70°	106
4.3.9	Γωνία κλίσης 80°	108
4.3.10	Γωνία κλίσης 90°	110
4.4	Σειρά 1joint-distance 0.1.....	112
4.4.1	Γωνία κλίσης 0°	113
4.4.2	Γωνία κλίσης 10°	115
4.4.3	Γωνία κλίσης 20°	116
4.4.4	Γωνία κλίσης 30°	118
4.4.5	Γωνία κλίσης 40°	120
4.4.6	Γωνία κλίσης 50°	121
4.4.7	Γωνία κλίσης 60°	123
4.4.8	Γωνία κλίσης 70°	125
4.4.9	Γωνία κλίσης 80°	127

4.4.10	<i>Γωνία κλίσης 90°</i>	129
4.5	<i>Σειρά I joint-distance 0.2</i>	131
4.5.1	<i>Γωνία κλίσης 0°</i>	132
4.5.2	<i>Γωνία κλίσης 10°</i>	134
4.5.3	<i>Γωνία κλίσης 20°</i>	136
4.5.4	<i>Γωνία κλίσης 30°</i>	138
4.5.5	<i>Γωνία κλίσης 40°</i>	140
4.5.6	<i>Γωνία κλίσης 50°</i>	141
4.5.7	<i>Γωνία κλίσης 60°</i>	144
4.5.8	<i>Γωνία κλίσης 70°</i>	146
4.5.9	<i>Γωνία κλίσης 80°</i>	148
4.5.10	<i>Γωνία κλίσης 90°</i>	150
4.6	<i>Σειρά I joint-distance 0.1 – ίδιες ιδιότητες</i>	152
4.6.1	<i>Γωνία κλίσης 0°</i>	153
4.6.2	<i>Γωνία κλίσης 10°</i>	155
4.6.3	<i>Γωνία κλίσης 20°</i>	157
4.6.4	<i>Γωνία κλίσης 30°</i>	159
4.6.5	<i>Γωνία κλίσης 40°</i>	160
4.6.6	<i>Γωνία κλίσης 50°</i>	162
4.6.7	<i>Γωνία κλίσης 60°</i>	163
4.6.8	<i>Γωνία κλίσης 70°</i>	165
4.6.9	<i>Γωνία κλίσης 80°</i>	168
4.6.10	<i>Γωνία κλίσης 90°</i>	169
4.7	<i>Σειρά I joint-distance 0.2 – ίδιες ιδιότητες</i>	171
4.7.1	<i>Γωνία κλίσης 0°</i>	172
4.7.2	<i>Γωνία 10°</i>	174
4.7.3	<i>Γωνία κλίσης 20°</i>	175
4.7.4	<i>Γωνία κλίσης 30°</i>	176
4.7.5	<i>Γωνία κλίσης 40°</i>	178
4.7.6	<i>Γωνία κλίσης 50°</i>	179
4.7.7	<i>Γωνία κλίσης 60°</i>	181
4.7.8	<i>Γωνία κλίσης 70°</i>	183
4.7.9	<i>Γωνία κλίσης 80°</i>	185
4.7.10	<i>Γωνία κλίσης 90°</i>	186
4.8	<i>Συμπεράσματα αριθμητικών προσομοιώσεων</i>	188
5	<i>Εφαρμογή στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός βραχώδους πρανούς</i>	192
5.1	<i>Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων</i>	192
5.2	<i>Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων</i>	193

5.2.1	Γωνία κλίσης 0°	193
5.2.2	Γωνία κλίσης 10°	194
5.2.3	Γωνία κλίσης 30°	194
5.2.4	Γωνία κλίσης 45°	195
5.2.5	Γωνία κλίσης 65°	197
5.2.6	Γωνία κλίσης 75°	198
5.2.7	Γωνία κλίσης 90°	199
5.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	200
6	Συμπεράσματα	202

Περιεχόμενα σχημάτων

Σχήμα 1 Απόψεις στρωσιγενών σχηματισμών	18
Σχήμα 2 Οι κυριότεροι τύποι ρηγμάτων	18
Σχήμα 3 Κατοπτρικές επιφάνειες ρηγμάτων	18
Σχήμα 4 Διακλάσεις που αποκαλύπτονται στις επιφάνειες βραχωδών πρηνών.....	19
Σχήμα 5 Διατύπωση του κριτηρίου Mohr – Coulomb, αριστερά σε επίπεδο ορθών και διατμητικών τάσεων, δεξιά σε επίπεδο κυρίων τάσεων.	25
Σχήμα 6 Καμπύλες περιβάλλουσες Mohr σε γρανίτη και ασβεστόλιθο (Hoek, 1983)	27
Σχήμα 7 Η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Hoek – Brown (Hoek, 1983).....	29
Σχήμα 8 Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση (από Hudson and Harrison, 1997).....	30
Σχήμα 9 Δοκιμές σε τραχείες επιφάνειες ασυνεχειών (Patton, 1966).....	31
Σχήμα 10 Συσχέτιση αντοχής βραχομάζας – αντοχής άρρηκτου υλικού με το μέγεθος του άρρηκτου τεμάχους (Goldstein et al., 1966).....	42
Σχήμα 11 Τύποι φυσικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Lama,1974).....	43
Σχήμα 12 Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμών (Lama, 1974)	44
Σχήμα 13 Φυσικά δοκίμια ρωγματωμένης βραχομάζας Τύπου A (Singh et al., 2002)	44
Σχήμα 14 Μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμών (Singh et al., 2002)	45
Σχήμα 15 Συσχέτιση βαθμού αλληλοεμπλοκής με την αντοχή των δοκιμών (Singh et al.,2002) ...	46
Σχήμα 16 Γεωμετρία δοκιμών που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)	46
Σχήμα 17 Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμών που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)	47
Σχήμα 18 Τυπική σχηματική απεικόνιση διακριτοποίησης στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	51
Σχήμα 19 Σχηματική απεικόνιση διακριτών άρρηκτων στοιχείων και δυνάμεων στις επαφές (Itasca 2009).....	55
Σχήμα 20 Η συνάρτηση $f(x)$ και τα σημεία k , $k-1$ και $k+1$	57
Σχήμα 21 Απλός κάνναβος πεπερασμένων διαφορών (Beaty and Byrne, 1999).....	58
Σχήμα 22 Μοντέλο βραχομάζας γύρω από σήραγγα και διαχωρισμός της σε στοιχεία στο πρόγραμμα FLAC.	60
Σχήμα 23 Διάγραμμα ροής του κύκλου υπολογισμών που πραγματοποιείται στο FLAC.....	61
Σχήμα 24 Εφαρμογή δύναμης $F=F(t)$ σε μάζα m , που προκαλεί τη μονοδιάστατη κίνηση της μάζας.	62
Σχήμα 25 Παρουσία διεύθυνσης ασυνέχειας με κλίση θ σε υλικό Mohr – Coulomb στο αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων (x,y,x',y')	64
Σχήμα 26 Κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας στο λογισμικό FLAC.....	65
Σχήμα 27 (α) Βραχομάζα με ένα σύνολο ασυνεχειών. (β) Τμήμα της βραχομάζας που φορτίζεται με κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 . (γ) Η κάθετος στην ασυνέχεια σχηματίζει γωνία ω με τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. (δ) Ορθές και διατμητικές τάσεις στο επίπεδο της ασυνέχειας. (Νομικός 2015).....	68
Σχήμα 28 Μεταβολή του προσανατολισμού του εντατικού πεδίου (Νομικός 2015).	69
Σχήμα 29 Λόγος σ_1/σ_3 για να συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια συναρτήσει της γωνίας ω σύμφωνα με την εξίσωση 37.	70
Σχήμα 30 Γραφική παράσταση αντοχής άρρηκτου πετρώματος σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την εξίσωση 39.	70
Σχήμα 31 Γραφική παράσταση της μεταβολής της αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την Εξίσωση 40.	71

Σχήμα 32 Γραφική παράσταση της μεταβολής της μονοαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων σ_1 - ω	72
Σχήμα 33 Γραφική παράσταση της μεταβολής της τριαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων σ_1 - ω για πλευρική πίεση 10 MPa.....	73
Σχήμα 34 Γεωμετρία αριθμητικού μοντέλου.....	74
Σχήμα 35 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	77
Σχήμα 36 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	77
Σχήμα 37 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	77
Σχήμα 38 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	78
Σχήμα 39 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	78
Σχήμα 40 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	79
Σχήμα 41 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	79
Σχήμα 42 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	80
Σχήμα 43 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	80
Σχήμα 44 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	81
Σχήμα 45 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	81
Σχήμα 46 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	82
Σχήμα 47 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	82
Σχήμα 48 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	83
Σχήμα 49 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	83
Σχήμα 50 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	84
Σχήμα 51 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	84
Σχήμα 52 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	85
Σχήμα 53 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	85
Σχήμα 54 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	86
Σχήμα 55 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	86
Σχήμα 56 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	87
Σχήμα 57 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	87

Σχήμα 86 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	102
Σχήμα 87 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	103
Σχήμα 88 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	103
Σχήμα 89 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	104
Σχήμα 90 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	105
Σχήμα 91 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	105
Σχήμα 92 Διάγραμμα μετακινήσεων	106
Σχήμα 93 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	106
Σχήμα 94 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	107
Σχήμα 95 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	107
Σχήμα 96 Διάγραμμα μετακινήσεων	108
Σχήμα 97 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	108
Σχήμα 98 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	109
Σχήμα 99 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	109
Σχήμα 100 Διάγραμμα μετακινήσεων	110
Σχήμα 101 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	110
Σχήμα 102 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	111
Σχήμα 103 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	111
Σχήμα 104 (α) Γεωμετρία αριθμητικού μοντέλου σειράς 1joint-distance 0.1 όπου παρατηρείται η προσομοίωση μίας ασυνέχειας με κλίση 60° , (β) Μεγέθυνση των ζωνών σε μία περιοχή πλησίον της ασυνέχειας.	113
Σχήμα 105 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	114
Σχήμα 106 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	114
Σχήμα 107 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	115
Σχήμα 108 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	115
Σχήμα 109 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	116
Σχήμα 110 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	116
Σχήμα 111 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).....	117

Σχήμα 237 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.	187
Σχήμα 238 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	187
Σχήμα 239 Σύγκριση αποτελεσμάτων 3 ^{ης} σειράς αριθμητικών μοντέλων με τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας (βλ. Κεφ. 3).....	189
Σχήμα 240 Σύγκριση αποτελεσμάτων 4 ^{ης} σειράς αριθμητικών μοντέλων με τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας (βλ. Κεφ. 3).....	190
Σχήμα 241 Σύγκριση αποτελεσμάτων 5 ^{ης} , 7 ^{ης} , 8 ^{ης} σειράς αριθμητικών μοντέλων με τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας (βλ. Κεφ. 3).....	191
Σχήμα 242 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου.	193
Σχήμα 243 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	193
Σχήμα 244 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του πρανούς.	194
Σχήμα 245 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	194
Σχήμα 246 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του πρανούς.	194
Σχήμα 247 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	195
Σχήμα 248 Εικόνα μετακινήσεων.....	195
Σχήμα 249 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.	195
Σχήμα 250 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	196
Σχήμα 251 Εικόνα μετακινήσεων.....	196
Σχήμα 252 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.	197
Σχήμα 253 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	197
Σχήμα 254 Εικόνα μετακινήσεων.....	197
Σχήμα 255 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.	198
Σχήμα 256 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	198
Σχήμα 257 Εικόνα μετακινήσεων.....	198
Σχήμα 258 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.	199
Σχήμα 259 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	199
Σχήμα 260 Εικόνα μετακινήσεων.....	200

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1 Ταξινόμηση του άρρηκτου πετρώματος σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (Marinos and Hoek, 2000).....	20
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές δομές βραχομάζας (Hoek, 1983).....	21
Πίνακας 3 Κριτήρια αστοχίας άρρηκτου πετρώματος (Hudson and Harrison, 1997)	24
Πίνακας 4 Εκτίμηση της παραμέτρου m_i (Marinos and Hoek, 2000).....	28
Πίνακας 5 Τάσεις σε απειροστό στοιχείο σύμφωνα με την κλασσική θεωρία ελαστικότητας και την θεωρία Cosserat (Χαλακατεβάκης,2010).	35
Πίνακας 6 Το σύστημα GSI (Marinos and Hoek, 2000).....	38
Πίνακας 7 Μηχανισμοί αστοχίας για το δοκίμιο Τύπου A (Singh et al., 2002)	45

Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της ανισοτροπίας της αντοχής της βραχομάζας, η οποία είναι καθοριστική για την ανάλυση της συμπεριφοράς γεωτεχνικών κατασκευών και ειδικότερα εκείνων που η αστοχία τους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία διακριτών επιπέδων αδυναμίας της βραχομάζας, όπως για παράδειγμα στην ευστάθεια βραχωδών πρανών. Η επίδραση της ανισοτροπίας της βραχομάζας στην αντοχή της μελετάται αρχικά αναλυτικά, με τη χρήση της θεωρίας του μεμονωμένου επιπέδου ασυνέχειας, και στη συνέχεια αριθμητικά με προσομοίωση. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του προγράμματος αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων διαφορών **FLAC** της Itasca SA για ανάλυση της συμπεριφοράς γεωτεχνικών κατασκευών σε πετρώματα. Στον κώδικα FLAC η ανισοτροπία προσομοιώθηκε με τη χρήση του μοντέλου Ubiquitous joint με ένα σύστημα ασυνεχειών με εναλλαγές της γεωμετρίας τους.

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 βραχομάζας.
- Ανάλυση της ευστάθειας βραχωδών πρανών με διάφορα συστήματα ασυνεχειών με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και χρήση του κώδικα FLAC2D.

1 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Γενικά για τη βραχομάζα

1.1.1 Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας –Ορισμοί

Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας νοείται η απόκριση της βραχομάζας κατά την αλλαγή της εντατικής κατάστασης στην οποία βρίσκεται. Η αλλαγή αυτή μπορεί να οφείλεται είτε σε επιβολή εξωτερικών φορτίων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τη θεμελίωση κάποιου έργου, είτε σε ανακατανομή του τασικού πεδίου, όπως συμβαίνει κατά την εκσκαφή υπόγειων ανοιγμάτων. Τέλος, αλλαγή του εντατικού πεδίου μπορεί να προκληθεί από την αλλαγή κάποιων χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος του πετρώματος, όπως για παράδειγμα μεταβολή της θερμοκρασίας ή αλλαγή του υδραυλικού καθεστώτος. Η αντοχή της βραχομάζας ορίζεται ως η ικανότητα της να ανθίσταται στις φορτίσεις που δέχεται.

Οι παράμετροι που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας είναι η αντοχή της, η παραμορφωσιμότητα, η σκληρότητα, η εκσκαψιμότητα κλπ. Η αντοχή της βραχομάζας ορίζεται ως η ικανότητα της να ανθίσταται στις φορτίσεις που δέχεται. Η ποικιλία των εντατικών καταστάσεων αλλά και το πλήθος των δομών της βραχομάζας είναι τέτοια, ώστε να αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας άρα σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται έλεγχος της κρίσιμης κάθε φορά αντοχής. Στην πράξη, τρία είδη αντοχών της βραχομάζας υπολογίζονται: αντοχή σε θλίψη, σε εφελκυσμό και σε διάτμηση. Η αντοχή της βραχομάζας εξαρτάται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, την αντοχή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και από την παρουσία νερού. Διάκριση επίσης γίνεται ανάλογα με τον βαθμό περιορισμού της βραχομάζας. Με την αύξηση του περιορισμού, επιβολή δηλαδή πλευρικής πίεσης έτσι ώστε να δημιουργούνται τριαξονικές συνθήκες φόρτισης, οι αντοχές γενικά αυξάνονται.

Η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας αναφέρεται στον υπολογισμό των προκαλούμενων παραμορφώσεων της βραχομάζας οι οποίες εκδηλώνονται είτε άμεσα είτε είναι χρονικά εξελισσόμενες (φαινόμενα ερπυσμού). Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να εκτιμηθούν ποικίλλουν ανάλογα με το είδος και τις απαιτήσεις του έργου που σχεδιάζεται αλλά και ανάλογα με την δομή και την συμπεριφορά της βραχομάζας. Για τις συνήθεις αναλύσεις, η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας χαρακτηρίζεται από μια παράμετρο, η οποία συσχετίζει

το φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτήν με την προκαλούμενη μετατόπιση (μέτρο ελαστικότητας) καθώς και από το λόγο του Poisson. Το γεγονός ότι η ρωγματομένη βραχομάζα δεν συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά, έχει οδηγήσει στην χρήση του μέτρου παραμορφωσιμότητας αντί του μέτρου ελαστικότητας.

1.1.2 Αναγκαιότητα εκτίμησης

Η βραχομάζα είναι το υλικό εντός του οποίου αναπτύσσονται οι δραστηριότητες που εξετάζονται από την μηχανική των πετρωμάτων. Ως δραστηριότητες αναφέρονται οι υπόγειες εκσκαφές για τεχνικούς ή μεταλλευτικούς σκοπούς, οι επιφανειακές εκσκαφές και η ευστάθεια των πρανών, οι θεμελιώσεις κλπ. Είναι φανερό ότι ο ασφαλής και οικονομικός σχεδιασμός των δραστηριοτήτων αυτών προϋποθέτει την σωστή εκτίμηση των παραμέτρων που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Ο όρος εκτίμηση αναφέρεται στην ποσοτική και όχι στην ποιοτική περιγραφή των παραμέτρων αυτών.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεγάλων αστοχιών είναι η αστοχία της θεμελίωσης του τοξωτού φράγματος Malpasset στη Γαλλία τον (Δεκέμβριο του 1959, η οποία προκάλεσε πλημμύρα στα κατάντη και είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 450 ανθρώπων. Τον Οκτώβριο του 1963, περίπου 2500 άνθρωποι σκοτώθηκαν εξαιτίας μιας κατολίσθησης στον ταμιευτήρα του φράγματος Vajont στην Ιταλία. Τέλος, το 1960, κατάρρευση στύλων σε ανθρακωρυχείο στη Νότια Αφρική είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 432 ατόμων. Οι αστοχίες αυτές έστρεψαν το ενδιαφέρον των μηχανικών στο πέτρωμα και έτσι αναγνωρίστηκε η αναγκαιότητα της μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς του.

1.1.3 Χαρακτηριστικές δομές βραχομάζας

Η δημιουργία των πετρωμάτων οφείλεται στις διάφορες ενδογενείς και εξωγενείς γεωλογικές διεργασίες. Ως ενδογενείς διεργασίες αναφέρονται αυτές οι οποίες συμβαίνουν στο εσωτερικό της γης, όπως για παράδειγμα η ηφαιστειότητα, ενώ οι εξωγενείς διεργασίες είναι αυτές που δρουν έξω από τον φλοιό της γης, όπως για παράδειγμα η κίνηση του νερού. Οι ενδογενείς δυνάμεις συντελούν στην άνοδο και διείδυση ή έκχυση του μάγματος στην επιφάνεια της γης. Αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας είναι η δημιουργία των εκρηξιγενών πετρωμάτων. (διάκριση των εκρηξιγενών πετρωμάτων γίνεται ανάλογα με το που συντελείται η πήξη του μάγματος. Εάν αυτή πραγματοποιείται μέσα στον φλοιό, δημιουργούνται

πλουτώνια εκρηξιγενή πετρώματα ενώ εάν πραγματοποιείται στην επιφάνεια της γης, σχηματίζονται ηφαιστειακά εκρηξιγενή πετρώματα.

Τα πετρώματα που βρίσκονται στην επιφάνεια αποσαθρώνονται υπό την επίδραση εξωγενών μορφογενετικών παραγόντων και σχηματίζονται ιζήματα. Τα ιζήματα αποτίθενται σε διαδοχικά στρώματα στην επιφάνεια του φλοιού της γης. Η διαδοχική απόθεση στρωμάτων αναγκάζει τα υποκείμενα στρώματα να βυθίζονται και με την πάροδο του χρόνου σχηματίζονται ιζήματα μεγάλου πάχους και τελικά ιζηματογενή πετρώματα. Τέλος, όταν τα πετρώματα του φλοιού, εκρηξιγενή και ιζηματογενή, βρεθούν για οποιοδήποτε λόγο σε θέσεις στις οποίες οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας είναι μεγάλες, τότε λαμβάνουν χώρα ιστολογικές αλλαγές και μεταβάλλεται η ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μεταμόρφωση και τα πετρώματα που προκύπτουν λέγονται μεταμορφωμένα.

Οι τεκτονικές δομές διακρίνονται σε ρήγματα, πτυχές, επίπεδα στρώσης και διακλάσεις. Τα ρήγματα συνιστούν επίπεδα θραύσης κατά μήκος των οποίων έχει σημειωθεί μετακίνηση. Κατά μήκος της επιφάνειας διάρρηξης των μεγάλων ρηγμάτων δημιουργείται τεκτονικό λατυποπαγές (συνεκτικό πέτρωμα από θραύσματα του ίδιου πετρώματος) και σε περίπτωση εντονότερου θρυμματισμού, ζώνη μυλωνιτώσης (λεπτόκοκκο υλικό). Οι πτυχές είναι αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των πετρωμάτων και παρατηρούνται στα ιζηματογενή και στα μεταμορφωμένα πετρώματα (Καλλέργης και Κούκης, 1985).

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

- **Σχισμός**

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα πολλών κρυσταλλικών σωμάτων είναι ο σχισμός, 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. 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 διατμητικών τάσεων προσδίδοντας στο πέτρωμα τη σχιστοφυή υφή του.

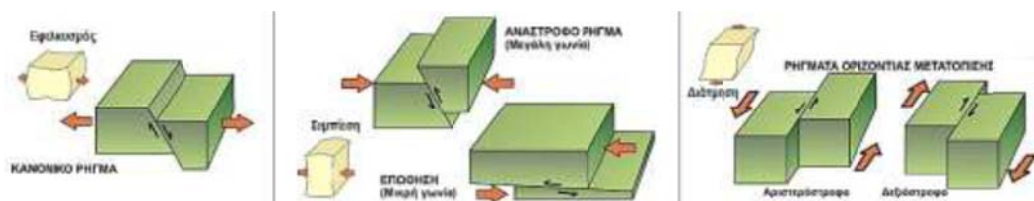
Τα σχιστολιθικά πετρώματα παρουσιάζουν μέγιστη αντοχή σε θλίψη όταν η διεύθυνση των φορτίων είναι κάθετη προς τα επίπεδα σχιστότητας και ελάχιστη αντοχή όταν τα φορτία εφαρμόζονται υπό γωνία $45^\circ + \phi/2$ προς αυτά, όπου ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος. Γενικώς, τα επίπεδα σχιστότητας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

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 εμμόνης.



Σχήμα 1 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 άλλους τύπους 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 2 Οι κυριότεροι τύποι ρηγμάτων



Σχήμα 3 Κατοπτρικές επιφάνειες ρηγμάτων

Οι **διακλάσεις** αποτελούν επίπεδα θραύσης κατά μήκος των οποίων δεν έχει σημειωθεί μετακίνηση. Σχηματίζονται κατά την διαγένεση (στα ιζηματογενή πετρώματα), κατά την ψύξη (στα εκρηξιγενή) ή από την επίδραση τεκτονικών δυνάμεων (σε όλα τα πετρώματα). Διακρίνονται σε οικογένειες ή συστήματα, όταν εμφανίζονται με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Τα επίπεδα στρώσης διαχωρίζουν το πέτρωμα σε διάφορα στρώματα και εμφανίζονται έντονα στα ιζηματογενή πετρώματα. Πρόκειται συνήθως για επίπεδα αδυναμίας με μεγάλη εμμόνη και αποτελούν επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής σε σχέση με το άρρηκτο πέτρωμα.



Σχήμα 4 Διακλάσεις που αποκαλύπτονται στις επιφάνειες βραχωδών πρανών

Παράγοντας πολύ καθοριστικός στην δομή της βραχομάζας είναι η παλαιογεωγραφική εξέλιξη και αποσάθρωση του. Η αποσάθρωση προκύπτει από φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες και επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το κλίμα. Η φυσική αποσάθρωση συμβαίνει κυρίως σε περιοχές με έντονη θερμοκρασιακή διακύμανση. Η επαναλαμβανόμενη αλλαγή περιόδων με παγετό και τήξη δημιουργεί αντίστοιχα θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις οι οποίες συμβάλλουν στην προοδευτική διεύρυνση των ρωγμών και την καταστροφή της δομής του πετρώματος. Η χημική αποσάθρωση οδηγεί στην εξαλλοίωση των ορυκτών και στη διάλυση του πετρώματος. Παράγοντες όπως η οξειδωση, η υδρόλυση και η ενυδάτωση συμβάλλουν σημαντικά στην εξαλλοίωση ενώ η παρουσία όξινων ή αλκαλικών νερών επηρεάζει την διάλυση των πετρωμάτων (Καλλέργης και Κούκης, 1985).

1.2 Τεχνική περιγραφή των βραχωδών υλικών και μαζών

1.2.1 Αντοχή

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

Προκαταρκτική εκτίμηση των παραμέτρων αυτών μπορεί να γίνει σε σχέση με το είδος του πετρώματος. Ο *Error! Reference source not found.* παρουσιάζει επτά κατηγορίες πετρωμάτων, ανάλογα με την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη. Η αντοχή μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά είτε με τις οδηγίες για την επιτόπου εκτίμηση είτε με βάση τον τύπο του πετρώματος. Η κατηγορία R0 είναι η ασθενέστερη, με αντοχή <1 MPa και ουσιαστικά πρόκειται για εδαφικά υλικά. Η ισχυρότερη κατηγορία είναι η R6 με αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη >250 MPa.

Πίνακας 1 Ταξινόμηση του άρρηκτου πετρώματος σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (Marinos and Hoek, 2000)







ΒΑΘΜΟΣ *	ΟΡΙΣΜΟΣ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ (MPa)	ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (MPa)	ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
R6	Υπερβολικά δυνατή	> 250	> 10	Τα δείγματα μπορούν να κοπούν σε "φέτες" μόνο με γεωλογικό σφυρί.	Φρέσκος βασάλτης, χαλαζας, διαβάσης, γνεύσιος, γρανίτης, κερατόλιθος
R5	Πολύ δυνατή	100 - 250	4 - 10	Τα δείγματα χρειάζονται πολλά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί για να θραυτούν.	Αμφιβολίτης, ψαμμίτης, βασάλτης, γάββρος, γνεύσιος, γρανοδορίτης, περιδοσίτης, ρυολίτης, τόφφος
R4	Δυνατή	50 - 100	2 - 4	Τα δείγματα χρειάζονται περισσότερα του ενός χτυπήματα από γεωλογικό σφυρί για να θραυτούν.	Ασβεστόλιθοι, μάρμαρο, ψαμμίτης, σχιστόλιθος
R3	Μέτρια δυνατή	25 - 50	1 - 2	Δεν μπορούν τα δείγματα να τεμαχιστούν ή να αποφλοιωθούν με ένα μαχαίρι τσεπής, αλλά μπορούν να θραυστούν με ένα μόνο χτύπημα από γεωλογικό σφυρί	Σκυρόδεμα, φυλλίτης, σχιστόλιθος, ιλυόλιθος
R2	Αδύνατη	5 - 25	**	Μπορούν με δυσκολία να αποφλοιωθούν με ένα μαχαίρι τσεπής. Με ένα γερό χτύπημα με το αιχμηρό μέρος ενός γεωλογικού σφυριού προκαλείται ρηχή διάσωση.	Κιμωλία, αργιλόλιθος, ποτάσα, μάρμα, ιλυόλιθος, αργ. σχιστόλιθος, ορυκτό άλας
R1	Πολύ αδύνατη	1 - 5	**	Τα δείγματα θρυμματίζονται με γερά χτυπήματα με το αιχμηρό μέρος ενός γεωλογικού σφυριού και μπορούν να αποφλοιωθούν με ένα μαχαίρι τσεπής	Βράχος με έντονη αποσύνθεση ή βράχος με εναλλαγές υλικών, αργ. σχιστόλιθος
R0	Υπερβολικά αδύνατη	0,25 - 1	**	Διάσωση με τον αντίχειρα	Σκληρο ρηγματωμένο υλικό εκσκαφής

* Βαθμονόμηση με βάση τον Brown (1981)

** Οι δοκιμές σημειακής φόρτισης σε βράχους με μονοαξονική αντοχή στην θλίψη κάτω των 25 MPa, είναι πιθανόν να έχουν πολύ αβέβαια αποτελέσματα

Η πρώτη αναφορά στην διάκριση των δομών της βραχομάζας για τεχνικούς σκοπούς και συγκεκριμένα για τον σχεδιασμό υποστήριξης σηράγγων, έγινε από τον Terzaghi (1946). Στην εργασία του ο Terzaghi ταξινομεί ποιοτικά τα φορτία τα οποία ασκούνται σε χαλύβδινα πλαίσια που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των σηράγγων. Η πραγματική αξία αυτής της εργασίας όμως, είναι η ταξινόμηση του πετρώματος με ποιοτικούς όρους, στην οποία δίνει ιδιαίτερη προσοχή σε παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά του πετρώματος (π.χ. ασυνέχειες). Η περιγραφή του πετρώματος γίνεται στις παρακάτω κατηγορίες (Μαρίνος, 1991): Άρρηκτο πέτρωμα, στρωματοειδές, μέτρια διακλασμένο, κανονικά διακλασμένο, αποδομημένο, συνθλιβόμενο, διογκούμενο. Αντίστοιχη κατηγοριοποίηση των δομών της βραχομάζας σε σχέση με τον βαθμό κερματισμού της πρότεινε ο Hoek (1983).

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές δομές βραχομάζας (Hoek, 1983)

	Description	Strength characteristics	Strength testing	Theoretical considerations
	Hard intact rock	Brittle, elastic and generally isotropic	Triaxial testing of core specimens in laboratory relatively simple and inexpensive and results usually reliable	Theoretical behaviour of isotropic elastic brittle rock adequately understood for most practical applications
	Intact rock with single inclined discontinuity	Highly anisotropic, depending on shear strength and inclination of discontinuity	Triaxial testing of core with inclined joints difficult and expensive but results reliable. Direct shear testing of joints simple and inexpensive but results require careful interpretation	Theoretical behaviour of individual joints and of schistose rock adequately understood for most practical applications
	Massive rock with a few sets of discontinuities	Anisotropic, depending on number, shear strength and continuity of discontinuities	Laboratory testing very difficult because of sample disturbance and equipment size limitations	Behaviour of jointed rock poorly understood because of complex interaction of interlocking blocks
	Heavily jointed rock	Reasonably isotropic. Highly dilatant at low normal stress levels with particle breakage at high normal stress	Triaxial testing of undisturbed core samples extremely difficult due to sample disturbance and preparation problems	Behaviour of heavily jointed rock very poorly understood because of interaction of interlocking angular pieces
	Compacted rockfill	Reasonably isotropic. Less dilatant and lower shear strength than in situ jointed rock but overall behaviour generally similar	Triaxial testing simple but expensive because of large equipment size required to accommodate representative samples	Behaviour of compacted rockfill reasonably well understood from soil mechanics studies on granular materials
	Loose waste rock	Poor compaction and grading allow particle rotation and movement resulting in mobility of waste rock dumps	Triaxial or direct shear testing relatively simple but expensive because of large equipment size required	Behaviour of waste rock adequately understood for most applications

Η πρώτη δομή βραχομάζας είναι αυτή που δεν περιέχει ασυνέχειες, αντιστοιχεί δηλαδή στο άρρηκτο πέτρωμα. Η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας αυτής είναι γενικά ισότροπη και παρουσιάζει συνήθως ψαθυρή θραύση για σκληρά πετρώματα. Η δεύτερη δομή είναι βραχομάζα με μια ασυνέχεια. Η συμπεριφορά του τύπου αυτού της μάζας του πετρώματος είναι εντελώς ανισότροπη και εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τον προσανατολισμό της ασυνέχειας. Η τρίτη δομή αντιστοιχεί σε συμπαγή βραχομάζα η οποία εμπεριέχει μερικά συστήματα ασυνεχειών. Η συμπεριφορά της είναι ανισότροπη ανάλογα με τον αριθμό, προσανατολισμό, εμμονή και αντοχή των ασυνεχειών. Η επόμενη δομή είναι η έντονα κερματισμένη βραχομάζα, η οποία περιέχει τέσσερα ή περισσότερα συστήματα ασυνεχειών. Η συμπεριφορά της είναι ισότροπη, έντονα διαστελλόμενη σε χαμηλές τάσεις, με θραύση των τεμαχιδίων σε υψηλές τάσεις. Οι επόμενες δυο δομές (συμπυκνωμένη λιθορριπή – χαλαρή απόθεση λιθορριπής), χαρακτηρίζονται ως ισότροπες ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η μηχανική συμπεριφορά τους μπορεί να αντιμετωπιστεί με κριτήρια εδαφομηχανικής.

Αν η πυκνότητα των ασυνεχειών είναι αραιή σε σχέση με τις διαστάσεις του προβλήματος ή είναι πολύ μεγάλη έτσι ώστε η βραχομάζα να μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κατακερματισμένο υλικό, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μηχανική του συνεχούς μέσου. Αντίθετα, όταν υπάρχει μια ασυνέχεια ή έστω μικρός αριθμός ασυνεχειών, τότε το πρόβλημα μπορεί να αναχθεί σε ολίσθηση ενός στερεού σώματος πάνω στις ασυνέχειες και η επίλυση του γίνεται με στερεοστατικές εξισώσεις ισορροπίας.

1.2.2 Βραχομάζα χωρίς ασυνέχειες

Η βραχομάζα η οποία δεν περιέχει μακροσκοπικές ασυνέχειες, θεωρείται ότι παρουσιάζει συμπεριφορά που προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αυτήν ενός ελαστοπλαστικού μέσου. 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 των κριτηρίων αστοχίας. Με τα κριτήρια αυτά, περιγράφεται ο μηχανισμός αστοχίας του υλικού, καθορίζεται ο συνδυασμός των τάσεων που οδηγεί στην αστοχία ενώ παράλληλα πραγματοποιείται και συσχετισμός με ορισμένες ιδιότητες του πετρώματος. Τα κριτήρια αυτά έχουν προκύψει είτε αναλυτικά (π.χ. κριτήριο Griffith) είτε εμπειρικά (π.χ κριτήριο

Hoek – Brown). Ο *Error! Reference source not found.* δίνει τα πιο γνωστά κριτήρια αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος (*Hudson and Harrison, 1997*).

Σύμφωνα με την θεωρία του Griffith (1921) σε ψαθυρά υλικά δημιουργούνται μακροσκοπικές ρωγμές όταν οι τάσεις που συγκεντρώνονται στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών που περιέχει το υλικό, ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή του. Στα πετρώματα τέτοιες μικροσκοπικές ρωγμές μπορούν να υπάρχουν στις επαφές των ορυκτών τους ή και εντός των κόκκων, ως αποτέλεσμα γεωλογικών καταπονήσεων. Η θεωρία του Griffith προέκυψε από μελέτες σε εφελκυστικά πεδία τάσεων. Στα προβλήματα της μηχανικής των πετρωμάτων, όπου κυριαρχούν οι θλιπτικές τάσεις, έγιναν τροποποιήσεις της αρχικής θεωρίας (McClintock and Walsh, 1962) έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η τριβή που ενεργοποιείται κατά το κλείσιμο των ρωγμών.

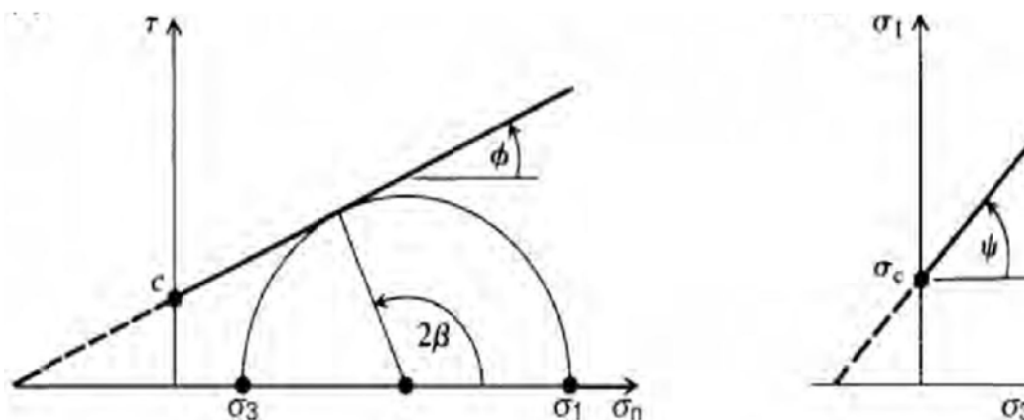
Πίνακας 3 Κριτήρια αστοχίας άρρηκτου πετρώματος (Hudson and Harrison, 1997)

Muall (1963)	$\tau^2_{\sigma\sigma} = 8T_0\sigma_{\sigma\sigma}$	Επέκταση της θεωρίας Griffith σε 3 διαστάσεις
Fairhurst (1964)	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)^2} = -2(m-1)^2 K \left[1 + \frac{2K}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \left(\left(\frac{m-1}{2} \right)^3 - 1 \right) \right]$	Εμπειρική γενίκευση του κριτηρίου Griffith
Hobbs (1966)	$\sigma_1 = B\sigma_3^b + \sigma_c$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών
Hoek (1968)	$\sigma_1 - \sigma_3 = 2C + A(\sigma_1 + \sigma_3)^B$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών
Franklin (1971)	$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c^{1-B} (\sigma_1 + \sigma_3)^B$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε 500 δοκίμια
Bieniawski (1974)	$\sigma_1 = K\sigma_3^A + \sigma_c$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε 700 δοκίμια (5 τύποι πετρωμάτων)
Yoshinaka & Yamabe (1980)	$\sigma_1 - \sigma_2 = aK(q)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^b$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε μαλακά πετρώματα
Hoek & Brown (1980)	$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$	Αποτελέσματα δοκιμών και εφαρμογή της θεωρίας Griffith
Kim & Ladé (1984)	$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{\rho\sigma_c} \right)^m = \eta_1$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών (αρχικά σε σκυρόδεμα και έδαφη)
Johnston (1985)	$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \left[\frac{M}{B} \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right]^B$	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε μαλακά πετρώματα
Desai & Salami (1987)	$J_2 = \left(-\frac{\alpha}{\alpha_0} I_1^n + \gamma I_1^2 \right) (1 - \beta Sr)^m$	Πολυωνομική επέκταση σε όρους αποκλίσεων των τάσεων
Michelis (1987)	$\ln \left(\frac{q^2}{f_0^2} + a_1 p \frac{q}{f_0} + a_2 p^2 \right) = a_4 \ln \left(\frac{2q/pf_0 + a_1 - a_3}{2q/pf_0 + a_1 + a_3} \right) + \ln a_5$	Αναλυτική και πειραματική εξέταση της επιφανείας αστοχίας

Μελέτες επάνω στην δημιουργία και διάδοση ρωγμών σε πετρώματα (Hoek and Bieniawski 1965, Hoek 1968) έδειξαν ότι το αρχικό αλλά και το τροποποιημένο κριτήριο του Griffith επαρκούν για την εκτίμηση της εκκίνησης της ρωγμάτωσης των πετρωμάτων αλλά δεν μπορούν να περιγράψουν την διάδοση των ρωγμών και την τελική αστοχία των πετρωμάτων. Το κριτήριο του Griffith δεν εφαρμόζεται στην πράξη, ωστόσο είναι

ιδιαίτερης αξίας γιατί αποτέλεσε την πρώτη θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος της αντοχής των πετρωμάτων και έδωσε αφορμή για την ανάπτυξη νέων μοντέλων αστοχίας τα οποία είχαν ως αρχική ιδέα το κριτήριο αυτό.

Σύμφωνα με το κριτήριο **Mohr – Coulomb**, η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο του πετρώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, η οποία είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n στο επίπεδο αυτό. Η διατμητική αντοχή εξαρτάται από δύο παραμέτρους: την γωνία εσωτερικής τριβής ϕ και την συνοχή c .



Σχήμα 5 Διατύπωση του κριτηρίου Mohr – Coulomb, αριστερά σε επίπεδο ορθών και διατμητικών τάσεων, δεξιά σε επίπεδο κυρίων τάσεων.

$$t = c + \sigma \tan\phi \quad (\text{στο επίπεδο } \sigma\text{-}\tau) \quad \text{Εξίσωση 1}$$

$$\sigma_I = \sigma_{cm} + \sigma_3 \tan\psi \quad (\text{στο επίπεδο } \sigma_I - \sigma_3) \quad \text{Εξίσωση 2}$$

όπου

$$\sigma_{cm} = 2 \cos\phi / 1 - \sin\phi \quad \text{Εξίσωση 3}$$

$$\tan\psi = 1 + \sin\phi / 1 - \sin\phi \quad \text{Εξίσωση 4}$$

Σύμφωνα με το

Σχήμα 5, το επίπεδο αστοχίας έχει κλίση $45 + \phi/2$ ως προς το επίπεδο επί του οποίου ασκείται η μέγιστη κύρια τάση. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι η εμφάνιση του επιπέδου αστοχίας σε τέτοιες κλίσεις αντιστοιχεί σε τριαξονικές δοκιμές με σχετικά υψηλή τιμή πλευρικής πίεσης. Στην περίπτωση της μονοαξονικής φόρτισης με θλιπτικό φορτίο, η αστοχία λαμβάνει χώρα σε επίπεδα παράλληλα σε σχέση με την διεύθυνση της φόρτισης,

ως αποτέλεσμα εφελκυστικής αστοχίας του υλικού (αξονικές κατακλάσεις). Συνεπώς, το κριτήριο αυτό είναι πιο κατάλληλο για την εκτίμηση της αντοχής σε τριαξονικές συνθήκες και σε σχετικά υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης.

Η περιβάλλουσα αστοχίας σύμφωνα με το συγκεκριμένο κριτήριο είναι ευθύγραμμη. Οι Hoek and Brown (1980) μετά από σειρά τριαξονικών δοκιμών σε πετρώματα $\sigma_{cm} = 2 \cos\phi / 1 - \sin\phi$ Εξίσωση 3, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σχέση των κυρίων τάσεων κατά την αστοχία δεν είναι γραμμική αλλά ακολουθεί έναν παραβολικό νόμο. Το ομώνυμο κριτήριο τους, το οποίο βασίζεται στο κριτήριο αστοχίας Griffith, διατυπώνεται ως εξής.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} (m_i \cdot \sigma_3 / \sigma_{ci} + 1)^{0.5} \quad \text{Εξίσωση 5}$$

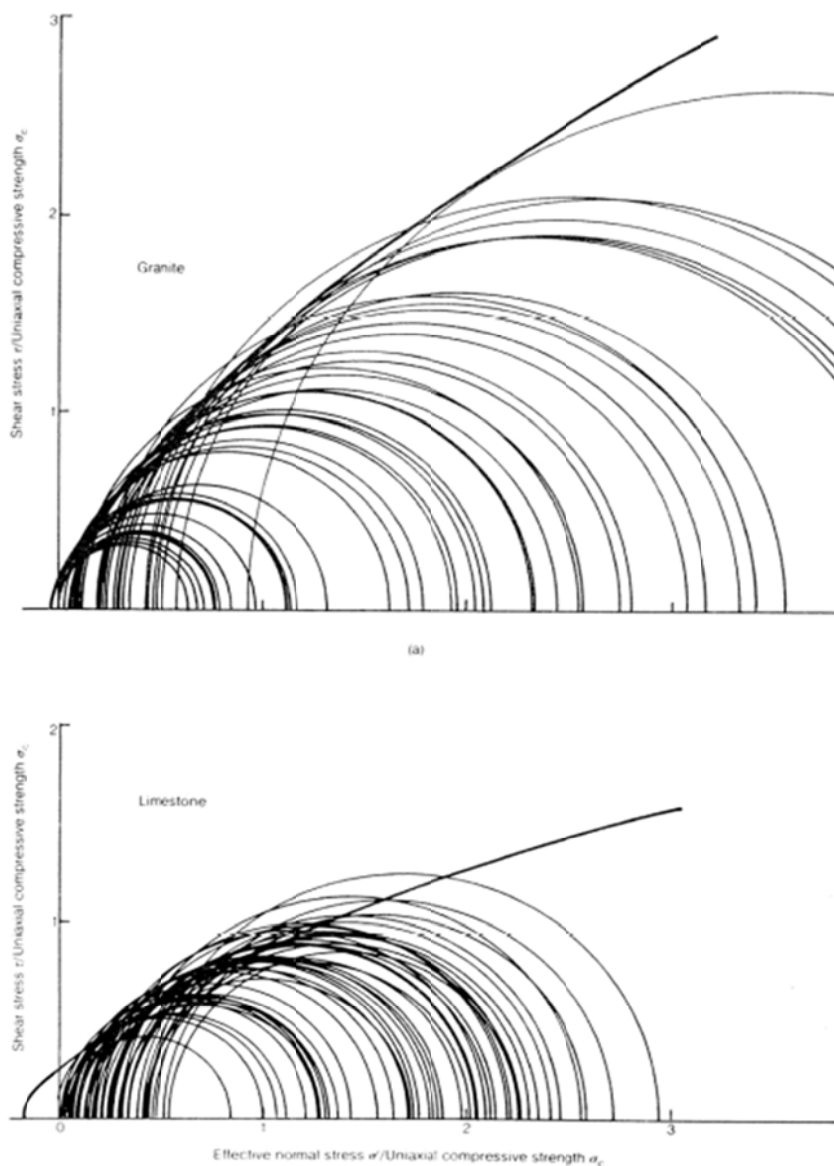
σ_1' = η μέγιστη κύρια (ενεργός) τάση κατά την αστοχία

σ_3' = η ελάχιστη κύρια (ενεργός) τάση κατά την αστοχία

σ_{ci} = η αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

m_i = παράμετρος του πετρώματος που συνδέεται με την αλληλεμπλοκή των κόκκων του.

Οι παράμετροι m_i και σ_{ci} υπολογίζονται από τριαξονικές δοκιμές για ένα εύρος τιμών $0 < \sigma_3 < 0.5\sigma_{ci}$. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται σε κυλινδρικά δοκίμια άρρηκτου πετρώματος διαμέτρου 54.7mm. Ωστόσο, όταν γίνεται εκτίμηση της αντοχής βραχομάζας, θα πρέπει να γίνει μια διόρθωση στην τιμή της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη, καθώς με την αύξηση του όγκου του υπό εξέταση πετρώματος η αντοχή του μειώνεται (Hoek, 1983).



Σχήμα 6 Καμπύλες περιβάλλουσες Mohr σε γρανίτη και ασβεστόλιθο (Hoek, 1983)

Η παράμετρος m_i εκφράζει ουσιαστικά τον λόγο της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη προς την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό (Hoek et al, 2002). Ο *Error! Reference source not found.* παρακάτω δίνει τις τιμές της παραμέτρου m_i ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος (ιζηματογενές, εκρηξιγενές, μεταμορφωμένο), την κατηγορία που ανήκει (κλαστικό – μη κλαστικό για τα ιζηματογενή, με φύλλωση – με ελαφρά φύλλωση – χωρίς φύλλωση για τα μεταμορφωμένα, πλουτώνια – ηφαιστειακά για τα εκρηξιγενή) και την υφή του (αδρή, μέτρια, λεπτή και πολύ λεπτή). Η παράμετρος αυτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 4 (σχιστόλιθος) και 33 (γενύσιος).

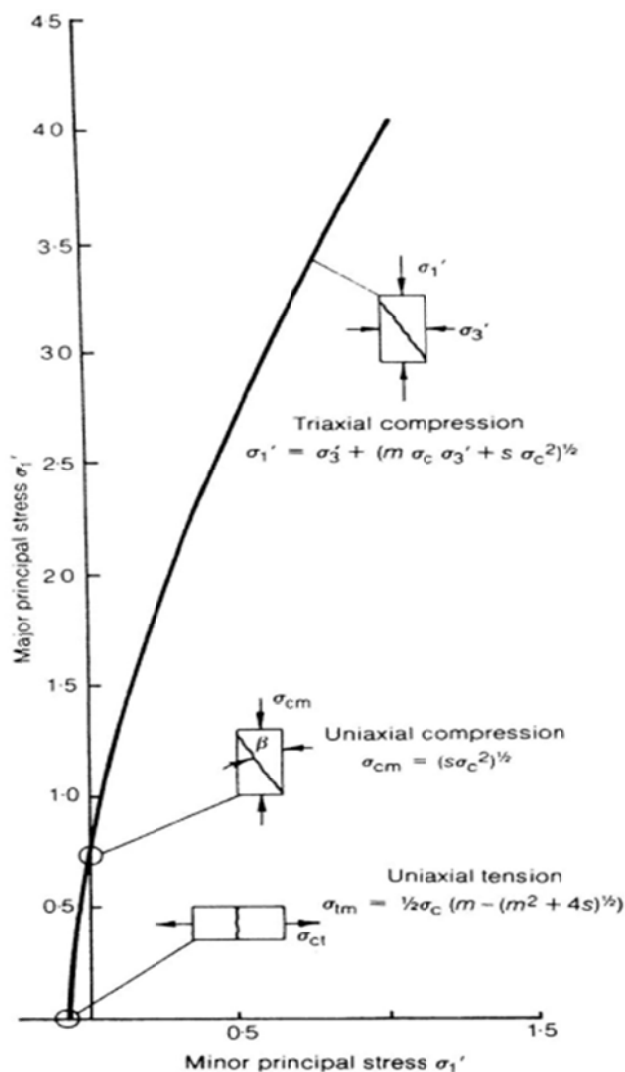
Πίνακας 4 Εκτίμηση της παραμέτρου m_i (Marinos and Hoek, 2000)

ΤΥΠΟΣ	ΟΜΑΔΑ		ΣΥΣΤΑΣΗ			
			ΑΔΡΗ	ΜΕΣΗ	ΛΕΠΤΗ	ΠΟΛΥ ΛΕΠΤΗ
ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ	Κλαστικά		Κροκαλοπαγή* Λατυποπαγή*	Ψαμμίτες 17 ± 4	Ιλυόλιθοι 7 ± 2 Γραουβάκες (18 ± 3)	Αργιλόλιθοι 4 ± 2 Αργ. Σχιστόλιθοι (6 ± 2) Μάρμες (7 ± 2)
	Μη κλαστικά	Ανθρακικά	Κρυσταλλικοί Ασβεστόλιθοι (12 ± 3)	Σπαρπικοί Ασβεστόλιθοι (10 ± 2)	Μικρικοί Ασβεστόλιθοι (9 ± 2)	Δολομίτες (9 ± 3)
		Εβαπορίτες	Γύψος 8 ± 2	Ανυδρίτης 12 ± 2		
		Οργανικά				Κρητίς 7 ± 2
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	Μη πτυχωμένα		Μάρμαρο 9 ± 3	Χαλαζίτες 20 ± 3 Μεταψαμμίτες (19 ± 3)	Κερατόλιθοι (19 ± 4)	
	Ελαφρά πτυχωμένα		Μηγματίτες (29 ± 3)	Αμφιβολίτες 26 ± 6	Γνεύσιοι 28 ± 5	
	Πτυχωμένα**			Σχιστόλιθοι 12 ± 3	Φυλλίτες (7 ± 3)	Σχίστες 7 ± 4
ΠΥΡΙΓΕΝΗ	Πλουτώνια	Ανοιχτόχρωμα	Γρανίτης 27 ± 3	Διορίτης (25 ± 5)		
		Γρανодиότιτης (29 ± 3)				
	Σκοτανόχρωμα	Γάββρος 27 ± 3 Νορίτης 20 ± 5	Δολερίτης (16 ± 5)			
		Υποαβυσσικά	Πορφύρης (20 ± 5)		Διαβάσης (15 ± 5)	Περιδοίτης (25 ± 5)
	Ηφαιστειακά	Λάβα		Ρυόλιθος (25 ± 5) Ανδεσίτης 15 ± 5	Δακίτης (25 ± 5) Βασάλτης (25 ± 5)	
Πυροκλαστικά		Ηφ. Κροκαλοπαγή (19 ± 3)	Ηφ. Λατυποπαγή (19 ± 3)	Τόφφοι (19 ± 3)		

* Τα κροκαλοπαγή και τα λατυποπαγή μπορεί να παρουσιάσουν ένα ευρύ πεδίο τιμών της σταθεράς m_i ανάλογα με την φύση του συγκολλητικού υλικού και τον βαθμό συγκόλλησης, και έτσι μπορεί να έχουν τιμές παρόμοιες με αυτές των ψαμπίων μέχρι και τιμές που χρησιμοποιούνται και λεπτόκοκκα ιζηματογενή πετρώματα (ακόμη και < 10).

** Αυτές οι τιμές αφορούν δείγματα του ακέραιου πετρώματος (άρρηκτου βράχου) δοκιμασμένα κάθετα στις στρώσεις ή στην φύλλωση. Η τιμή της σταθεράς m_i μπορεί να είναι διαφορετική σε σημαντικό βαθμό εάν η αστοχία πραγματοποιηθεί κατά μήκος ενός αδύναμου επιπέδου.

Τέλος, στο **Σχήμα 7** απεικονίζεται η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Hoek – Brown, όπου φαίνεται η αντοχή του πετρώματος για τρεις χαρακτηριστικές εντατικές καταστάσεις, μονοαξονικό εφελκυσμό, μονοαξονική θλίψη και τριαξονική θλίψη. Για άρρηκτο πέτρωμα η παράμετρος s λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα. Οι τιμές των ενεργών κυρίων τάσεων σ_1' και σ_3' είναι διαιρεμένες με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.



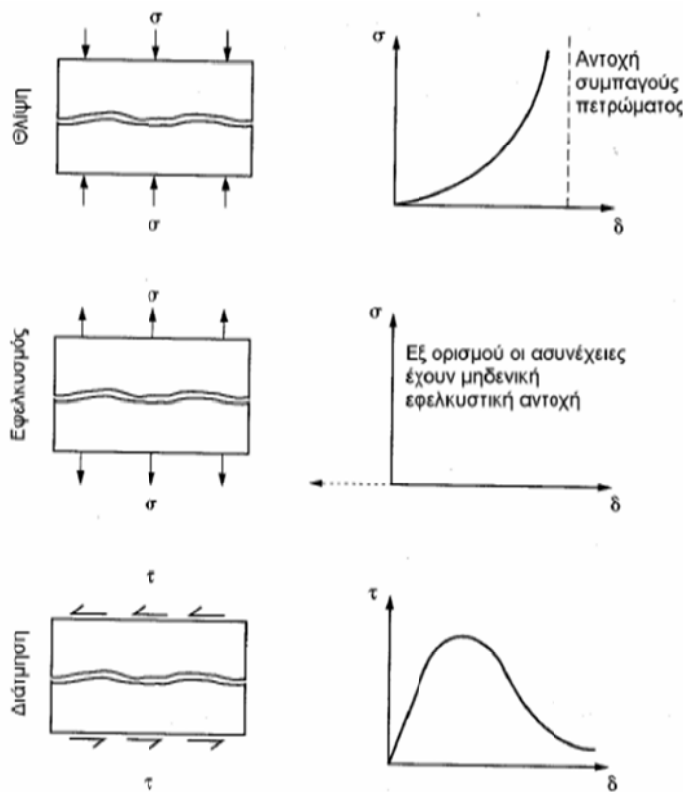
Σχήμα 7 Η περιβάλλουσα αστοχίας του κριτηρίου Hoek – Brown (Hoek, 1983)

Η εκτίμηση της αντοχής πετρωμάτων με κάποιο προσανατολισμένο άξονα ανισοτροπίας παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες. Τέτοια πετρώματα είναι συνήθως μεταμορφωμένα με καλά ανεπτυγμένα επίπεδα σχιστότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αντοχή του πετρώματος διαφοροποιείται σε σχέση με τον προσανατολισμό των επιπέδων σχιστότητας. Η ελάχιστη αντοχή παρουσιάζεται για γωνίες 30° έως 45° μεταξύ της διεύθυνσης φόρτισης και της κλίσης της σχιστότητας. Για τέτοια πετρώματα, το κριτήριο Hoek – Brown δεν ισχύει ως έχει. Οι Hoek and Brown (1980) και οι Σαρόγλου Χ., Τσιαμπάος Γ. και Μαρίνος Π. (2006) αναφέρουν κατάλληλους μετασχηματισμούς στο κριτήριο έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή του σε ανισότροπα πετρώματα.

1.2.3 Κερματισμένη βραχομάζα με ανισότροπη συμπεριφορά

Η αντοχή μιας βραχομάζας με ανισότροπη συμπεριφορά εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την κλίση των ασυνεχειών σε σχέση με την διεύθυνση της φόρτισης. Ανάλογα με την κλίση αυτή, η αστοχία μπορεί να εκδηλωθεί με θραύση του άρρηκτου πετρώματος ή με ολίσθηση επάνω σε επίπεδο ασυνέχειας. Όταν η αστοχία οφείλεται σε θραύση του άρρηκτου πετρώματος, η αντοχή υπολογίζεται με τα κριτήρια αστοχίας που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στην αντίθετη περίπτωση, η αντοχή της βραχομάζας εξαρτάται από την μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών.

Η συμπεριφορά μιας ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση φαίνεται στο Σχήμα 8. Στην περίπτωση της θλίψης, η μετακίνηση αυξάνεται με την αύξηση της τάσης ενώ η μέγιστη τάση είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Στην περίπτωση του εφελκυσμού, η ασυνέχεια εξ' ορισμού δεν φέρει αντίσταση. Στην διάτμηση, παρατηρείται μια κορυφαία διατμητική τάση που μειώνεται στη συνέχεια. Στις περιπτώσεις της θλίψης και της διάτμησης, η συμπεριφορά είναι μη γραμμική.



Σχήμα 8 Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση (από Hudson and Harrison, 1997)

Σε μια λεία επιφάνεια η διατμητική αντοχή μπορεί να εκφραστεί από μια γραμμική περιβάλλουσα Mohr – Coulomb της μορφής:

$$\tau = \sigma \times \tan \varphi$$

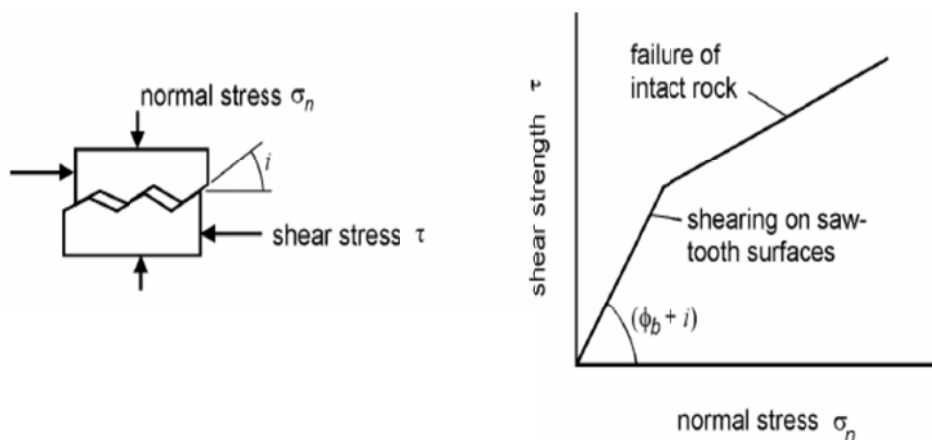
Εξίσωση 6

όπου φ η γωνία τριβής. Ωστόσο, πολύ σπάνια στη φύση συναντώνται τέτοιες λείες επιφάνειες. Ο Patton (1966) πραγματοποίησε πειράματα σε δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια ήταν τραχεία, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9**. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας εκφράζεται καλύτερα με το διγραμμικό κριτήριο.

$$\tau = \sigma \times \tan(\varphi + i)$$

Εξίσωση 7

Για μικρές τιμές της ορθής τάσης σ η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί κατά τη διάτμηση διόγκωση δίνοντας μια φαινόμενη γωνία τριβής ($\varphi+i$). Για μεγαλύτερες τιμές της ορθής τάσης, η γωνία τραχύτητας i μηδενίζεται λόγω της θραύσης των προεξοχών στο τοίχωμα της ασυνέχειας.



Σχήμα 9 Δοκιμές σε τραχείες επιφάνειες ασυνεχειών (Patton, 1966)

Μια απλούστερη για πρακτική εφαρμογή εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό τη διατμητικής αντοχής μιας ασυνέχειας προτάθηκε από τον Barton (1971, 1973, 1976). Πραγματο-

ποιώντας δοκιμές σε φυσικές ασυνέχειες, πρότεινε ότι η εξίσωση του Patton μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\tau = \sigma_n \tan(\varphi_b + JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n)) \quad \text{Εξίσωση 8}$$

Δηλαδή

$$i = JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n) \quad \text{Εξίσωση 9}$$

όπου

JRC= συντελεστής τραχύτητας της ασυνέχειας

JCS= ισοδύναμη θλιπτική αντοχή του τοιχώματος της ασυνέχειας

Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες είναι πληρωμένες με κάποιο υλικό πλήρωσης, η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας θα επηρεάζεται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού αυτού (Barton 1974). Η εξίσωση 8 έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα λόγω της υπολογιστικής ευχέρειας που προσφέρει, καθώς περιλαμβάνει σχετικά εύκολα μετρήσιμα μεγέθη αλλά και γιατί έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει πολύ καλή προσαρμογή σε αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης σε ασυνέχειες.

1.3 Κατακερματισμένη βραχομάζα με ισότροπη συμπεριφορά

1.3.1 Γενικά

Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις για την εκτίμηση της ισότροπης αντοχής κατακερματισμένης βραχομάζας, μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αναλυτικές προσεγγίσεις οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν μια μαθηματική προσομοίωση και επίλυση του προβλήματος. Οι πολλοί συνδυασμοί συνοριακών συνθηκών, η πολύπλοκη κατανομή των τάσεων σε βραχομάζες 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 βραχομάζας. Ωστόσο, οι προσεγγίσεις αυτές είναι ιδιαίτερης θεωρητικής αξίας διότι βοηθούν στην κατανόηση των μηχανισμών της συμπεριφοράς των πετρωμάτων.

Η αδυναμία των θεωριών της μηχανικής να προσεγγίσουν ικανοποιητικά το πρόβλημα, οδήγησε πολλούς ερευνητές στο συσχετισμό των αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών και επί τόπου παρατηρήσεων με ορισμένες παραμέτρους του υλικού, προτείνοντας έτσι εμπειρικές σχέσεις μέσω των οποίων είναι δυνατός ο υπολογισμός της αντοχής της βραχομάζας σε διάφορες εντατικές καταστάσεις. Οι σχέσεις αυτές ονομάζονται εμπειρικά κριτήρια αστοχίας και αποτελούν την δεύτερη κατηγορία μεθόδων για την εκτίμηση της αντοχής της μάζας του πετρώματος. Επειδή πρόκειται για εμπειρικές σχέσεις, η γενικευμένη χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις αντοχής. Από την άλλη, πλεονεκτούν στο γεγονός ότι είναι εύχρηστα και προσφέρουν υπολογιστική άνεση καθώς περιλαμβάνουν σχετικά εύκολα μετρήσιμα μεγέθη.

Η εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων στα προβλήματα της Βραχομηχανικής ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 όταν η έρευνα άρχισε να επικεντρώνεται συγκεκριμένα στην εφαρμογή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων. Σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, τόσο σε επίπεδο υλικού (hardware) όσο και σε επίπεδο λογισμικού (software). Οι πιο γνωστές αριθμητικές μέθοδοι είναι :

- η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method)
- η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)
- η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method)
- η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (Discrete Element Method).

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι, οι οποίες όμως είναι παραλλαγές των προαναφερθέντων. Επίσης υπάρχουν οι υβριδικές μέθοδοι οι οποίες συνδυάζουν στοιχεία από τις παραπάνω μεθόδους (π.χ. διακριτών στοιχείων και συνοριακών στοιχείων). Με χρήση αριθμητικών μεθόδων είναι δυνατή η προσομοίωση της συμπεριφοράς πολύπλοκων δομών βραχομάζας, με διάφορες συνοριακές συνθήκες και με διάφορα καταστατικά μοντέλα για το άρρηκτο πέτρωμα και τις ασυνέχειες.

1.3.2 Αναλυτικές επιλύσεις

Οι αναλυτικές επιλύσεις στηρίζονται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού με εξισώσεις της μηχανικής του συνεχούς μέσου, οι οποίες στη συνέχεια επιλύονται λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Οι δυο βασικές θεωρίες της μηχανικής του συνεχούς μέσου είναι η θεωρία ελαστικότητας και η θεωρία πλαστικότητας.

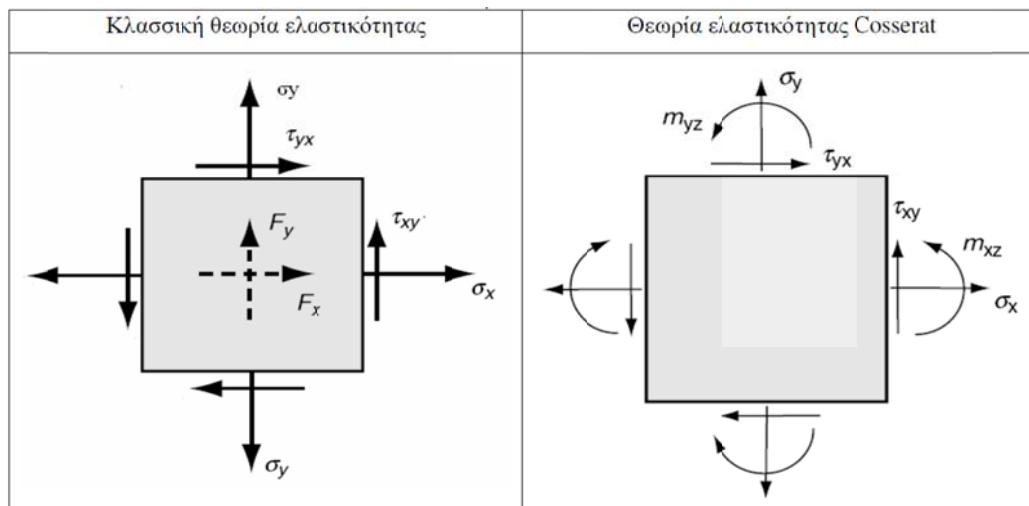
Η *θεωρία ελαστικότητας* εφαρμόζεται θεωρώντας τη βραχομάζα ως υλικό ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό. Ομοιογενές σημαίνει ότι το υλικό έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλα τα σημεία του. Η ισοτροπία ως προς κάποιες ιδιότητες υπάρχει όταν οι ιδιότητες αυτές είναι ίδιες προς όλες τις διευθύνσεις. Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για τον υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων είναι οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας, οι καταστατικές εξισώσεις του υλικού και οι εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων (Σακελλαρίου, 2001).

Η *θεωρία πλαστικότητας* εξετάζει την μηχανική συμπεριφορά των στερεών στα οποία εκδηλώνονται μόνιμες παραμορφώσεις. Στα πετρώματα εκδηλώνονται πλαστικοί μηχανισμοί παραμορφώσεων και σε μικροσκοπική και σε μακροσκοπική κλίμακα. Οι μηχανισμοί αυτοί διακρίνονται σε θραύση, σε ολίσθηση μεταξύ των κόκκων και σε διαρροή στην περίπτωση του άρρηκτου πετρώματος ενώ στην περίπτωση της ρωγματωμένης βραχομάζας συμβαίνουν ολισθήσεις στις ασυνέχειες καθώς και περιστροφές και τοπικές θραύσεις σε τεμάχια πετρώματος (Σακελλαρίου, 2001).

Οι θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας μπορούν να δώσουν πολύ ικανοποιητικές απαντήσεις σε προβλήματα που αφορούν συνεχή μέσα. Τα πετρώματα ωστόσο περιέχουν επίπεδα αδυναμίας και η θεώρηση τους ως συνεχή μέσα εξαρτάται από τον συσχετισμό της κλίμακας των επιπέδων αυτών με την κλίμακα του προβλήματος που εξετάζεται. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις οι κλασσικές θεωρίες της μηχανικής έχουν περιορισμένες δυνατότητες πρόβλεψης της συμπεριφοράς τέτοιων ασυνεχών υλικών.

Η διαπίστωση αυτή έδωσε αφορμή για την ανάπτυξη θεωριών στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η μικροδομή του υλικού. Μια τέτοια θεώρηση, ιδιαίτερα χρήσιμη σε ζητήματα της μηχανικής των πετρωμάτων, είναι το *συνεχές Cosserat*. Το συνεχές Cosserat είναι ένα συνεχές μέσο στο οποίο όμως επιτρέπεται περιστροφή των στοιχείων που το απαρτίζουν με αποτέλεσμα να μην ισχύει το θεώρημα Cauchy για την ισότητα των διατμητικών τάσεων **Πίνακας 5**. Επομένως, ο τανυστής των τάσεων που προκύπτει παύει να είναι συμμετρικός. Η θεώρηση αυτή βρίσκει πολλές εφαρμογές στα πετρώματα τα οποία είναι ασυνεχή μέσα στα οποία, λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών, συμβαίνουν ολισθήσεις και περιστροφές στα τεμάχια του άρρηκτου πετρώματος.

Πίνακας 5 Τάσεις σε απειροστό στοιχείο σύμφωνα με την κλασσική θεωρία ελαστικότητας και την θεωρία Cosserat (Χαλακατεβάκης, 2010).



1.3.3 Κριτήρια αστοχίας – το κριτήριο Hoek - Brown

Οι εμπειρικοί συσχετισμοί είναι αποτέλεσμα συστηματικών τρόπων εξέτασης της σχέσης διαφόρων μεγεθών, χωρίς να απαιτείται η πλήρης θεωρητική εξήγηση και επιβεβαίωση του αποτελέσματος. Το πεδίο της μηχανικής συμπεριφοράς της βραχομάζας προσφέρεται για τέτοιου είδους συσχετισμούς, λόγω της πολυπλοκότητας της που οδηγεί σε αδυναμία αναλυτικής εκτίμησης της. Τόσο η αντοχή όσο και η παραμορφωσιμότητα της μάζας του πετρώματος εκφράζονται συναρτήσει εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες προκύπτουν από συσχετισμούς των παραμέτρων που επιδρούν στην συμπεριφορά της. Η χρήση τέτοιων σχέσεων ωστόσο, πρέπει να γίνεται με προσοχή και επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαίτερες γεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες στις οποίες πρέπει να εφαρμόζονται.

Το κριτήριο Hoek – Brown αποτελεί σήμερα το πιο διαδεδομένο κριτήριο αστοχίας για πετρώματα. Προτάθηκε αρχικώς το 1980 και αρκετές φορές μέχρι σήμερα έχει τροποποιηθεί. Το κριτήριο αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονικές και τριαξονικές συνθήκες αλλά και της κερματισμένης βραχομάζας, η οποία όμως πρέπει να παρουσιάζει ισότροπη συμπεριφορά. Για την περιγραφή του άρρηκτου πετρώματος λαμβάνει υπόψη του δυο παραμέτρους αντοχής ενώ για την βραχομάζα χρησιμοποιείται ένας επιπλέον μειωτικός παράγοντας λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών. Ο παράγοντας αυτός είναι η τιμή που λαμβάνει η βραχομάζα σε συγκεκριμένο

σύστημα ταξινόμησης (αρχικά χρησιμοποιούταν το RMR και αργότερα αντικαταστάθηκε με το GSI).

Σύμφωνα με τους Hoek and Brown (1980), η δυσκολία στην εξεύρεση ενός κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας για τα πετρώματα, οφείλεται στις πολλές δομές που μπορεί να έχει η μάζα του πετρώματος, από άρρηκτο πέτρωμα έως πλήρως αποδομημένη βραχομάζα. Ένα κριτήριο αστοχίας θα πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Θα πρέπει να μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος σε ένα μεγάλο εύρος τιμών τάσεων και εντατικών καταστάσεων, από την κατάσταση μονοαξονικού εφελκυσμού έως την κατάσταση της τριαξονικής θλίψης.
- Θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να προβλέπει την επίδραση μίας ή περισσότερων ασυνεχειών στην μηχανική συμπεριφορά του άρρηκτου πετρώματος.
- Θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες, όχι κατ'ανάγκη ακριβείς, για τη μηχανική συμπεριφορά της μάζας του πετρώματος η οποία μπορεί να περιέχει πολλές οικογένειες ασυνεχειών.

Με βάση αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών και λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο Griffith, οι Hoek and Brown (1980) πρότειναν την εξής σχέση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + \sigma_c^2)^{0.5} \quad \text{Εξίσωση 10}$$

όπου

σ_1 : η μέγιστη κύρια τάση κατά την αστοχία

σ_3 : η ελάχιστη κύρια τάση κατά την αστοχία

σ_c : η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη

m και s: σταθερές εξαρτώμενες από τον τύπο του πετρώματος και από τον βαθμό τεκτονισμού του (για άρρηκτο υλικό m=m_i και s=1)

Η τιμή του m_i υπολογίζεται από τριαξονικές δοκιμές δοκιμών για διάφορες τιμές πλευρικής πίεσης. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας υπολογίζεται από την εξίσωση 10 θέτοντας $\sigma_3=0$. Έτσι προκύπτει:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{s} \quad \text{Εξίσωση 11}$$

Η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό υπολογίζεται από την Εξίσωση 10 θέτοντας $\sigma_1=0$. Η σχέση που προκύπτει είναι:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad \text{Εξίσωση 12}$$

Το κριτήριο Hoek and Brown έχει τροποποιηθεί αρκετές φορές με την τελική του μορφή να παρουσιάζεται από τους Hoek, Carranza Torres and Corkum (2002). Η μορφή αυτή του κριτηρίου είναι:

$$\sigma_I = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^a \quad \text{Εξίσωση 13}$$

όπου






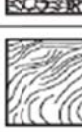
$$m_b / m_i = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad \text{Εξίσωση 14}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad \text{Εξίσωση 15}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad \text{Εξίσωση 16}$$

Οι τιμές των σ_{ci} και m_i υπολογίζονται από εργαστηριακές δοκιμές ή σε προκαταρκτικό στάδιο εκτιμώνται από τους πίνακες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Το D είναι ένας συντελεστής διατάραξης της βραχομάζας με τον οποίο προσομοιώνεται η διατάραξη της περιβάλλουσας βραχομάζας από την μέθοδο εκσκαφής. Ο δείκτης **GSI** (Geological Strength Index) χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η παρουσία των ασυνεχειών στο πέτρωμα. Οι παράγοντες που προσμετρώνται είναι η δομή της βραχομάζας καθώς και η ποιότητα των επιφανειών των ασυνεχειών.

Πίνακας 6 Το σύστημα GSI (Marinos and Hoek, 2000)

<p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΟΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανείας ασυνεχειών) 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 κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθηνείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p>	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχιές, μη αποσπασθόμενες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχιές, ελαφρά αποσπασθόμενες και ομαδοποιημένες επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσπασθόμενες και εφραλοποιημένες επιφάνειες	ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητές, πολύ αποσπασθόμενες με ομαλή ή υπερβολικά ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βραχώματα	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολισθητές, πολύ αποσπασθόμενες με μαλακό οργάνικό υλικό πλήρωσης
	ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
 <p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A	N/A
 <p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	80	70			
 <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>		60			
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτωχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>		50	40		
 <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων</p>			30	20	
 <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθηνής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχιών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	N/A	N/A			10

1.4 Σχολιασμός

Η κυριότερη αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της ανισότροπης αντοχής της κερματισμένης βραχομάζας είναι αυτή του επιπέδου αδυναμίας (Jaeger, 1969). Η θεωρία αυτή βασίζεται στην ανάλυση των τάσεων επάνω στα επίπεδα των ασυνεχειών και στην εξέταση της δυνατότητας ολίσθησης τους, λαμβάνοντας υπόψη και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η αντοχή των ασυνεχειών σε διάτμηση καθορίζε-

ται από γραμμικό κριτήριο αστοχίας. Το γεγονός αυτό αποτελεί μειονέκτημα της θεωρίας καθώς είναι κοινά αποδεκτό ότι η συμπεριφορά των ασυνεχειών σε διάτμηση είναι μη γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης. Επίσης, με την θεωρία αυτή μπορεί να υπολογιστεί η ανισότροπη αντοχή πετρώματος το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει συστήματα ασυνεχειών διαφορετικής κλίσης, με μια ασυνέχεια σε κάθε σύστημα. Δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία περισσότερων παράλληλων ασυνεχειών σε κάθε σύστημα, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες εκτιμήσεις αντοχής της βραχομάζας.

Σύμφωνα επίσης με την *θεωρία του επιπέδου αδυναμίας*, η αστοχία ενός ρωγματομένου πετρώματος εκδηλώνεται με δυο διακριτούς τρόπους, διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών ή θραύση του άρρηκτου πετρώματος. Η θεώρηση αυτή είναι αρκετά απλοποιητική, καθώς στην πραγματικότητα η αστοχία της βραχομάζας εκδηλώνεται με σύνθετους μηχανισμούς, εξαρτώμενους από διάφορες παραμέτρους όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, η τιμή της πλευρικής πίεσης κλπ.

Ένας πολύ σπουδαίος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή της βραχομάζας είναι η εμμογή των ασυνεχειών. Ασυνέχειες με μικρή εμμογή δημιουργούν «γέφυρες» άρρηκτου πετρώματος οι οποίες συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της αντοχής. Αντίθετα, βραχομάζα που περιέχει ασυνέχειες μεγάλης εμμογής παρουσιάζει μικρότερη διατμητική αντοχή. Το GSI ωστόσο δεν λαμβάνει υπόψη του άμεσα την εμμογή των ασυνεχειών (Kim et al., 2007), οπότε μέσω του κριτηρίου Hoek – Brown δεν μπορεί να προσομοιωθεί μια τέτοια μεταβολή της μηχανικής συμπεριφοράς. Επιπρόσθετα, η εκτίμηση της τιμής GSI για μια συγκεκριμένη βραχομάζα, γίνεται εμπειρικά με βάση την οπτική παρατήρηση της μορφής της βραχομάζας και της κατάστασης των ασυνεχειών της. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για την ίδια βραχομάζα, μπορούν να εκτιμηθούν από διαφορετικούς μελετητές, διαφορετικές τιμές GSI, ανάλογα με την εμπειρία του κάθε μελετητή.

Οι Hoek and Marinos (2009) αναφέρονται στις δυσκολίες που υπάρχουν για την εκτίμηση της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς της κερματισμένης βραχομάζας. Σημειώνουν ότι για να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες, έχουν αναπτυχθεί εργαλεία όπως το GSI, τα οποία όμως αποτελούν προσωρινές απλουστευτικές προσεγγίσεις, καθώς είναι αδύνατο, μέσα από τους περιορισμούς ενός συστήματος ταξινόμησης, να προσομοιωθεί όλο το εύρος της μηχανικής συμπεριφοράς μιας βραχομάζας. Υποστηρίζουν μάλιστα ότι μελλοντι-

κά, αριθμητικές επιλύσεις θα είναι να θέσει να βαθμονομήσουν, αν όχι να αντικαταστήσουν εντελώς, εργαλεία όπως το GSI και το κριτήριο Hoek – Brown.

1.4.1 Μειονεκτήματα των μεθοδολογιών

Η θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας μπορεί να εφαρμοστεί για την αναλυτική εκτίμηση της αντοχής κερματισμένης βραχομάζας, με σχετικά απλή δομή και ανισότροπη ή ισοδύναμα ισότροπη συμπεριφορά. Αντίθετα, το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο για την εμπειρική εκτίμηση της αντοχής κερματισμένης βραχομάζας με ισότροπη συμπεριφορά. Οι δυο αυτές μεθοδολογίες προσφέρουν υπολογιστική ευκολία, παρουσιάζουν ωστόσο ορισμένες αδυναμίες τόσο στο θεωρητικό υπόβαθρο όσο και στην εφαρμογή τους.

Η θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας βασίζεται στην ανάλυση των τάσεων επάνω στα επίπεδα των ασυνεχειών και στην εξέταση της δυνατότητας ολίσθησης τους, λαμβάνοντας υπόψη και την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Η θεωρία αυτή έχει αναπτυχθεί για γραμμικό νόμο συμπεριφοράς των ασυνεχειών κατά τη διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποτελεί μειονέκτημα της θεωρίας καθώς είναι κοινά αποδεκτό ότι η συμπεριφορά των ασυνεχειών σε διάτμηση είναι μη γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης. Με την θεωρία αυτή μπορεί να υπολογιστεί η ανισότροπη αντοχή πετρώματος το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει συστήματα ασυνεχειών διαφορετικής κλίσης, με μια ασυνέχεια σε κάθε σύστημα. Δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία περισσότερων παράλληλων ασυνεχειών σε κάθε σύστημα, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες εκτιμήσεις αντοχής της βραχομάζας.

Σύμφωνα επίσης με την θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας, η αστοχία ενός κερματισμένου πετρώματος εκδηλώνεται με δυο διακριτούς τρόπους, διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών ή θραύση του άρρηκτου πετρώματος. Σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί από διάφορους ερευνητές σε φυσικά ομοιώματα δοκιμίων βραχομάζας, καταγράφονται οι μηχανισμοί με τους οποίους εκδηλώνεται η αστοχία κατά τη θλιπτική φόρτιση. Σε μονοαξονικές συνθήκες ή ακόμα και για μικρές τιμές πλευρικής τάσης, η αστοχία οφείλεται κυρίως σε αξονικό σχισμό του άρρηκτου υλικού ή, για μεγάλες κλίσεις ασυνεχειών, σε διατμητικές ολισθήσεις ή αποκολλήσεις. Σε μεγαλύτερες πλευρικές πιέσεις πραγματοποιούνται ολισθήσεις κατά μήκος επιπέδων που μπορεί να περιλαμβάνουν άρρηκτο υλικό ή και ασυνέχειες ενώ είναι δυνατή η ανάπτυξη ακόμα και ζωνών περιστροφικής

παραμόρφωσης. Για μεγάλες πλευρικές τάσεις, η αστοχία εκδηλώνεται με συζυγείς διατμητικές αστοχίες που περιλαμβάνουν άρρηκτο υλικό και επίπεδα ασυνεχειών. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι η θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας απλοποιεί σημαντικά την συμπεριφορά της βραχομάζας, αδυνατώντας να προσομοιώσει το εύρος των μηχανισμών με τους οποίους είναι δυνατό να εκδηλωθεί η αστοχία.

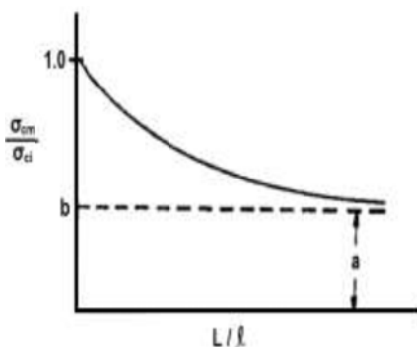
Το κριτήριο Hoek – Brown χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και της κερματισμένης βραχομάζας με ισότροπη συμπεριφορά. Η καταλληλότητα του κριτηρίου για το άρρηκτο πέτρωμα μπορεί να επιβεβαιωθεί συγκρίνοντας τις περιβάλλουσες αστοχίας που προβλέπει το κριτήριο με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές. Αντίθετα, ο έλεγχος της καταλληλότητας του κριτηρίου όπως αυτό εφαρμόζεται σε βραχομάζα δεν είναι εφικτός, λόγω των δυσχερειών στην δειγματοληψία μεγάλου όγκου πετρώματος, το οποίο να περιέχει αντιπροσωπευτικό αριθμό ασυνεχειών, ενώ επίσης οι επιτόπου δοκιμές δεν αποτελούν συνήθη πρακτική. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έλλειψη θεωρητικού υπόβαθρου, δημιουργεί αμφιβολίες σχετικά με την καταλληλότητα του κριτηρίου όπως αυτό εφαρμόζεται για την εκτίμηση της αντοχής της μάζας του πετρώματος.

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο κριτήριο, η μετάβαση από την κλίμακα του άρρηκτου πετρώματος στην κλίμακα της βραχομάζας γίνεται με τον προσδιορισμό της τιμής του δείκτη GSI. Η τιμή του GSI εκτιμάται συνυπολογίζοντας την δομή της βραχομάζας και την κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών, χρησιμοποιώντας ποιοτικούς και όχι ποσοτικούς όρους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η εκτίμηση της τιμής του GSI είναι περισσότερο υποκειμενική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του εκάστοτε μελετητή. Επίσης, αρκετοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή της βραχομάζας, όπως για παράδειγμα η εμμόνη των ασυνεχειών, δεν λαμβάνονται υπόψη με σαφή τρόπο στο συγκεκριμένο δείκτη, το οποίο έχει ως επακόλουθο να δημιουργούνται ερωτηματικά για την αντοχή που υπολογίζεται από το κριτήριο.

1.5 Πειραματική έρευνα σε κερματισμένα υλικά

1.5.1 Μονοαξονική δοκιμή- Δοκιμές των Goldstein et al. (1966) και Hayashi et al. (1966)

Οι Goldstein et al. (1966) ήταν από τους πρώτους που πραγματοποίησαν δοκιμές σε φυσικά δοκίμια για να μελετήσουν την επίδραση των ασυνεχειών στην συμπεριφορά της βραχομάζας. Διενήργησαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια φτιαγμένα από γύψο στα οποία είχαν δημιουργηθεί επιφάνειες αδυναμίας. Το συμπέρασμα αυτών των δοκιμών ήταν ότι η μείωση του μεγέθους του τεμάχου του άρρηκτου υλικού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του ομοιώματος, μέχρι ενός ορισμένου ορίου (Σχήμα 10).



Σχήμα 10 Συσχέτιση αντοχής βραχομάζας – αντοχής άρρηκτου υλικού με το μέγεθος του άρρηκτου τεμάχου (Goldstein et al., 1966)

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών κατέληξαν στον εμπειρικό τύπο:

$$\sigma_{cm} / \sigma_{ce} = a + b \left(\frac{l}{L} \right)^e \quad \text{Εξίσωση 17}$$

όπου $e < 1$, $b = (1-a)$

L = μήκος του δείγματος

l = απόσταση των ασυνεχειών



















σ_{cm} = αντοχή σε θλίψη της μάζας του υλικού

σ_{ce} = αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου υλικού

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 βραχομάζας μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ασυνεχειών σε αυτή.

1.5.2 Μονοαξονική Δοκιμή 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

Σχήμα 11 Τύποι φυσικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Lama, 1974)

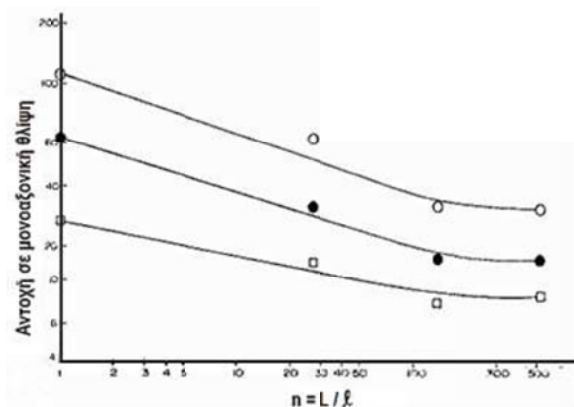
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- 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.

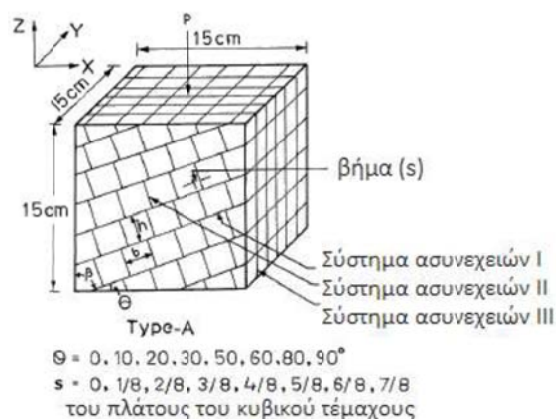


Σχήμα 12 Επίδραση του αριθμού των ασυνεχειών στην αντοχή των δοκιμίων (Lama, 1974)

1.5.3 Μονοαξονικές 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:

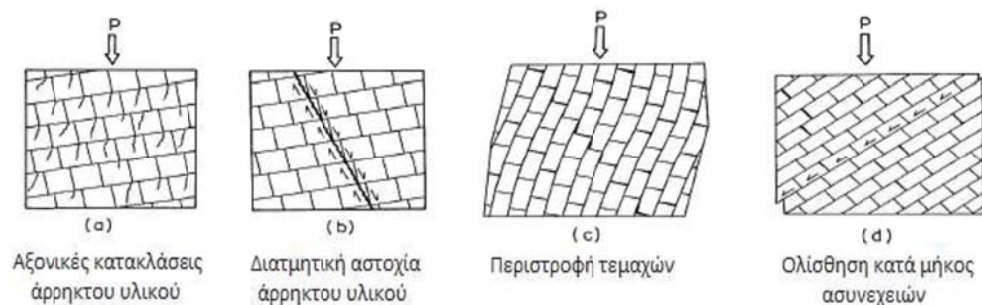


Σχήμα 13 Φυσικά δοκίμια ρωγματομένης βραχώμαζας Τύπου Α (Singh et al., 2002)

- Οι ασυνέχειες του συστήματος I είναι εμμένουσες και έχουν γωνία κλίσης θ 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 θ 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)

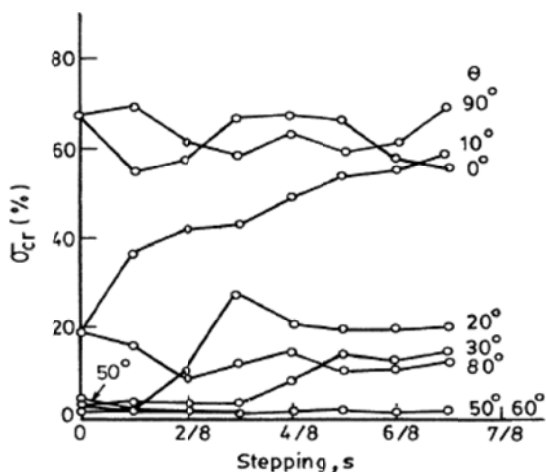


Σχήμα 14 Μηχανισμοί αστοχίας των δοκιμίων (Singh et al., 2002)

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 θ μεταξύ 0° και 30° . Αυτό συμβαίνει διότι στις γωνίες αυτές ο μηχανισμός αστοχίας ελέγχεται από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος με το βαθμό αλληλοεμπλοκής να κατέχει σημαντικό ρόλο.

Πίνακας 7 Μηχανισμοί αστοχίας για το δοκίμιο Τύπου Α (Singh et al., 2002)

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



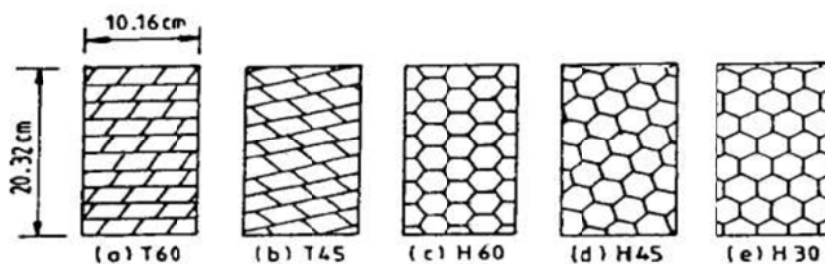
Σχήμα 15 Συσχέτιση βαθμού αλληλοεμπλοκής με την αντοχή των δοκιμίων (Singh et al., 2002)

1.5.4 Διαξονικές και τριαξονικές δοκιμές- 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.

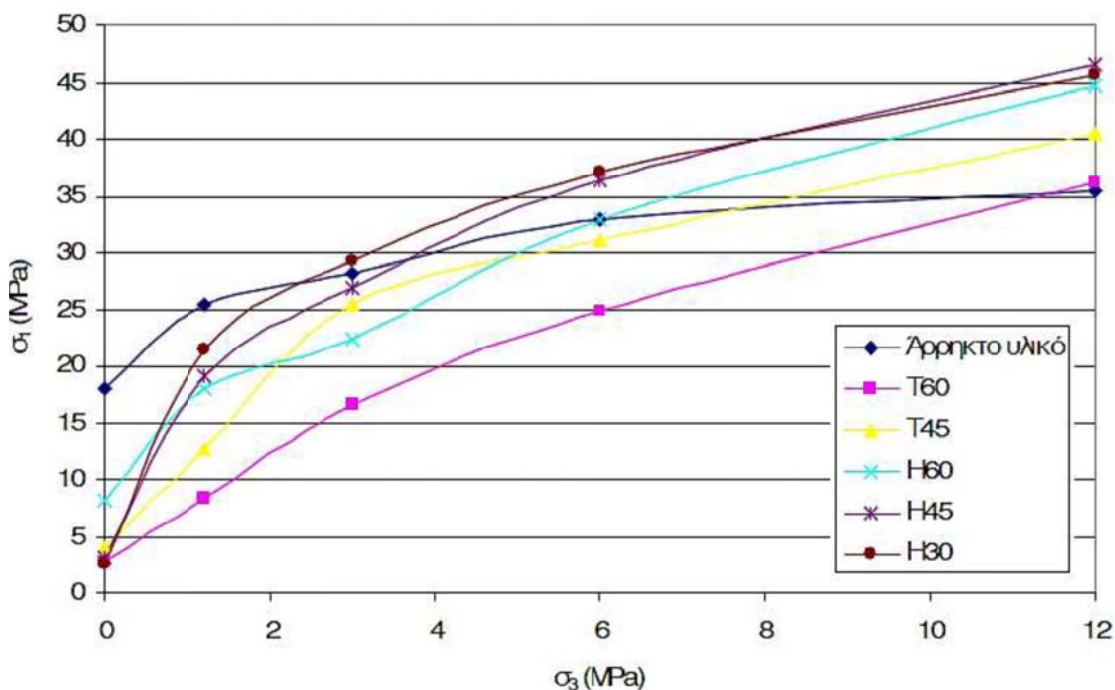
Σύμφωνα με τον Brown (1970) οι δομές αυτές δεν αντιπροσωπεύουν αναγκαστικά δομές βραχώμαζας που απαντώνται στη φύση, ωστόσο είναι σκόπιμη η εξέτασή τους για την παρατήρηση της συμπεριφοράς ρωγματομένου υλικού και την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του.

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



Σχήμα 16 Γεωμετρία δοκιμίων που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)

Οι περιβάλλουσες αστοχίας 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 17 Περιβάλλουσες αστοχίας των δοκιμών που εξετάστηκαν από τον Brown (1970)

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην πλευρική πίεση των 12.0MPa η αντοχή όλων των δοκιμών ήταν υψηλότερη από αυτήν του άρρηκτου δοκίμιου. Ένας πιθανός λόγος που συνέβη αυτό σύμφωνα με τον Brown είναι η επίδραση της κλίμακας. Η συμπεριφορά των δοκιμών 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 δοκιμών 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 δοκιμών 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) Διατμητική 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) Διατμητική θράυση σε επίπεδο που απαρτιζόταν κατά ένα μέρος από ασυνέχεια και κατά ένα από άρρηκτο υλικό
- (Ε) Διατμητική αστοχία σε πολλά επίπεδα που απαρτιζόνταν από άρρηκτο υλικό και ασυνέχειες
- (ΣΤ) Διατμητική αστοχία του άρρηκτου υλικού σε συζυγή επίπεδα για υψηλές τιμές πλευρικής πίεσης
- (Ζ) Διατμητικές αστοχίες σε συζυγή επίπεδα που περιείχαν άρρηκτο υλικό και ασυνέχειες

2 Μέθοδοι αριθμητικής προσο- μοίωσης – Ο κώδικας FLAC2D

2.1 Αριθμητικές μέθοδοι

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 προηγούμενη 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 προηγούμενη 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.

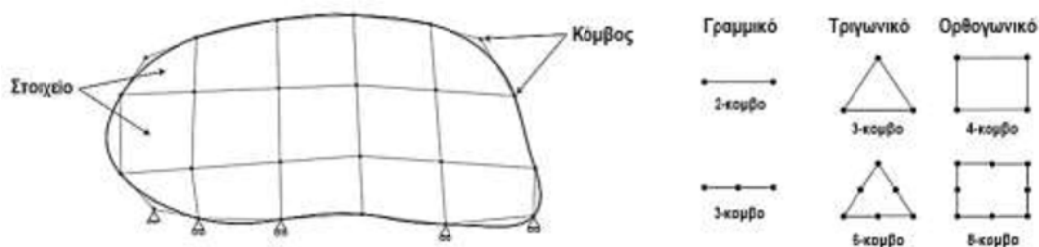
Οι αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε προβλήματα μηχανικής συμπεριφοράς της κερματισμένης βραχομάζας. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιήθηκε από τον Goodman (1968) για να μελετήσει την επίδραση της γεωμετρίας των ασυνεχειών στην αντοχή της μάζας του πετρώματος. Στη συνέχεια έγινε εκτεταμένη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου για διάφορα προβλήματα της μηχανικής συμπεριφοράς βραχομάζας, όπως για παράδειγμα ο προσδιορισμός ισοδύναμων μηχανικών και υδραυλικών παραμέτρων ρωγματωμένης βραχομάζας (Stietel et al., 1996), η εξέταση της αντοχής βραχομάζας (Pouya and Ghoreychi, 2001) κλπ.

Ωστόσο, εφόσον η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων όπως και η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στηρίζεται στη μηχανική του συνεχούς μέσου, δεν μπορεί να προσομοιώσει μεγάλες παραμορφώσεις και περιστροφές που συμβαίνουν στην πράξη στα πετρώματα, λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών.

Η προσομοίωση τέτοιων προβλημάτων μπορεί να επιτευχθεί με την μέθοδο των Διακριτών Στοιχείων. Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος κώδικας για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων είναι ο κώδικας UDEC (Universal Distinct Element Code) σε 2 διαστάσεις και ο κώδικας 3DEC (3Dimensional Distinct Element Code) σε 3 διαστάσεις. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν την δυνατότητα ικανοποιητικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς κερματισμένης βραχομάζας, ωστόσο δεν μπορούν να προσομοιώσουν τον μηχανισμό προοδευτικής αστοχίας που λαμβάνει χώρα σε αρκετές περιπτώσεις. Την λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνουν οι κώδικες PFC2D (Particle Flow Code) σε 2 διαστάσεις και PFC3D (Particle Flow Code) σε 3 διαστάσεις. Με τους κώδικες αυτούς είναι δυνατή η κίνηση και η αλληλεπίδραση σωματιδίων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των Διακριτών Στοιχείων.

2.2 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 18 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).

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.

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

Εξίσωση 18

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.

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

Εξίσωση 19

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 επιφάνειας 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*).

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 συντηρημένες 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.

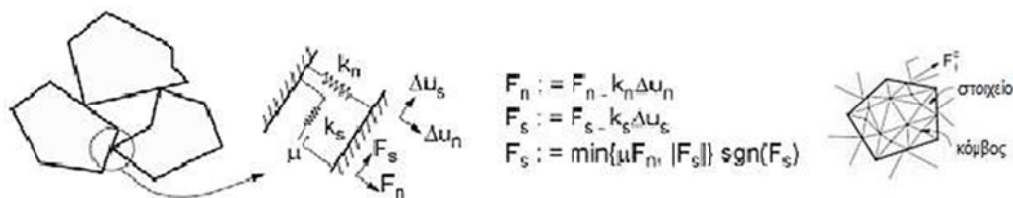
Τα **μειονεκτήματα** της μεθόδου αφορούν περισσότερο την τρισδιάστατη ανάλυση και είναι (Carter, 2000):

- 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 διατμημένου εδάφους όταν τα ελαττώματα αυτά κατανέμονται τυχαία και κυριαρχούν στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού.

2.3 Μέθοδος διακριτών στοιχείων

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 βραχόμαζας καθορίζουν τη γεωμετρία των στοιχείων διακριτοποίησης του προβλήματος). Τα στοιχεία αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καθένα είναι ελεύθερο να μετακινηθεί γραμμικά και στρο-

φικά (ολίσθηση, συμπίεση, εφελκυστικός αποχωρισμός, περιστροφή) χωρίς περιορισμούς και η παραμόρφωσή του μπορεί να παρακολουθηθεί μέχρι την αστοχία, αν η εκσκαφή είναι ασταθής.



Σχήμα 19 Σχηματική απεικόνιση διακριτών άρρηκτων στοιχείων και δυνάμεων στις επαφές (Itasca 2009)

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 συνοριακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων.
- Χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων του προβλήματος σε κάθε χρονικό βήμα, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο “explicit”, που επιτρέπει μεγάλες μετατοπίσεις και περιστροφές μέχρι την αστοχία, αν η εκσκαφή είναι ασταθής και γενικώς όταν υφίσταται μη γραμμική καταστατική συμπεριφορά των ασυνεχειών.

2.4 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM)

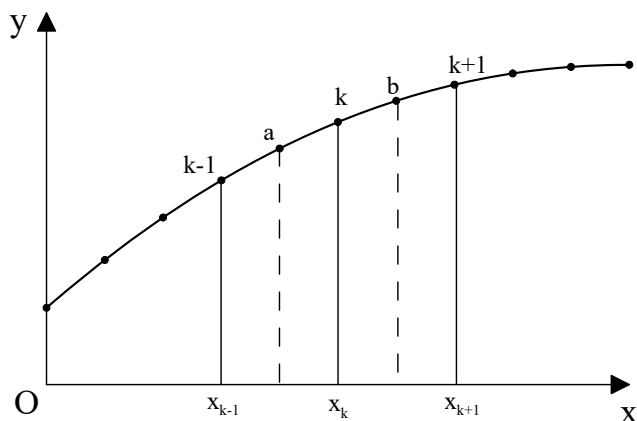
Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μία από τις πιο γνωστές και παλαιές προσεγγιστικές μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Όπως είναι γνωστό, η μέθοδος βασίζεται στην αντικατάσταση των διαφορικών εξισώσεων του προς επίλυση προβλήματος από τις αντίστοιχες εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών.

Ας θεωρήσουμε μία συνάρτηση $y=f(x)$. Η πρώτη της παράγωγος $f'(x_k)$ σε κάθε σημείο x_k μπορεί να εκφρασθεί προσεγγιστικά συναρτήσει των διαφορών $\Delta f_k = f(x) - f(x_k)$ της συνάρτησης $f(x)$ και $\Delta x_k = x - x_k$ της μεταβλητής x στη θέση k ως εξής:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_k} \cong \frac{\Delta f}{\Delta x_k} = \frac{f(x) - f(x_k)}{x - x_k}$$

Εξίσωση 20

Η παραπάνω προσέγγιση προς την πραγματική τιμή της παραγώγου είναι τόσο καλύτερη, όσο το μήκος Δx_k είναι μικρότερο.



Σχήμα 20 Η συνάρτηση $f(x)$ και τα σημεία k , $k-1$ και $k+1$.

Θεωρώντας τώρα τα σημεία $k-1$ και $k+1$ αριστερά και δεξιά του k αντίστοιχα σε απόσταση B , η πρώτη παράγωγος της $f(x)$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_k} = \frac{f_{k+1} - f_{k-1}}{2B} \quad \text{Εξίσωση 21}$$

Γεωμετρικά η εξίσωση 21 εκφράζει την παραδοχή ότι η εφαπτομένη της καμπύλης $f(x)$ στο σημείο k , είναι παράλληλη με την χορδή που ενώνει τα σημεία $k-1$ και $k+1$ της καμπύλης.

Με τη βοήθεια της εξίσωσης 21 η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης $f(x)$ στη θέση k υπολογίζεται συναρτήσει των πρώτων παραγώγων της στις θέσεις a , b , δηλ. τα μέσα αντίστοιχα των διαστημάτων $(k-1)-k$ και $k-(k+1)$. Προκύπτει έτσι:

$$\left(\frac{d^2 f}{dx^2}\right)_{x=x_k} = \frac{\left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_b} - \left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_a}}{x_b - x_a}$$

Από την εξίσωση 21 όμως είναι και:

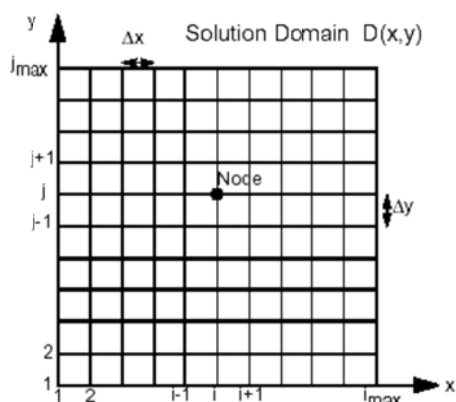
$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_b} = \frac{f_{k+1} - f_k}{B} \quad \text{και} \quad \left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_a} = \frac{f_k - f_{k-1}}{B}$$

και συνεπώς αντικαθιστώντας στην παραπάνω, προκύπτει:

$$\left(\frac{d^2 f}{dx^2}\right)_{x=x_k} = \frac{f_{k+1} - 2f_k + f_{k-1}}{2B}$$

Εξίσωση 22

Ακριβώς ανάλογα υπολογίζονται και η τρίτη και τέταρτη παράγωγος της συνάρτησης στο σημείο k . Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η υπό μελέτη περιοχή R διαιρείται σε ένα κάρναβο. Το παρακάτω **Σχήμα 21** απεικονίζει έναν απλό κάρναβο πεπερασμένων διαφορών. Το πεδίο στο οποίο γίνεται η επίλυση είναι το $D(x,y)$. Η απόσταση Δx είναι περίπου σταθερή. Το Δx δεν είναι απαραίτητο να ισούται με το Δy αλλά όταν συμβαίνει αυτό, έχει συνήθως πλεονεκτήματα κυρίως ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 21 Απλός κάρναβος πεπερασμένων διαφορών (Beaty and Byrne, 1999)

Η τιμή μιας συνάρτησης f , για τους κόμβους $x = i$, $y = j$ μπορεί να γραφτεί σαν f_{ij} . Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE's) που δημιουργούνται, μπορεί να είναι πρώτης ή δεύτερης τάξης, ως προς x ή ως προς y :

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial x} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial f_{ij}}{\partial y} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial x^2} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial^2 f_{ij}}{\partial y^2}$$

Μια από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι η εξίσωση Laplace. Αυτή περιγράφει τη ροή κατάστασης (steady state flow) υγρού ή θερμότητας. Εδώ, μετά τη σταθεροποίηση της κατάστασης δεν συμβαίνει καμιά αλλαγή με το χρόνο.

2.5 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών στο πρόγραμμα FLAC

2.5.1 Γενικά

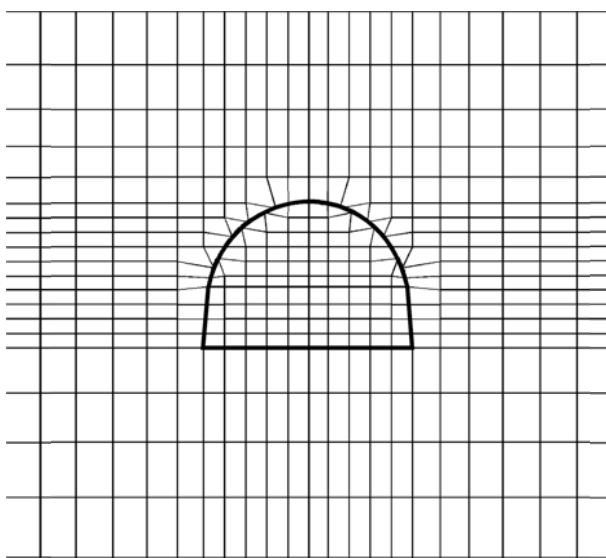
Το FLAC 6.0 είναι ένα διδιάστατο πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη συμπεριφορά διάφορων δομών, όπως εδάφη, πετρώματα ή και άλλων σχηματισμών, οι οποίοι παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά, όταν αυτές ξεπεράσουν τα όρια αντοχής τους. Τα υλικά αυτά προσομοιώνονται από στοιχεία (elements), ή ζώνες (zones), οι οποίες στο σύνολό τους αποτελούν έναν κάνναβο (grid), ο οποίος ρυθμίζεται από το χρήστη ώστε να ταιριάζει στο αντικείμενο μελέτης.

Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με καθορισμένο ελαστικό (elastic) ή ελαστοπλαστικό μοντέλο (κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb). Επίσης δίνεται η δυνατότητα επιλογής στοιχείων που αποτελούν τα εκσκαφθέντα υλικά (null). Τα μεγέθη δυνάμεων (forces), ταχυτήτων (velocities) και μετατοπίσεων (displacements) αναφέρονται στους κόμβους (gridpoints) του καννάβου, ενώ τα μεγέθη τάσεων (stresses), πιέσεων (pressure) και ιδιοτήτων των υλικών (material properties) στις ζώνες (zones) του. Σημαντικό στοιχείο του FLAC 6.0 είναι η δυνατότητα να προσομοιώσει την αποτόνωση του πετρώματος ελεγχόμενα μέσω του συντελεστή αποτόνωσης (relaxation factor), με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού FISH.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση προβλημάτων επίπεδων δίσκων, η επιφάνεια του δίσκου χωρίζεται σε στοιχεία του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους (τετράπλευρα ή τρίγωνα) γνωστής γεωμετρίας και ιδιοτήτων, δημιουργώντας έτσι ένα κάνναβο, οι κορυφές του οποίου καθορίζουν ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων. Η συμπεριφορά αυτών των στοιχείων στα προβλήματα ευστάθειας, όπως η περίπτωση ευστάθειας μίας σήραγγας, διατυπώνεται με καταστατικές εξισώσεις, που συνδέουν τις τάσεις με τις παραμορφώσεις, των στοιχείων εκείνων του μοντέλου του υλικού του δίσκου, το οποίον έχει επιλεγεί επειδή υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις ότι αντιπροσωπεύει καλύτερα από οποιοδήποτε άλλο την συμπεριφορά του υλικού, όταν τούτο καταπονείται. Κατά τη επιλογή αυτή λαμβάνεται υπόψη ο χαρακτηρισμός του υλικού από πλευράς συμπεριφο-

ράς (γραμμικώς ελαστικό, ελαστοπλαστικό κτλ.) και ανισοτροπίας και επιλέγεται εκείνο το κριτήριο αστοχίας (Mohr-Coulomb κτλ.) που περιγράφει καλύτερα την οριακή εντατική κατάσταση του υλικού. Στη συνέχεια προσδίδονται στο υλικό αυτό οι κατάλληλες ιδιότητες, που υπεισέρχονται στην μαθηματική παρουσίαση του προβλήματος και είναι διαθέσιμες από προηγηθείσα έρευνα ή από εκτίμηση. Με κατάλληλη άθροιση της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου προκύπτει η αναμενόμενη συμπεριφορά του δίσκου στο σύνολο του.

Στο **Σχήμα 22** δείχνεται ο τρόπος διαχωρισμού μίας βραχόμαζας, που περιβάλλει την διατομή σήραγγας, στην περίπτωση εφαρμογής του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC.

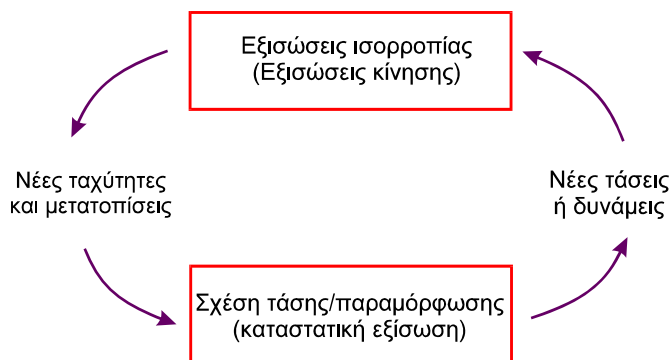


Σχήμα 22 Μοντέλο βραχόμαζας γύρω από σήραγγα και διαχωρισμός της σε στοιχεία στο πρόγραμμα FLAC.

Στην περίπτωση των πεπερασμένων διαφορών δεν ενδιαφέρει η ακριβής αναλυτική έκφραση των συναρτήσεων που επιλύουν το εκάστοτε πρόβλημα. Για την επίλυση για παράδειγμα ενός προβλήματος επίπεδης ελαστικότητας αναζητούνται οι τιμές της εντατικής συνάρτησης στις κορυφές του κανάβου. Στη συνέχεια οι άγνωστες ποσότητες υπολογίζονται σε κάθε σημείο του κανάβου με την επίλυση του αντίστοιχου αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων.

Η σειρά υπολογισμών που πραγματοποιείται στο πρόγραμμα FLAC, δίνεται στο **Σχήμα 23**. Κατά τη διαδικασία του **Σχήμα 23**, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της κίνησης για να υπολογισθούν οι ταχύτητες και μετατοπίσεις, που οφείλονται στις ασκούμενες τάσεις και δυνάμεις, σε κάθε σημείο του κανάβου. Κατόπιν υπολογίζονται οι ρυθμοί μεταβο-

λής των παραμορφώσεων, που οφείλονται στις αναπτυσσόμενες ταχύτητες και οι νέες τάσεις, που οφείλονται στις δημιουργούμενες παραμορφώσεις. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε κάθε υπολογιστικό χρονικό βήμα, για κάθε σημείο του καννάβου του προσομοιώματος.



Σχήμα 23 Διάγραμμα ροής του κύκλου υπολογισμών που πραγματοποιείται στο FLAC.

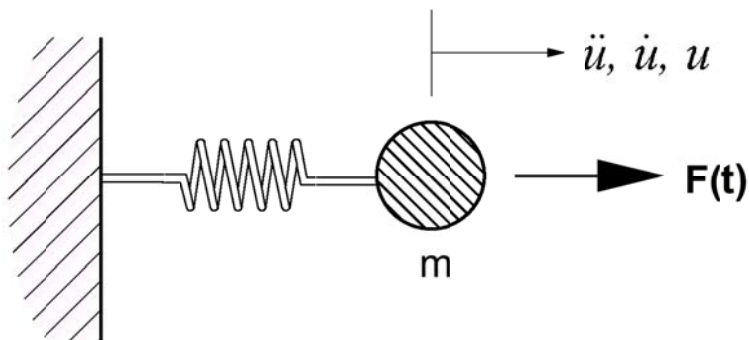
2.5.2 Εξισώσεις κίνησης και ισορροπίας

Το FLAC χρησιμοποιεί για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος, στατικού ή δυναμικού, την εξίσωση της κίνησης, η οποία στην απλούστερη μορφή της γράφεται **Σχήμα 23**:

$$F = \frac{d\dot{u}}{dt} \times m$$

Εξίσωση 23

όπου m η μάζα του σώματος
 F η εφαρμοζόμενη στο στερεό σώμα δύναμη
 $\frac{d\dot{u}}{dt}$ η επιτάχυνση της μάζας



Σχήμα 24 Εφαρμογή δύναμης $F=F(t)$ σε μάζα m , που προκαλεί τη μονοδιάστατη κίνηση της μάζας.

Προκειμένου για ένα συνεχές μέσο η Εξίσωση 23 γενικεύεται ως εξής:

$$\rho \times \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

Εξίσωση 24

όπου:

- ρ η πυκνότητα του μέσου,
- t ο χρόνος,
- x_i οι συνιστώσες του διανύσματος θέσης,
- g_i οι συνιστώσες της επιτάχυνσης της βαρύτητας, και
- σ_{ij} οι συνιστώσες του τανυστή των τάσεων

Στην **Εξίσωση 23** και στις επόμενες ο δείκτης i υποδηλώνει συνιστώσα σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων. Με τη χρησιμοποίηση των Εξισώσεων 23 και 24 εξασφαλίζεται η αριθμητική ευστάθεια της επίλυσης του προβλήματος ακόμη και σε περιπτώσεις μηχανικής αστάθειας του φυσικού προβλήματος (π.χ. αιφνίδια αστοχία ενός στύλου).

2.5.3 Διατύπωση των καταστατικών εξισώσεων

Το πρόγραμμα των πεπερασμένων διαφορών FLAC συνίσταται από ένα δισδιάστατο κώδικα, ο οποίος προσομοιάζει την μηχανική συμπεριφορά δομών παραμορφωσίμων γεωλογικών υλικών με καθορισμένες καταστατικές σχέσεις. Τα διάφορα γεωυλικά παρίστανται από στοιχεία (ή αλλιώς ζώνες), που καθορίζονται όπως δείχνει το Σχήμα 22 από τέσσερις κόμβους (ή αλλιώς δικτυοσημεία) σχηματίζοντας τελικά ένα κάρναβο προσαρμοσμένο στο

γεωμετρικό σχήμα της υπό προσομοίωση κατασκευής. Οι κόμβοι και τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από δύο αριθμούς συντεταγμένων που επισημαίνουν την σχετική θέση του κόμβου (ή της ζώνης) κατά μήκος των αξόνων -x και -y του μοντέλου. Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με την καθορισμένη γραμμική ή μη-γραμμική σχέση τάσης/παραμόρφωσης, σε αντίδραση των επιβαλλομένων φορτίων ή των οριακών περιορισμών.

Η υπόψη μέθοδος κατά την μοντελοποίηση του προς επίλυση προβλήματος δημιουργεί ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων του τύπου **Εξίσωση 25** ο οποίος περιγράφει την παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

Εξίσωση 25

όπου:

$\dot{\epsilon}_{ij}$ ο ρυθμός μεταβολής των παραμορφώσεων

\dot{u}_i οι συνιστώσες της ταχύτητας

Οι καταστατικοί νόμοι είναι της μορφής **Εξίσωση 26** :

$$\sigma_{ij} := M(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, \kappa)$$

Εξίσωση 26

όπου:

$M(\)$ είναι η συνάρτηση του καταστατικού νόμου,

κ είναι μία χρονική παράμετρος η οποία μπορεί να είναι ή να μην είναι παρούσα (εξαρτάται από τον συγκεκριμένο καταστατικό νόμο).

Ο απλούστερος καταστατικός νόμος είναι της παρακάτω μορφής όπως στην **Εξίσωση 27** και αφορά την περίπτωση ενός ισότροπου ελαστικού υλικού:

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + \left\{ \delta_{ij} \left(K - \frac{2}{3} G \right) \dot{\epsilon}_{kk} + 2G \dot{\epsilon}_{ij} \right\} \Delta t$$

Εξίσωση 27

όπου:

δ_{ij} = το δέλτα του Kronecker

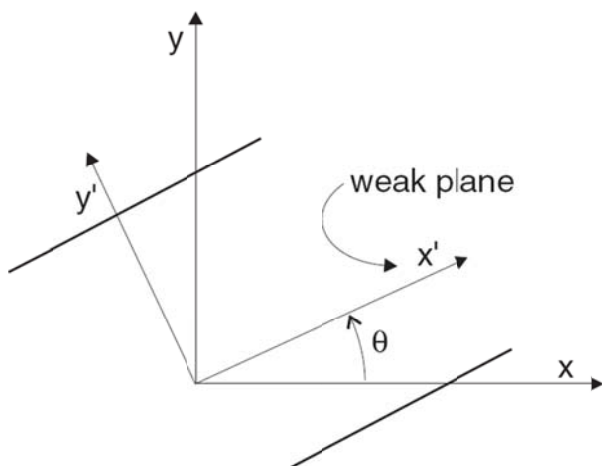
Δt = χρονικό βήμα

G, K = τα μέτρα διάτμησης και σύνογκου παραμόρφωσης αντίστοιχα.

Οι ρυθμοί μεταβολής των παραμορφώσεων σε κάθε σημείο του κανάβου υπολογίζονται από τη **Εξίσωση 25**. Οι τάσεις σε κάθε ζώνη προκύπτουν από τη σχέση **Εξίσωση 26**.

2.5.4 Περιγραφή Μοντέλου *Ubiquitous Joint*

Το μοντέλο “Ubiquitous Joint”, το οποίο περιλαμβάνεται στα μοντέλα του FLAC 6.0 αποτέλεσε και το βασικό μοντέλο επίλυσης σε όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αποτελεί ένα μοντέλο ανισότροπης πλαστικότητας που περιλαμβάνει καθορισμένου προσανατολισμού ασυνέχειες ενσωματωμένες σε υλικό Mohr – Coulomb.



Σχήμα 25 Παρουσία διεύθυνσης ασυνέχειας με κλίση θ σε υλικό Mohr – Coulomb στο αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων (x, y, x', y')

$$\sigma'_{11} = \sigma_{11} \cos^2 \theta + 2\sigma_{12} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{22} \sin^2 \theta$$

Εξίσωση 28

$$\sigma'_{22} = \sigma_{11} \sin^2 \theta - 2\sigma_{12} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{22} \cos^2 \theta$$

Εξίσωση 29

$$\sigma'_{33} = \sigma_{33}$$

Εξίσωση 30

$$\sigma'_{12} = -(\sigma_{11} - \sigma_{11})\sin\theta \cos\theta + \sigma_{12}(\cos^2\theta - \sin^2\theta)$$

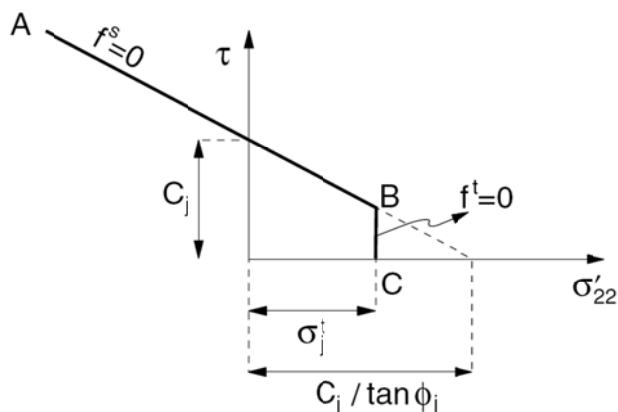
Εξίσωση 31

όπου,

θ είναι η γωνία της ασυνέχειας μετρημένη αριστερόστροφα από τον xx' .

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η αστοχία μπορεί να συμβεί είτε στο υλικό του πετρώματος είτε κατά μήκος των ασυνεχειών ή ακόμα και στα δύο, αναλόγως του εντατικού πεδίου, του προσανατολισμού των ασυνεχειών και των χαρακτηριστικών που έχουν δοθεί στις ασυνέχειες και στο υλικό του πετρώματος. Το κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.

Κατά τη διαδικασία επίλυσης του FLAC χρησιμοποιείται η τεχνική στην οποία εντοπίζεται αρχικά η γενική αστοχία και έπειτα εφαρμόζονται οι ανάλογες πλαστικές διορθώσεις, όπως περιγράφεται στο μοντέλο Mohr – Coulomb του FLAC. Οι νέες τάσεις αναλύονται για την περίπτωση της αστοχίας των ασυνεχειών και ανανεώνονται αναλόγως. Το κριτήριο αστοχίας που αφορά στις ασυνέχειες είναι μία μορφή του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb με αποκοπή της εφελκυστικής αντοχής της ασυνέχειας.



Σχήμα 26 Κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας στο λογισμικό FLAC

Η τοπική αστοχία ορίζεται από το σημείο A στο B μέσω του κριτηρίου Mohr – Coulomb όταν $f^s = 0$, όπου είναι:

$$f^s = -\tau - \sigma'_{22} \tan\varphi_j + c_j$$

Εξίσωση 32

και από το σημείο B στο C από το κριτήριο αστοχία σε εφελκυσμό όταν $f^t = 0$, όπου είναι

$$f^t = \sigma_j^t - \sigma'_{22}$$

Εξίσωση 33

όπου φ_j , c_j , c_j^t είναι η γωνία εσωτερικής τριβής, η συνοχή και η αντοχή σε εφελκυσμό της ασυνέχειας, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ασυνέχεια με μη μηδενική τιμή εσωτερικής τριβής η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\sigma_{j,max}^t = \frac{c_j}{\tan\varphi_j}$$

Εξίσωση 34

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν παρακάτω οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα προσομοίωσης.

bulk_mod: ελαστικό μέτρο διόγκωσης, K

shear_mod: ελαστικό μέτρο διάτμησης, G

cohesion: συνοχή του υλικού του πετρώματος

density: ειδικό βάρος του υλικού του πετρώματος

dilation: διαστολικότητα

friction: γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού του πετρώματος

tension: αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού του πετρώματος

jangle: γωνία κλίσης των ασυνεχειών μετρημένη αριστερόστροφα από τον xx'

jcohesion: συνοχή των ασυνεχειών

jdilation: διασταλτικότητα των ασυνεχειών

jfriction: γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών

jtension: αντοχή σε εφελκυσμό των ασυνεχειών

3 Αναλυτικός υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας

3.1 Θεωρία μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας

Για τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας μπορεί, ως μία πρώτη προσέγγιση, να εφαρμοσθεί η θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας, που παρουσιάστηκε αρχικά από τον Jaeger (1960), θεωρώντας ότι η βραχομάζα περιέχει 1 έως λίγα επίπεδα αδυναμίας κάθε ένα με διαφορετικό προσανατολισμό ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης.

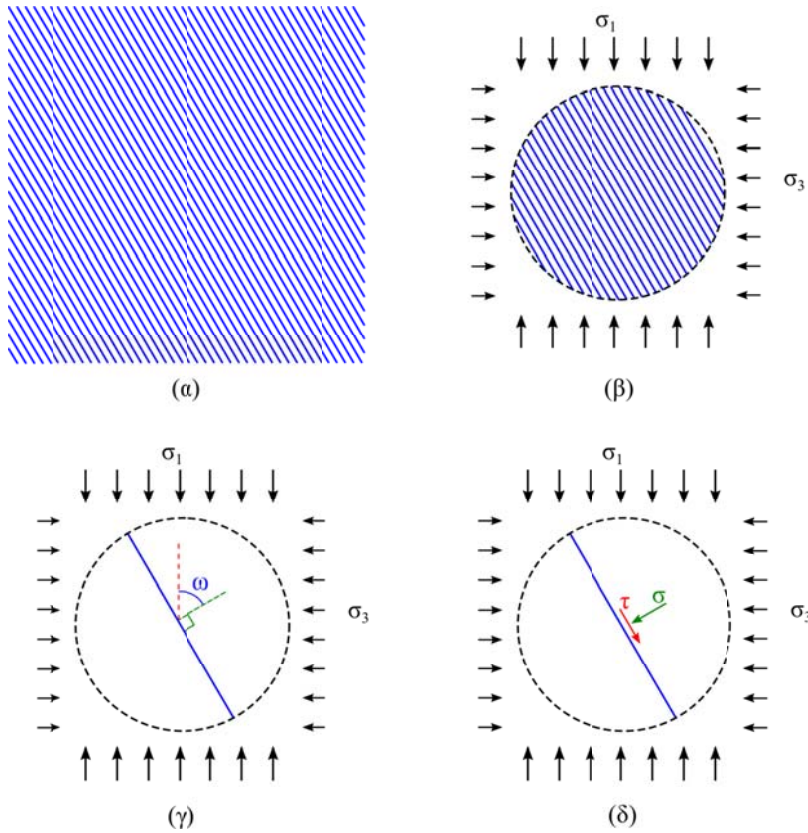
Στο **Σχήμα 27(α)** φαίνεται βραχομάζα με ένα σύνολο ασυνεχειών μεγάλης εμμοχής, ενώ στο **Σχήμα 27(β)** φαίνεται τμήμα της βραχομάζας που φορτίζεται με κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 . Στο **Σχήμα 27(γ)** απομονώνεται μία μόνο ασυνέχεια από το σύνολο των ασυνεχειών. Η κάθετος στην ασυνέχεια σχηματίζει γωνία ω με τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 . Στο επίπεδο της ασυνέχειας ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις **Σχήμα 27(δ)** που δίνονται από τις σχέσεις:

Εξίσωση 35

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\omega$$

Εξίσωση 36

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\omega$$



Σχήμα 27 (α) Βραχομάζα με ένα σύνολο ασυνεχειών. (β) Τμήμα της βραχομάζας που φορτίζεται με κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 . (γ) Η κάθετος στην ασυνέχεια σχηματίζει γωνία ω με τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. (δ) Ορθές και διατμητικές τάσεις στο επίπεδο της ασυνέχειας. (Νομικός 2015)

Διαπιστώνεται ότι τόσο η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών όσο και ο προσανατολισμός του εντατικού πεδίου καθορίζουν τη δυνατότητα ολίσθησης στις ασυνέχειες της βραχομάζας. Για διάφορους προσανατολισμούς του εντατικού πεδίου, όπως στο **Σχήμα 28**, η μέγιστη κύρια τάση, που απαιτείται για να συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια, μπορεί να υπολογιστεί αντικαθιστώντας την ορθή και διατμητική τάση από τις **Εξίσωση 35** και **Εξίσωση 36** στο κριτήριο διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb. Ύστερα από πράξεις προκύπτει:

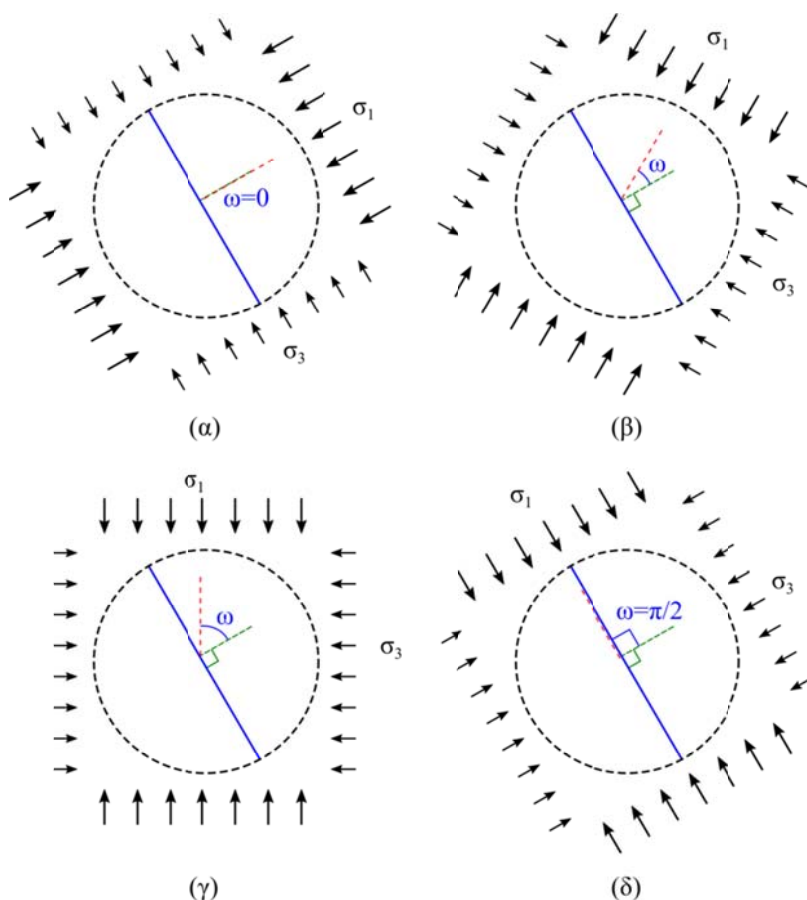
Εξίσωση 37

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \left(1 + \frac{2|\csc 2\omega|}{\cot \varphi_j - |\cot \omega|} \right) \geq 0 \quad , \quad \sigma_3 > 0$$

$\csc(\cdot) = 1/\sin(\cdot)$ είναι η συντέμνουσα και $\cot(\cdot) = 1/\tan(\cdot)$ η συνεφαπτομένη. Η **Εξίσωση 37** έχει ελάχιστο για $\omega = \pi/4 + \varphi_j/2$ και ασύμπτωτες για $\omega = 0$ και $\omega = \varphi_j$. Η ελάχιστη τιμή του λόγου σ_1/σ_3 μπορεί να υπολογιστεί από την **Εξίσωση 37** για $\omega = \pi/4 + \varphi_j/2$:

Εξίσωση 38

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 1 + 2 \tan(45 + \varphi_j/2) \tan(\varphi_j) , \quad \sigma_3 > 0$$



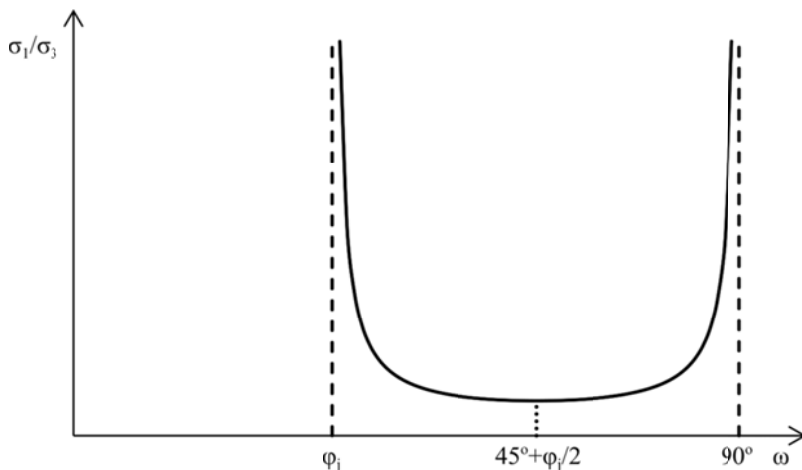
Σχήμα 28 Μεταβολή του προσανατολισμού του εντατικού πεδίου (Νομικός 2015).

Η Εξίσωση 37 σχεδιάζεται στο Σχήμα 29, από το οποίο παρατηρείται ότι ολίσθηση στο επίπεδο της ασυνέχειας μπορεί να συμβεί για τιμές της γωνίας ω στο διάστημα $(\varphi_j, 90^\circ)$. Για όλες τις υπόλοιπες γωνίες είναι δυνατή μόνο η αστοχία του άρρηκτου πετρώματος. Αστοχία του άρρηκτου πετρώματος θεωρείται ότι συμβαίνει όταν επιτυγχάνεται η κορυφαία αντοχή του για δεδομένη τιμή της σ_3 . Εάν το πέτρωμα αστοχεί σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb, ο λόγος των κυρίων τάσεων κατά την κορυφαία αντοχή δίνεται από τη σχέση:

Εξίσωση 39

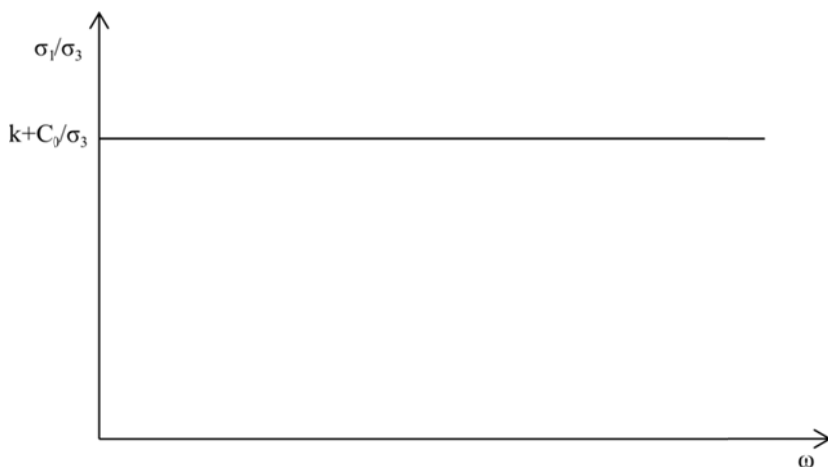
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = k + C_0/\sigma_3 \geq 0 \quad , \quad \sigma_3 > 0$$

$k=(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$ είναι η κλίση του κριτηρίου M-C σε διάγραμμα αξόνων κυρίων τάσεων και C_0 η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 29 Λόγος σ_1/σ_3 για να συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια συναρτήσει της γωνίας ω σύμφωνα με την εξίσωση 37.

Η **Εξίσωση 39** είναι ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό του εντατικού πεδίου (υπό την προϋπόθεση ότι το πέτρωμα είναι ισότροπο), και η γραφική της παράσταση σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ είναι μία ευθεία παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 30**.



Σχήμα 30 Γραφική παράσταση αντοχής άρρηκτου πετρώματος σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την εξίσωση 39.

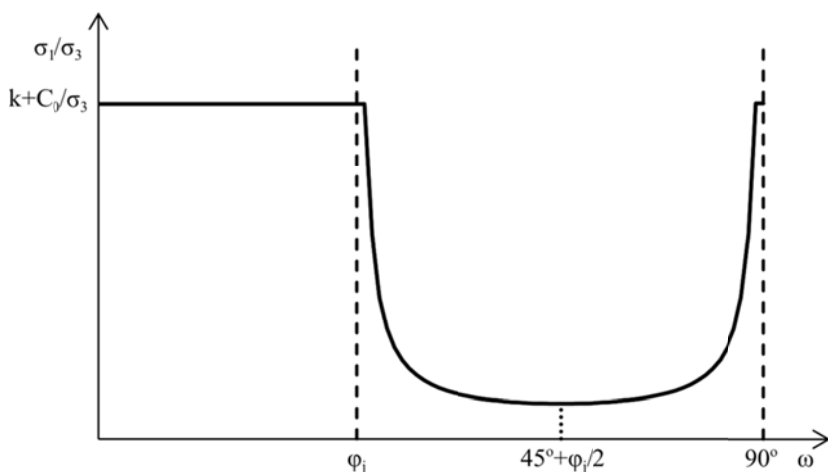
Η αντοχή του τμήματος της βραχομάζας με μία ασυνέχεια για κάθε γωνία ω μπορεί να προκύψει ως η ελάχιστη τιμή μεταξύ της αντοχής της ασυνέχειας και της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος:

Εξίσωση 40

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{2|\csc 2\omega|}{\cot \varphi_j - |\cot \omega|} \geq 0 \\ k + \frac{C_0}{\sigma_3} \geq 0 \end{array} \right. , \quad \sigma_3 > 0$$

Η γραφική παράσταση της **Εξίσωση 40** σχεδιάζεται στο **Σχήμα 31** από το οποίο προκύπτει η μεταβολή της αντοχής του τμήματος της βραχομάζας με μία ασυνέχεια συναρτήσει της γωνίας ω . Ανάλογα με τον προσανατολισμό του εντατικού πεδίου, μπορεί να συμβεί είτε αστοχία του άρρηκτου πετρώματος, λόγω επίτευξης της κορυφαίας αντοχής του, είτε ολίσθηση στην ασυνέχεια.

Παρόλο που το διάγραμμα στο **Σχήμα 31** έχει υπολογιστεί για μία ασυνέχεια, οι αριθμητικές προσομοιώσεις των Halakatevakis & Sofianos (2010) δείχνουν ότι η ίδια αντοχή υπολογίζεται και για περισσότερες από μία ασυνέχειες ενός συνόλου ασυνεχειών και μάλιστα ανεξάρτητα από τη μεταξύ τους απόσταση. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι η μεταβολή της αντοχής που προκύπτει από το **Σχήμα 31** ισχύει και για το τμήμα της βραχομάζας στο **Σχήμα 27(β)**.

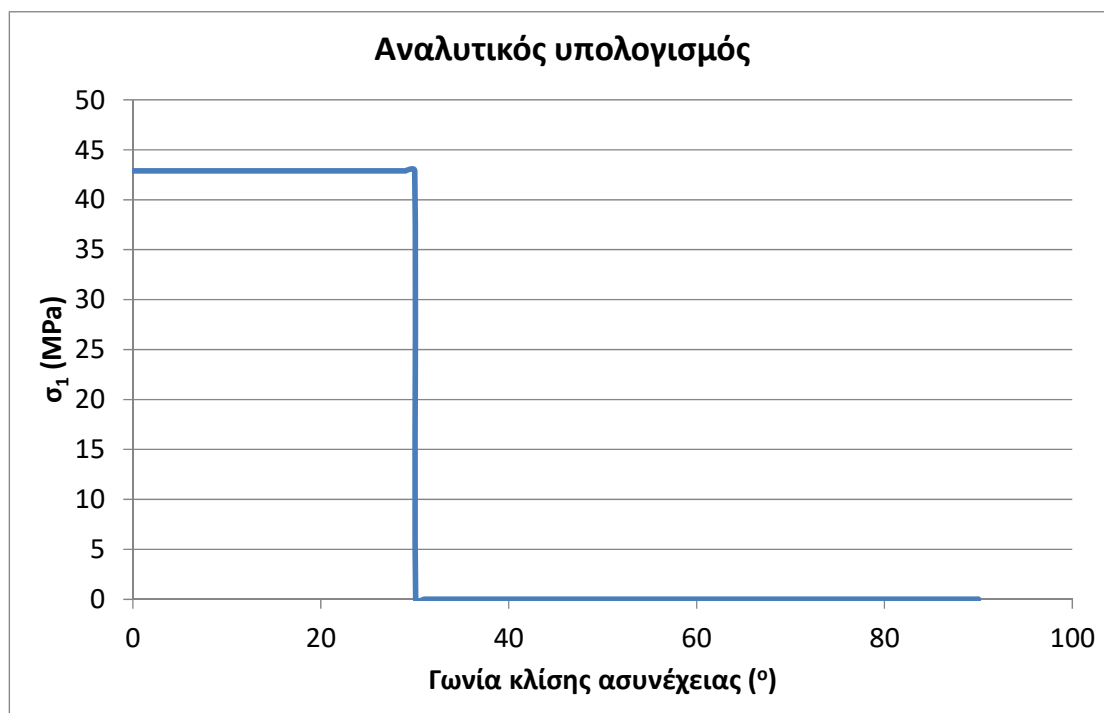


Σχήμα 31 Γραφική παράσταση της μεταβολής της αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3 - \omega$ σύμφωνα με την Εξίσωση 40.

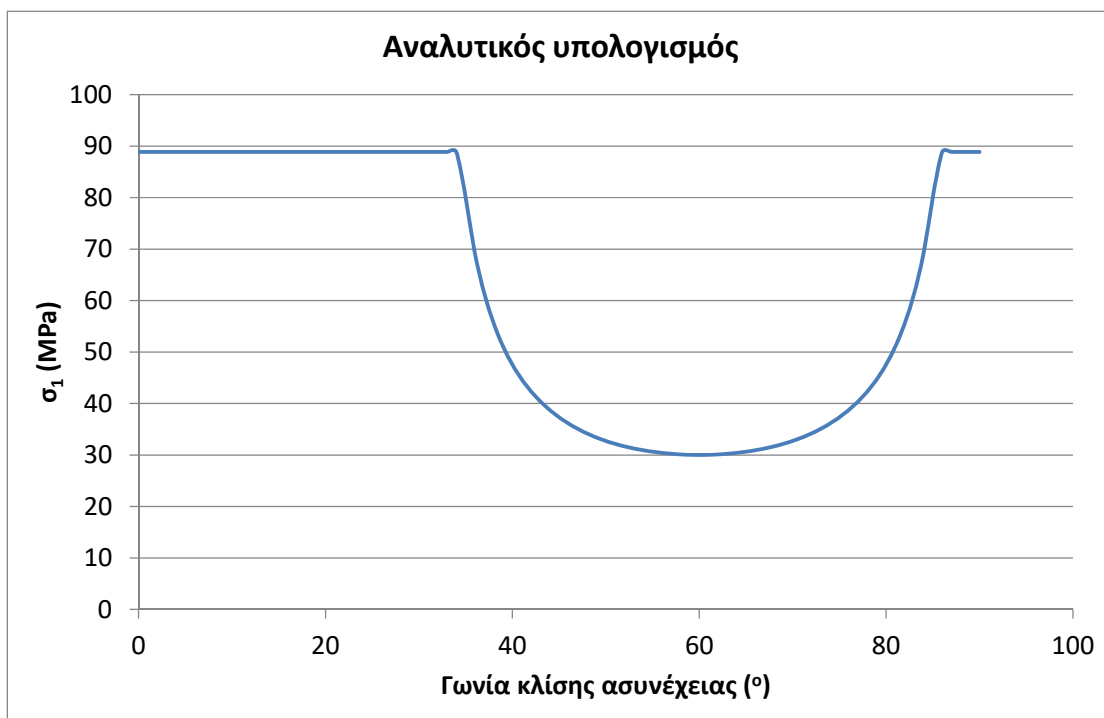
3.2 Αριθμητική εφαρμογή

Για την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, θεωρούμε βραχομάζα με παραμέτρους αντοχής άρρηκτου πετρώματος σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb συνοχή $c=10$ MPa και γωνία τριβής $\phi=40^\circ$. Οι ασυνέχειες θεωρείται ότι ακλουθούν επίσης το γραμμικό κριτήριο Coulomb με γωνία τριβής $\phi_j=30^\circ$ και μηδενική συνοχή ($c_j=0$). Με εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει στο **Σχήμα 32** η μονοαξονική αντοχή ενός δοκιμίου της βραχομάζας συναρτήσει της γωνίας κλίσης της ασυνέχειας, ενώ στο **Σχήμα 33** για πλευρική πίεση ίση με 10 MPa.

Παρατηρείται ότι, για μηδενική πλευρική πίεση η αντοχή μηδενίζεται για γωνίες κλίσης της ασυνέχειας μεγαλύτερες από τη γωνία τριβής των ασυνεχειών. Αντίστοιχα, για πλευρική πίεση 10 MPa η αντοχή περιγράφεται από μία σκαφοειδή καμπύλη για γωνίες κλίσεις της ασυνέχειας μεταξύ των 30° και 90° , με ελάχιστη τιμή τη γωνία των $45+\phi/2=60^\circ$.



Σχήμα 32 Γραφική παράσταση της μεταβολής της μονοαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων σ_1 - ω .



Σχήμα 33 Γραφική παράσταση της μεταβολής της τριαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων σ_1 - ω για πλευρική πίεση 10 MPa.

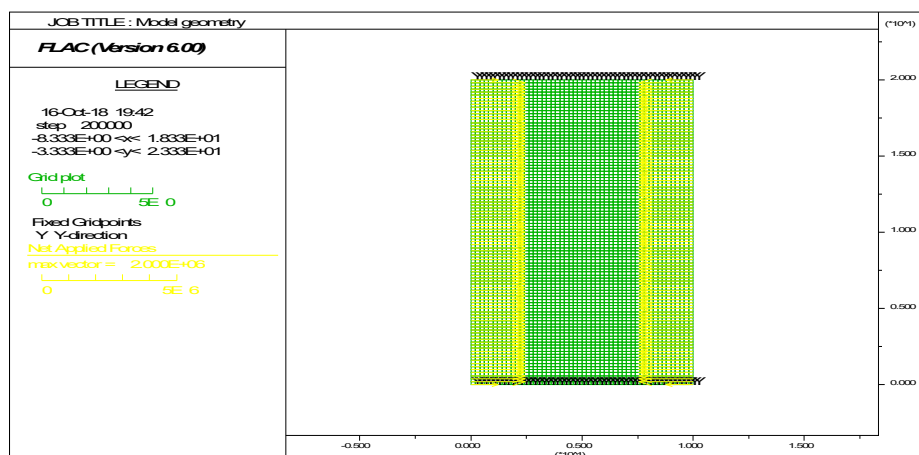
4 Αριθμητικός υπολογισμός αντοχής ανισότροπης βραχομάζας: προετοιμασία μοντέλων και αποτελέσματα

4.1 Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων

Για τον αριθμητικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας χρησιμοποιήθηκε ο διδιάστατος κώδικας FLAC2D και το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint, που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 2.

Η γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου δίνεται στο **Σχήμα 34**. Ο κάρναβος των πεπερασμένων διαφορών αποτελείται από 50 ζώνες κατά x και 100 ζώνες κατά y, ενώ το μέγεθος του αριθμητικού δοκιμίου έχει διαστάσεις 20 m ύψος και 10 m πλάτος.

Με το υπόψη αριθμητικό μοντέλο επιδιώκουμε την προσομοίωση μίας δοκιμής μονοαξονικής ή τριαξονικής θλίψης. Το κάτω όριο του μοντέλου διατηρείται σταθερό κατά x ενώ επιτρέπεται η οριζόντια μετατόπιση (εντολή fix y). Για την ανάπτυξη των κατακόρυφων τάσεων στο άνω όριο του μοντέλου εφαρμόζεται μία ταχύτητα $v=10^{-6}$ m/sec. Για την εφαρμογή πλευρικής πίεσης, στα πλευρικά όρια του μοντέλου ορίζονται εντατικές συνοριακές συνθήκες, οι οποίες μετατρέπονται αυτόματα από τον κώδικα FLAC σε δυνάμεις στους κόμβους του μοντέλου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 34**



Σχήμα 34 Γεωμετρία αριθμητικού μοντέλου.

Συνολικά προετοιμάστηκαν και επιλύθηκαν οι παρακάτω σειρές αριθμητικών μοντέλων:

- 1^η σειρά: επίλυση με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb, χωρίς πλευρική πίεση. Προετοιμάστηκε για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του κώδικα.
- 2^η σειρά: επίλυση με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb, με πλευρική πίεση ίση με 10 MPa. Προετοιμάστηκε για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του κώδικα.
- 3^η σειρά: Σειρά UJ1-με πλευρική πίεση, όπου σε όλες οι ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η σειρά αυτή προετοιμάστηκε με αραιό κάρναβο για σύγκριση με τη θεωρητική λύση.
- 4^η σειρά: Σειρά UJ1-χωρίς πλευρική πίεση, όπου σε όλες οι ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η σειρά αυτή προετοιμάστηκε με αραιό κάρναβο για σύγκριση με τη θεωρητική λύση.
- 5^η σειρά: Ijoint-distance 0.1, όπου σε αυτά τα μοντέλα προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας.
- 6^η σειρά: Ijoint-distance 0.2, όπου σε αυτά τα μοντέλα προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.2 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας.
- 7^η σειρά: Ijoint-distance 0.1-ίδιες ιδιότητες. Η σειρά αυτή είναι παρόμοια με την 5^η σειρά, με τη διαφορά ότι στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ οι παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος τίθενται ίδιες με τις παραμέτρους αντοχής της ασυνέχειας.
- 8^η σειρά: Ijoint-distance 0.2-ίδιες ιδιότητες. Η σειρά αυτή είναι παρόμοια με την 6^η σειρά, με τη διαφορά ότι στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ οι παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος τίθενται ίδιες με τις παραμέτρους αντοχής της ασυνέχειας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων με παρουσία ασυνεχειών.

4.2 Σειρά UbJ1-με πλευρική πίεση

Σε αυτή τη σειρά αριθμητικών μοντέλων, σε όλες τις ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint με τις παρακάτω ιδιότητες:

πυκνότητα=2500 kg/m³

ελαστικές ιδιότητες:

Μέτρο συστολής (bulk modulus)=2.77778x10¹⁰ Pa

Μέτρο διάτμησης (shear modulus)=2.08333 x10¹⁰ Pa

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος:

Συνοχή (cohesion)=10 x10⁶ Pa

Γωνία τριβής (friction)=40.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)=4.2 x10⁶ Pa

Ιδιότητες ασυνεχειών:

Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°

Συνοχή (jcohesion)=0.0

Γωνία τριβής (jfriction)=30.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

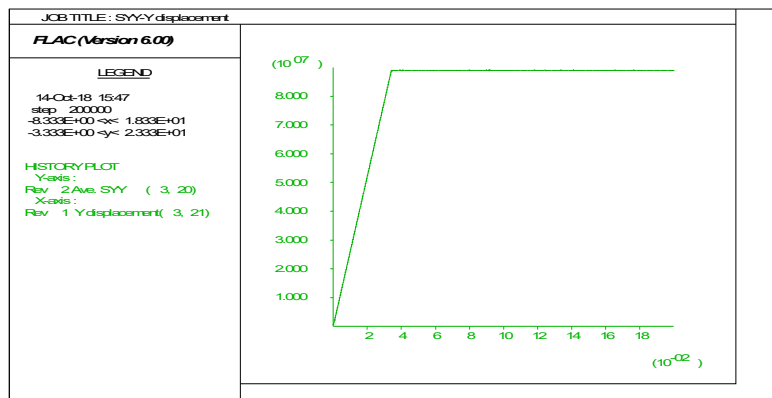
Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

Σκοπός αυτών των μοντέλων είναι η σύγκριση της υπολογιζόμενης αντοχής της ανισότροπης βραχομάζας με την αναλυτική λύση.

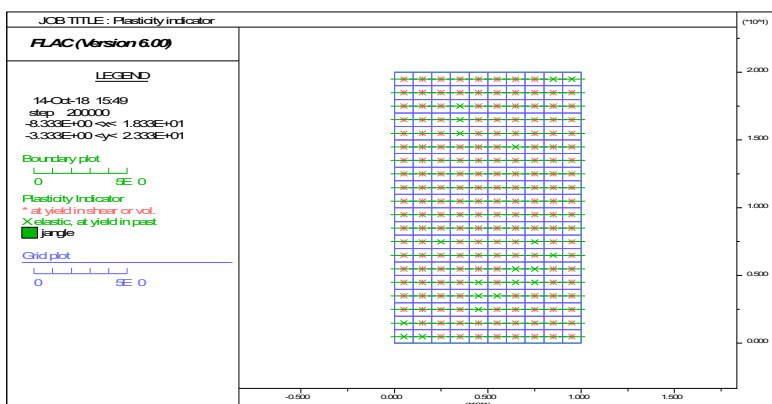
4.2.1 Γωνία κλίσης 0°

Στο *Σχήμα 35* δείχνεται το διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα). Από αυτό διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά του μοντέλου με γωνία κλίσης 0° είναι ελαστοπλαστική, όπως και του άρρηκτου πετρώματος. Από το *Σχήμα 36* παρατηρείται ότι έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Αντίθετα οι ασυνέχειες δεν έχουν ολισθήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η γωνία κλίσης τους είναι 0°. Στο *Σχήμα 37* δείχνεται η αύξηση της μέγιστης διατμητικής τροπής (maximum shear strain) στον τρέχον υπολογιστικό κύκλο. Παρατηρείται ότι σε όλες τις ζώνες του μοντέλου η αύξηση αυτή είναι παρόμοια, που πρακτικά σημαίνει ότι

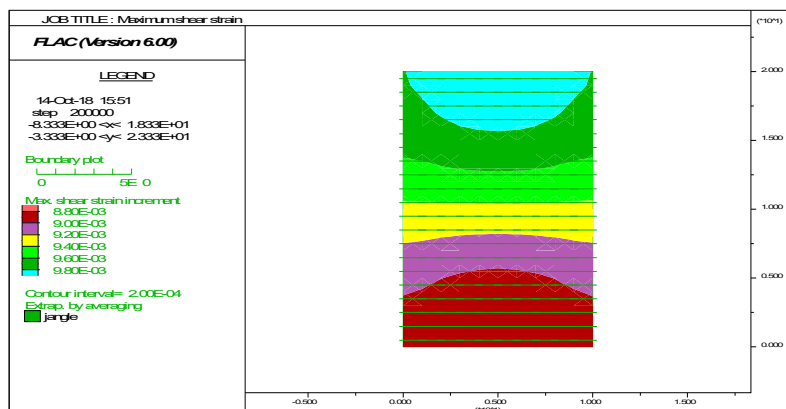
δεν αναπτύσσεται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής και το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά.



Σχήμα 35 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

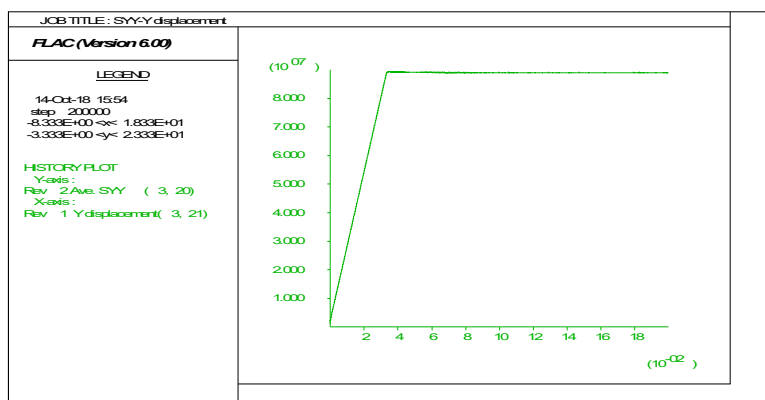


Σχήμα 36 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



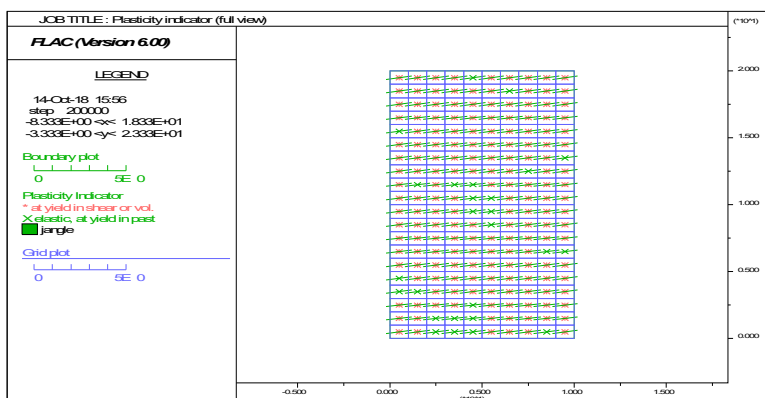
Σχήμα 37 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.2.2 Γωνία κλίσης 10°



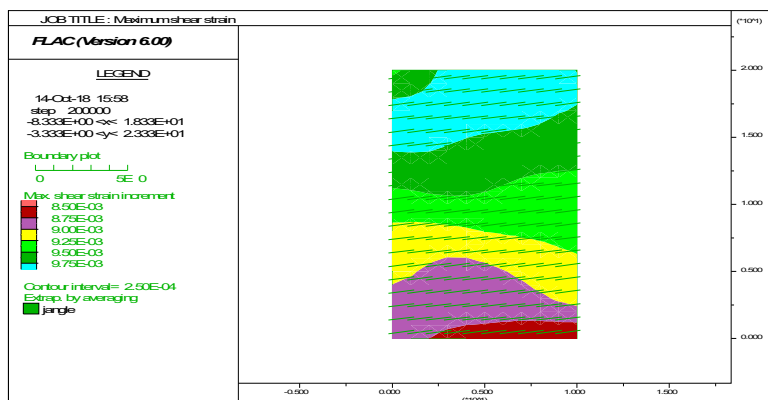
Σχήμα 38 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η συμπεριφορά του μοντέλου με γωνία κλίσης 10° είναι ελαστοπλαστική, όπως και του άρρηκτου πετρώματος



Σχήμα 39 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

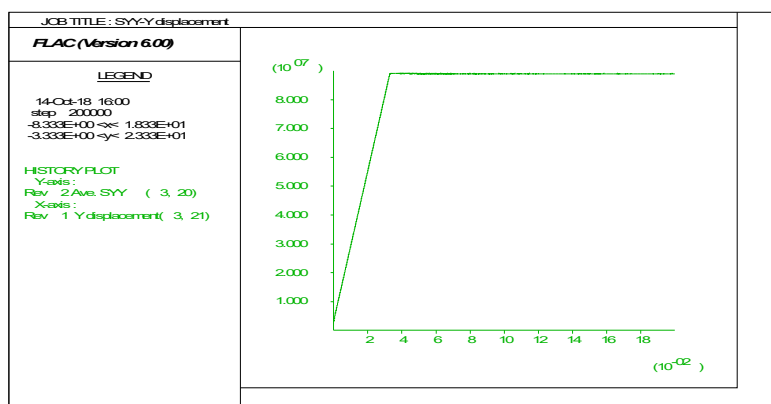
Έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Αντίθετα οι ασυνέχειες δεν έχουν ολισθήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η γωνία κλίσης τους είναι 10°.



Σχήμα 40 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

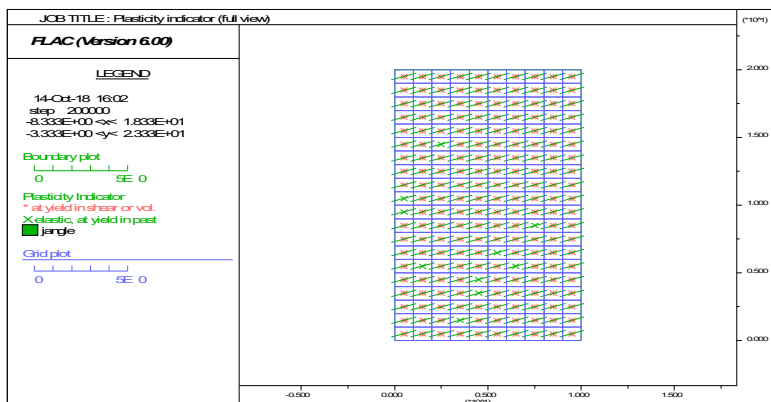
Παρατηρείται ότι σε όλες τις ζώνες του μοντέλου η αύξηση αυτή είναι παρόμοια, που πρακτικά σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής και το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά.

4.2.3 Γωνία κλίσης 20°



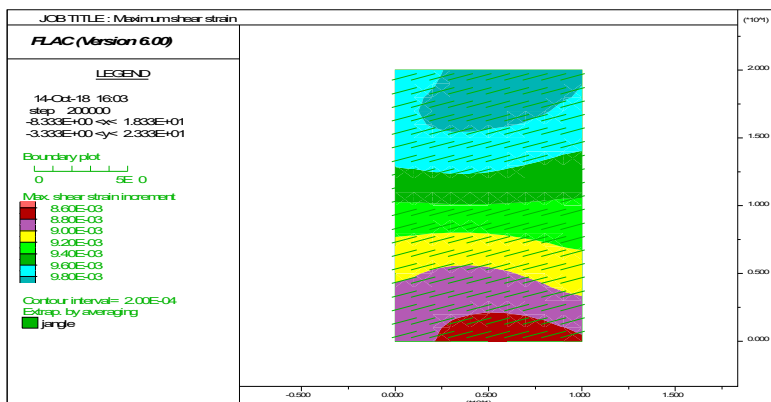
Σχήμα 41 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η συμπεριφορά του μοντέλου με γωνία κλίσης 20° είναι ελαστοπλαστική, όπως και του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 42 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

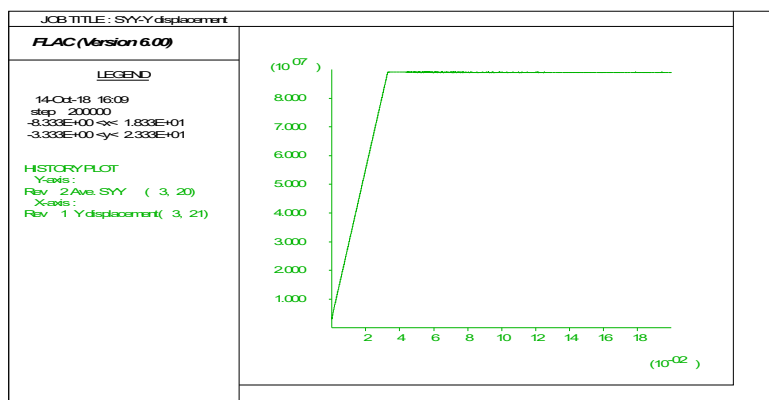
Έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Αντίθετα οι ασυνέχειες δεν έχουν ολισθήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η γωνία κλίσης τους είναι 20°



Σχήμα 43 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

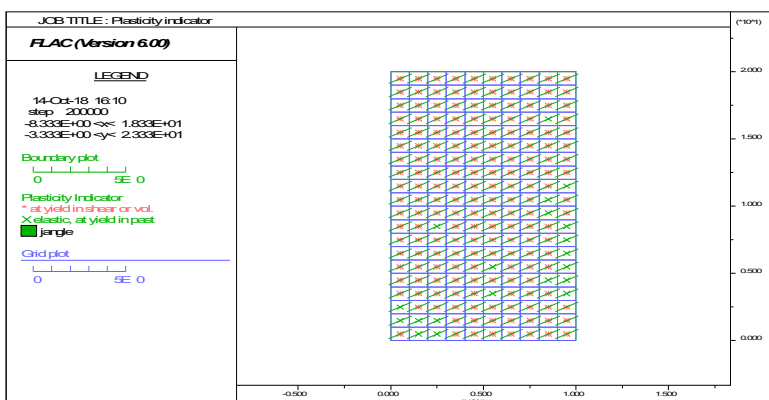
Παρατηρείται ότι σε όλες τις ζώνες του μοντέλου η αύξηση αυτή είναι παρόμοια, που πρακτικά σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής και το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά.

4.2.4 Γωνία κλίσης 30°



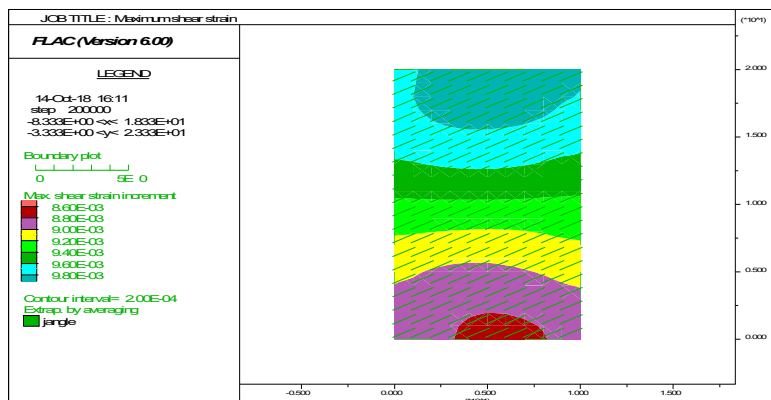
Σχήμα 44 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η συμπεριφορά του μοντέλου με γωνία κλίσης 30° είναι ελαστοπλαστική, όπως και του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 45 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

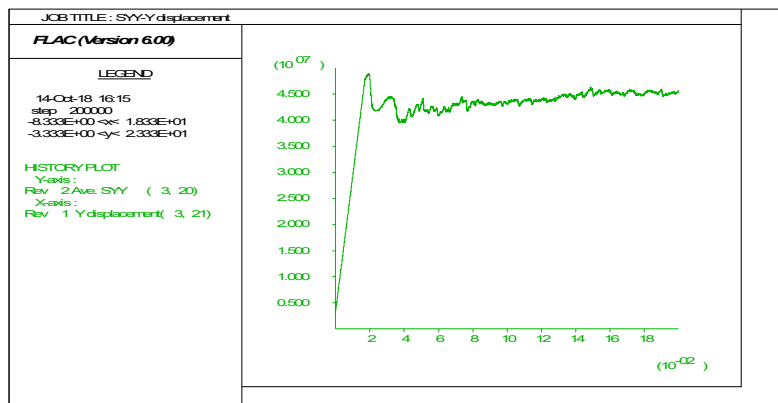
Έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Αντίθετα οι ασυνέχειες δεν έχουν ολισθήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η γωνία κλίσης τους είναι 20°.



Σχήμα 46 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

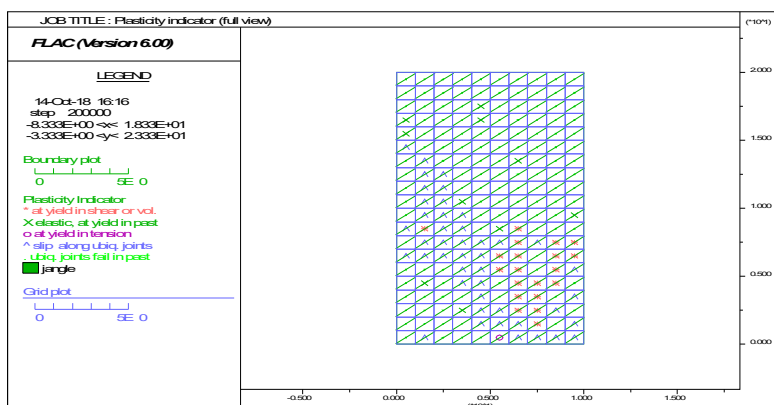
Παρατηρείται ότι σε όλες τις ζώνες του μοντέλου η αύξηση αυτή είναι παρόμοια, που πρακτικά σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής και το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά.

4.2.5 Γωνία κλίσης 40°



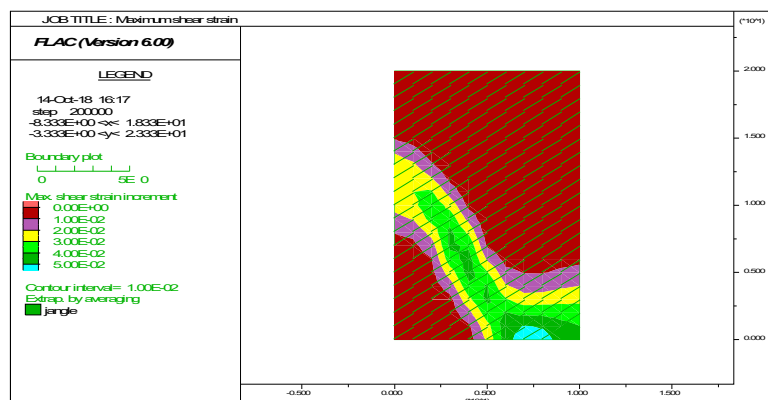
Σχήμα 47 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Επιτυγχάνεται η κορυφαία αντοχή και στη συνέχεια παρατηρείται διακύμανση της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου με συνεχείς αυξομειώσεις οι οποίες τείνουν προς σταθεροποίηση για μεγάλη κατακόρυφη βράχυνση. Πρακτικά το μοντέλο δεν συμπεριφέρεται πλήρως ελαστοπλαστικά, αλλά το διάγραμμα εξαρτάται από τις επί μέρους αστοχίες σε άρρηκτο πέτρωμα και ασυνέχειες.



Σχήμα 48 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

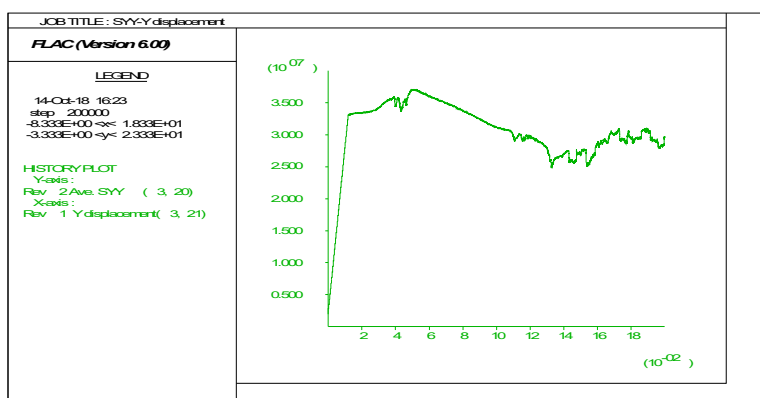
Παρατηρείται συνδυασμένη αστοχία άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών. Όλες οι ζώνες έχουν διαρρεύσει στη διεύθυνση των ασυνεχειών είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο ^) είτε σε προηγούμενο υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο .). Επίσης, σε ορισμένες ζώνες του μοντέλου έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα (σύμβολο * για τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο και σύμβολο x για προηγούμενους υπολογιστικούς κύκλους). Από την εικόνα της διαρροής συνάγεται το συμπέρασμα ότι το υπόψη μοντέλο αστοχεί με συνδυασμό διαρροής άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών).



Σχήμα 49 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

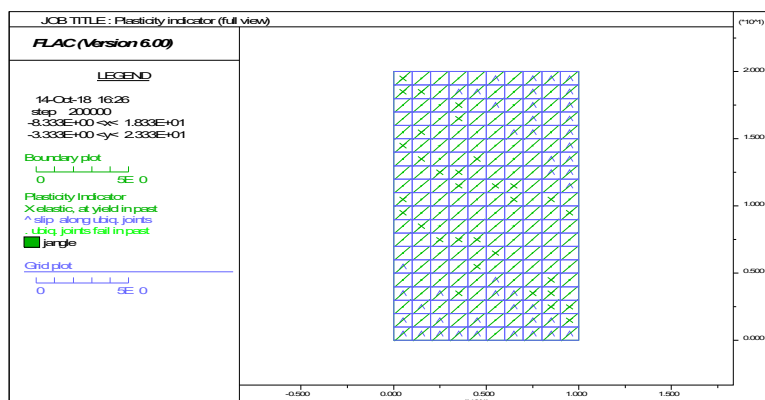
Το μέτωπο της διαρροής, σύμφωνα με την τρέχουσα αύξηση της μέγιστης διατμητικής τροπής, σχηματίζεται κάθετα προς τις ασυνέχειες, που επιβεβαιώνει τη συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στην αστοχία.

4.2.6 Γωνία κλίσης 50°



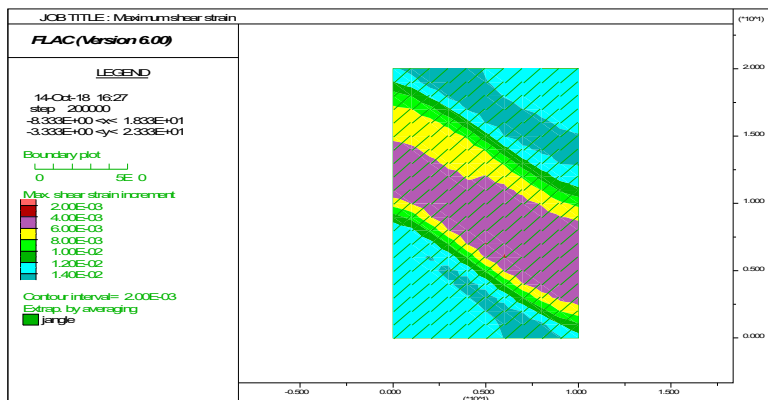
Σχήμα 50 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται αρχικά διαρροή, η οποία πιθανόν οφείλεται σε τοπική ολίσθηση των ασυνεχειών, όμως στη συνέχεια παρατηρείται αύξηση της φέρουσας ικανότητας μέχρι την κορυφαία αντοχή και στη συνέχεια μείωση με διαρκείς αυξομειώσεις καθώς αυξάνεται η κατακόρυφη βράχυνση.



Σχήμα 51 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

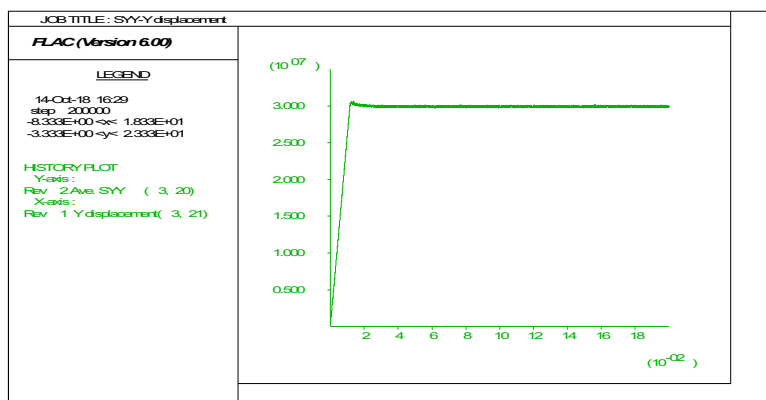
Παρατηρείται συνδυασμένη αστοχία άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών. Όλες οι ζώνες έχουν διαρρεύσει στη διεύθυνση των ασυνεχειών είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο ^) είτε σε προηγούμενο υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο .). Επίσης, σε ορισμένες ζώνες του μοντέλου έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε προηγούμενους υπολογιστικούς κύκλους (σύμβολο x). Από την εικόνα της διαρροής συνάγεται το συμπέρασμα ότι το υπόψη μοντέλο αστοχεί με συνδυασμό διαρροής άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών, όμως η συνεισφορά του άρρηκτου πετρώματος είναι μειωμένη σε σχέση με τα μοντέλα με γωνία κλίσης 40°.



Σχήμα 52 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

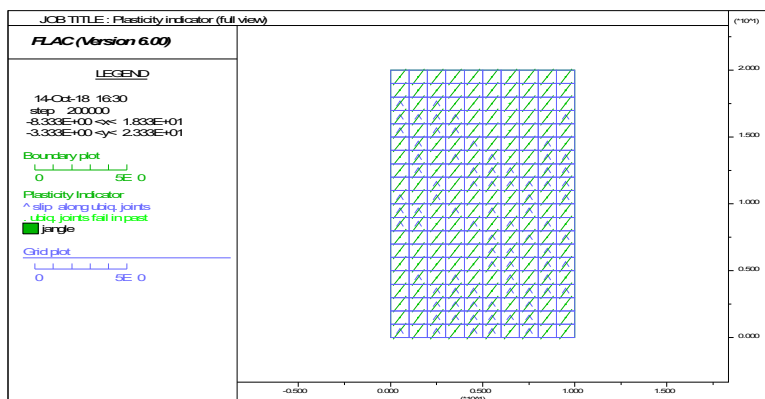
Το μέτωπο της διαρροής, σύμφωνα με την τρέχουσα αύξηση της μέγιστης διατμητικής τροπής, σχηματίζεται σχεδόν κάθετα προς τις ασυνέχειες, που επιβεβαιώνει τη συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στην αστοχία.

4.2.7 Γωνία κλίσης 60°



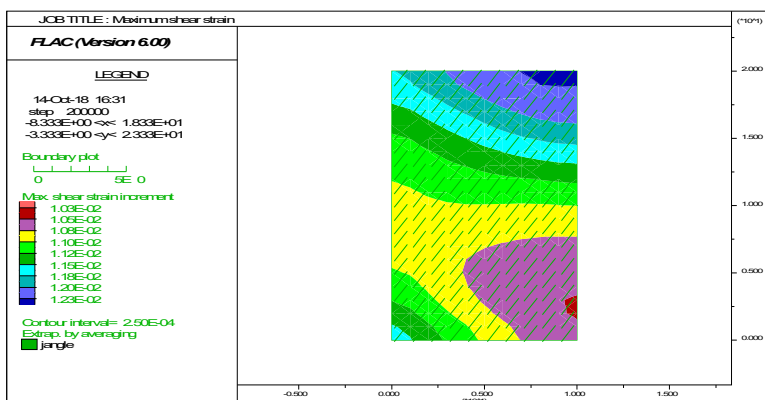
Σχήμα 53 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία σχεδόν ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην ολίσθηση των ασυνεχειών, όπως φαίνεται και από τις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 54 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

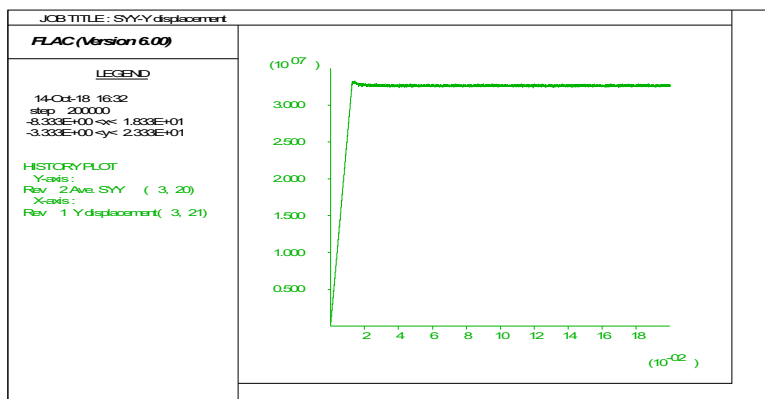
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή.



Σχήμα 55 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

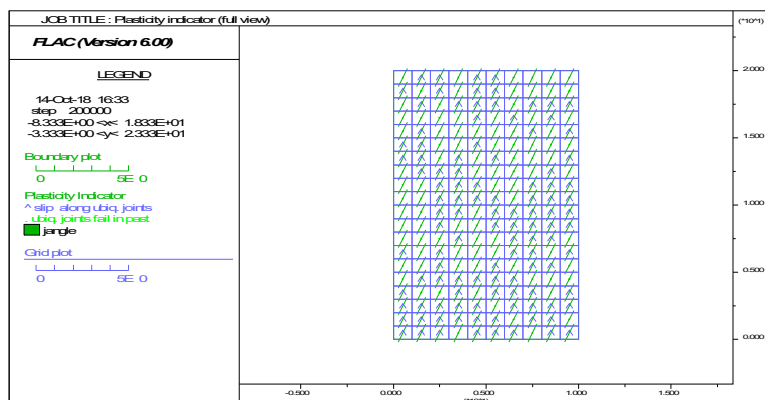
Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές αύξησης της διατμητικής τροπής, που σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται μέτωπο διαρροής.

4.2.8 Γωνία κλίσης 70°



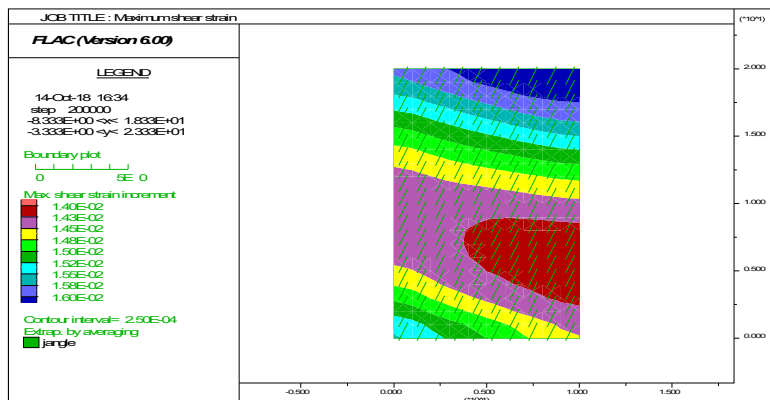
Σχήμα 56 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία σχεδόν ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην ολίσθηση των ασυνεχειών, όπως φαίνεται και από τις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 57 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

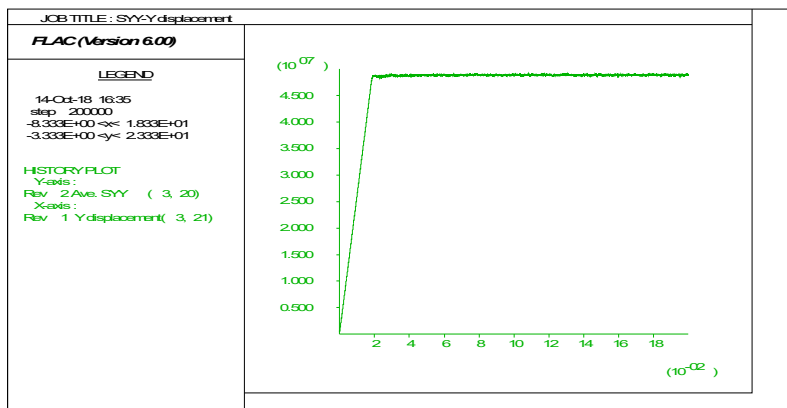
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή.



Σχήμα 58 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

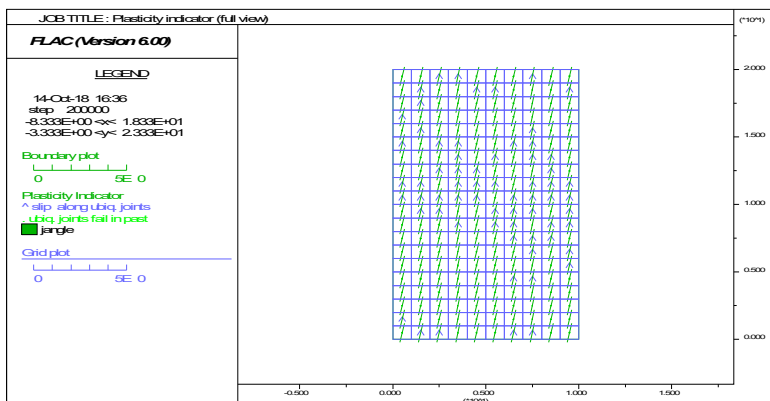
Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές αύξησης της διατμητικής τροπής, που σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται μέτωπο διαρροής.

4.2.9 Γωνία κλίσης 80°



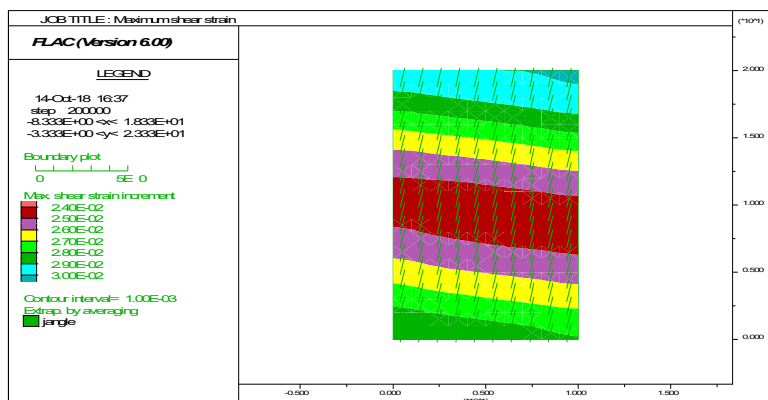
Σχήμα 59 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία σχεδόν ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην ολίσθηση των ασυνεχειών, όπως φαίνεται και από τις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 60 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή.

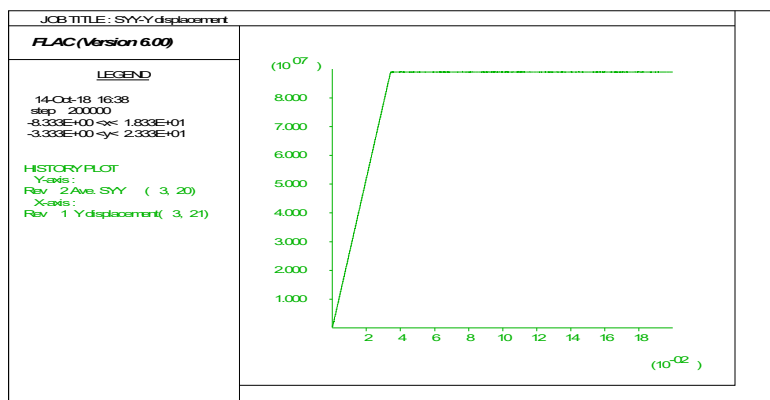


Σχήμα 61 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

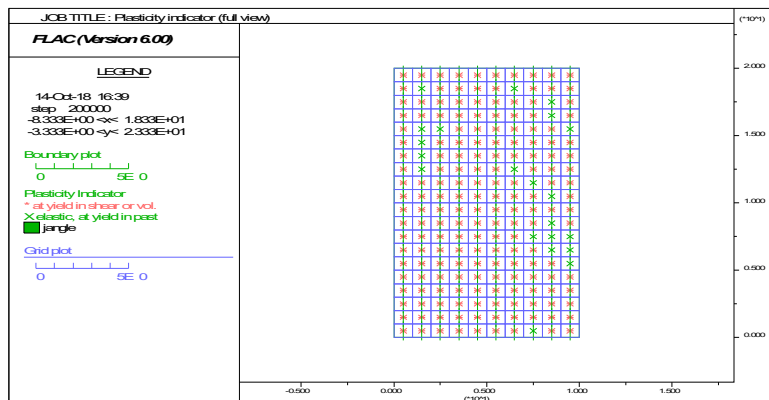
Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές αύξησης της διατμητικής τροπής, που σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται μέτωπο διαρροής.

4.2.10 Γωνία κλίσης 90°

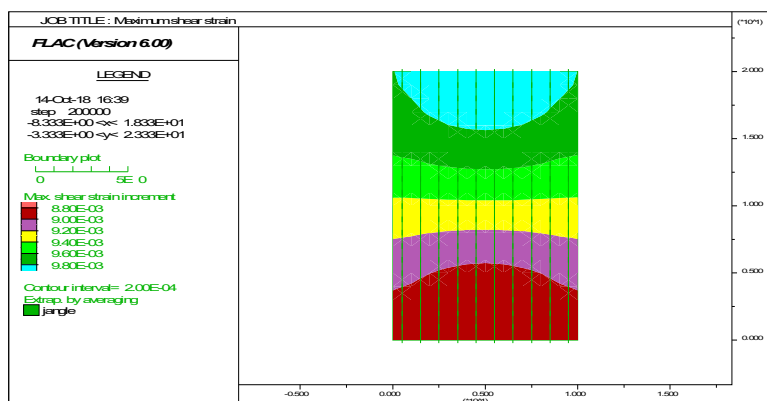
Στο **Σχήμα 62** δείχνεται το διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα). Από αυτό διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά του μοντέλου με γωνία κλίσης 90° είναι ελαστοπλαστική, όπως και του άρρηκτου πετρώματος. Από το σχήμα παρατηρείται ότι έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Αντίθετα οι ασυνέχειες δεν έχουν ολισθήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η γωνία κλίσης τους είναι 90°. Στο **Σχήμα 64** δείχνεται η αύξηση της μέγιστης διατμητικής τροπής (maximum shear strain) στον τρέχον υπολογιστικό κύκλο. Παρατηρείται ότι σε όλες τις ζώνες του μοντέλου η αύξηση αυτή είναι παρόμοια, που πρακτικά σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής και το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά.



Σχήμα 62 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).



Σχήμα 63 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 64 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.3 Ubj χωρίς πλευρική πίεση

Σε αυτή τη σειρά αριθμητικών μοντέλων, σε όλες τις ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint με τις παρακάτω ιδιότητες:

πυκνότητα=2500 kg/m³

ελαστικές ιδιότητες:

Μέτρο συστολής (bulk modulus)=2.77778x10¹⁰ Pa

Μέτρο διάτμησης (shear modulus)=2.08333 x10¹⁰ Pa

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος:

Συνοχή (cohesion)=10 x10⁶ Pa

Γωνία τριβής (friction)=40.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)=4.2 x10⁶ Pa

Ιδιότητες ασυνεχειών:

Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°

Συνοχή (jcohesion)=0.0

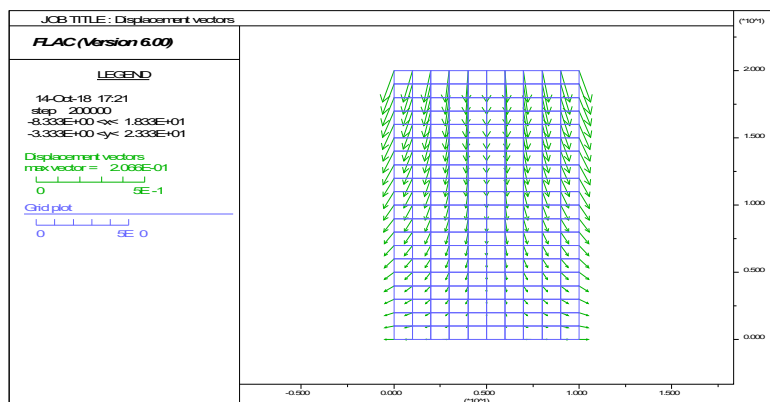
Γωνία τριβής (jfriction)=30.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

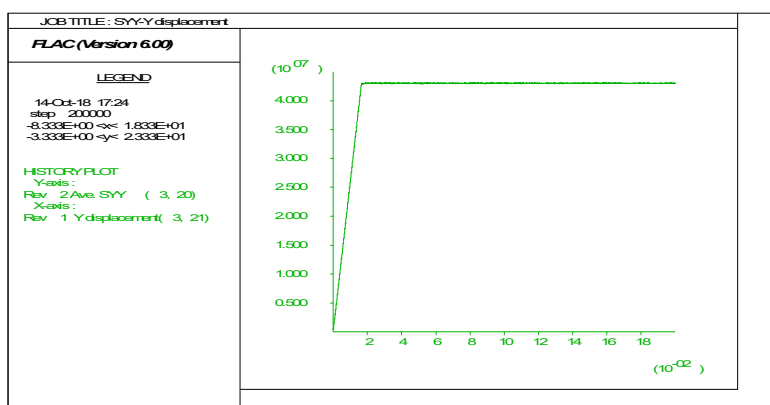
Σκοπός αυτών των μοντέλων είναι η σύγκριση της υπολογιζόμενης αντοχής της ανισότροπης βραχομάζας με την αναλυτική λύση.

4.3.1 Γωνία κλίσης 0°



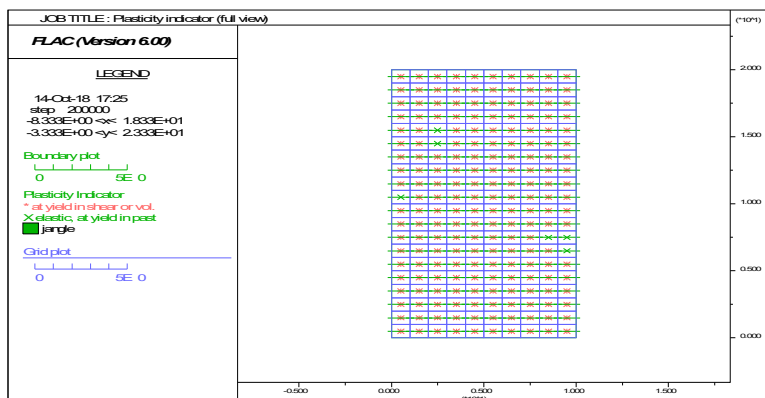
Σχήμα 65 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι κόμβοι του μοντέλου μετατοπίζονται εκατέρωθεν του άξονα κατακόρυφου συμμετρίας και δεν δημιουργείται κάποιο μοτίβο μετατοπίσεων λόγω της διαρροής.



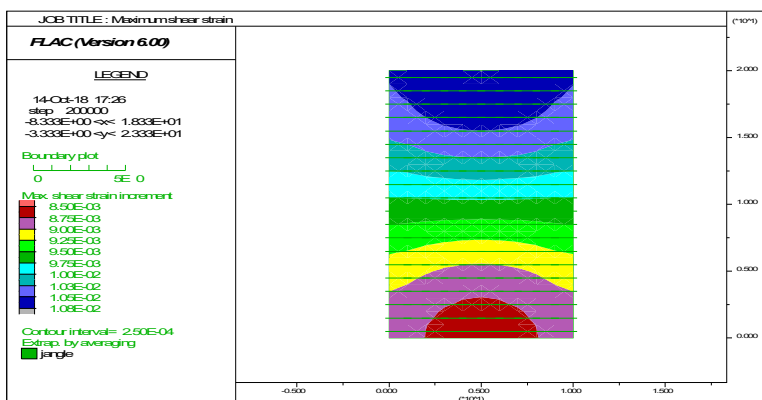
Σχήμα 66 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 67 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

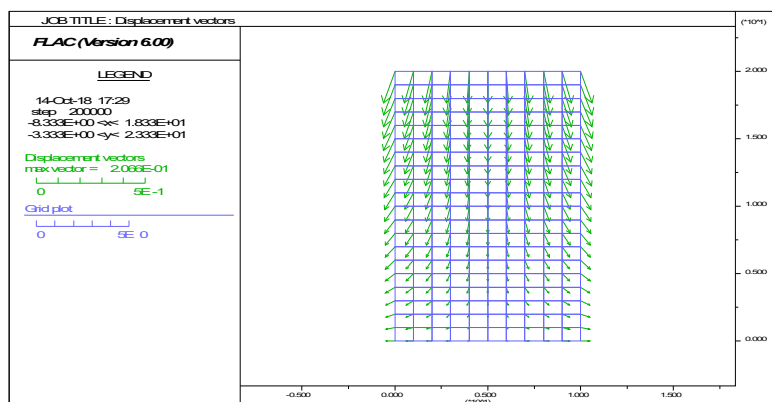
Σε όλες τις ζώνες του μοντέλου διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα.



Σχήμα 68 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

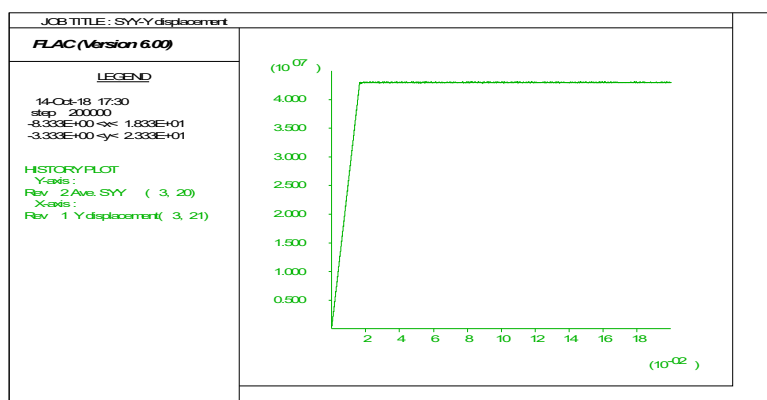
Οι τιμές της αύξησης της μέγιστης διατμητικής τροπής δεν δείχνουν να δημιουργείται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής.

4.3.2 Γωνία κλίσης 10°



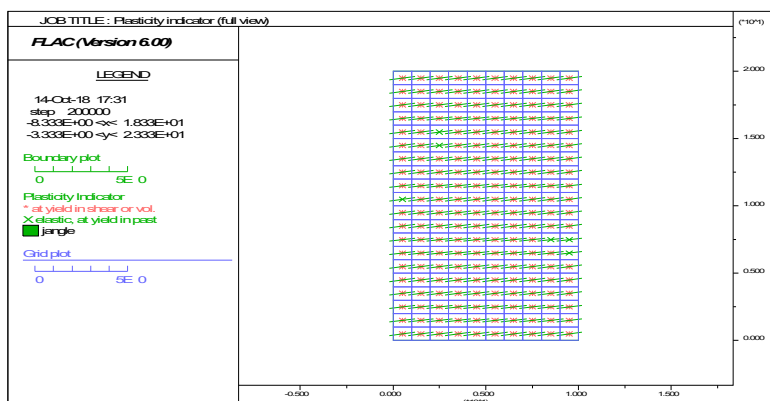
Σχήμα 69 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι κόμβοι του μοντέλου μετατοπίζονται εκατέρωθεν του άξονα κατακόρυφου συμμετρίας και δεν δημιουργείται κάποιο μοτίβο μετατοπίσεων λόγω της διαρροής.



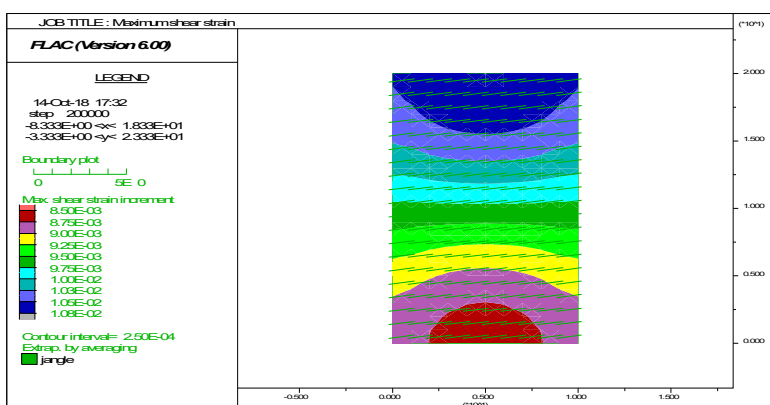
Σχήμα 70 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 71 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

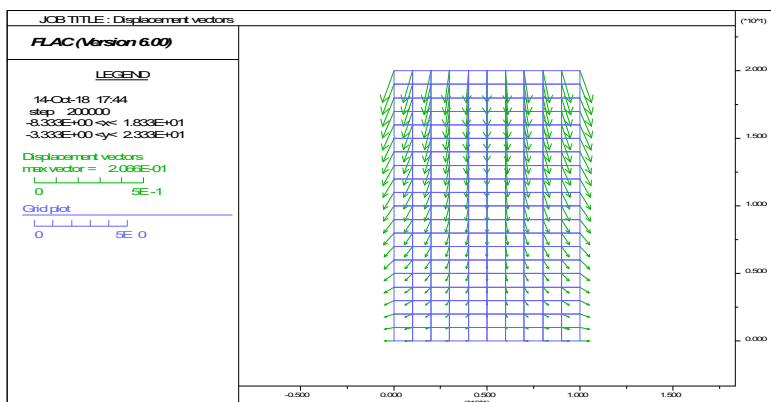
Σε όλες τις ζώνες του μοντέλου διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα.



Σχήμα 72 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

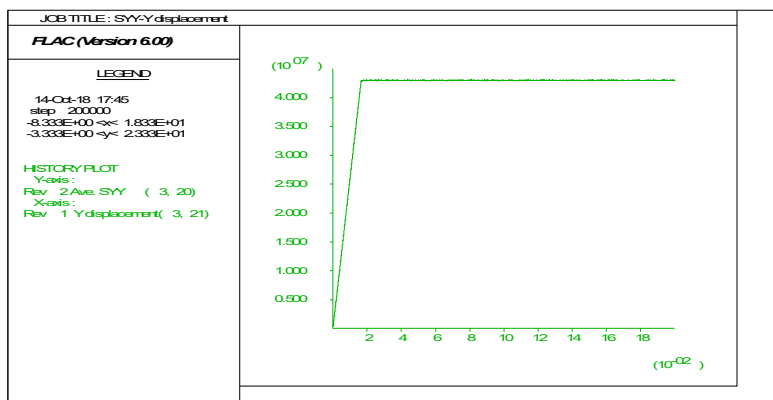
Οι τιμές της αύξησης της μέγιστης διατμητικής τροπής δεν δείχνουν να δημιουργείται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής.

4.3.3 Γωνία κλίσης 20°



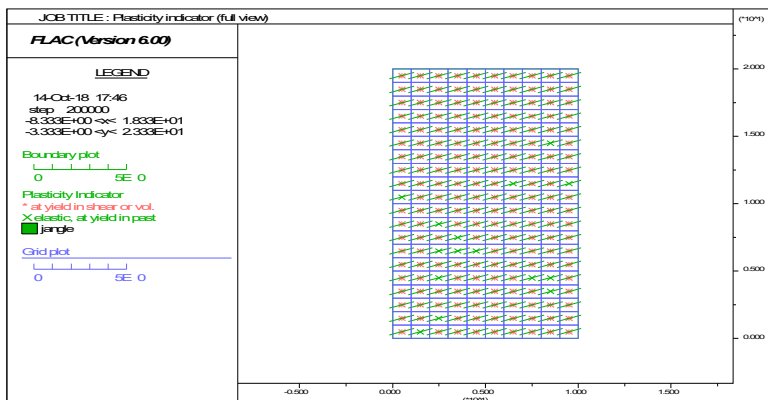
Σχήμα 73 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι κόμβοι του μοντέλου μετατοπίζονται εκατέρωθεν του άξονα κατακόρυφου συμμετρίας και δεν δημιουργείται κάποιο μοτίβο μετατοπίσεων λόγω της διαρροής.



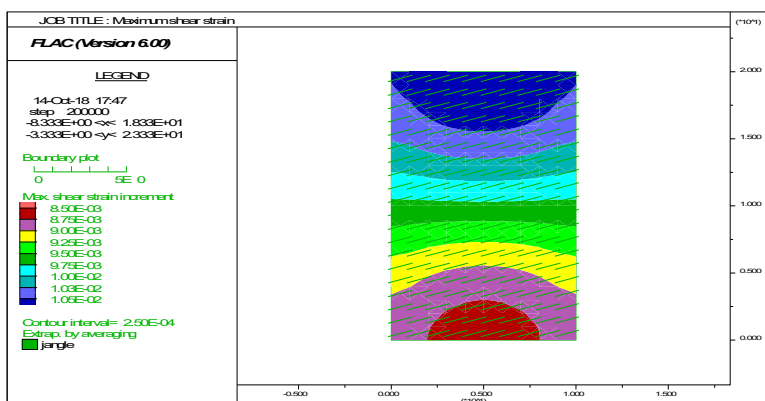
Σχήμα 74 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία οφείλεται στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 75 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

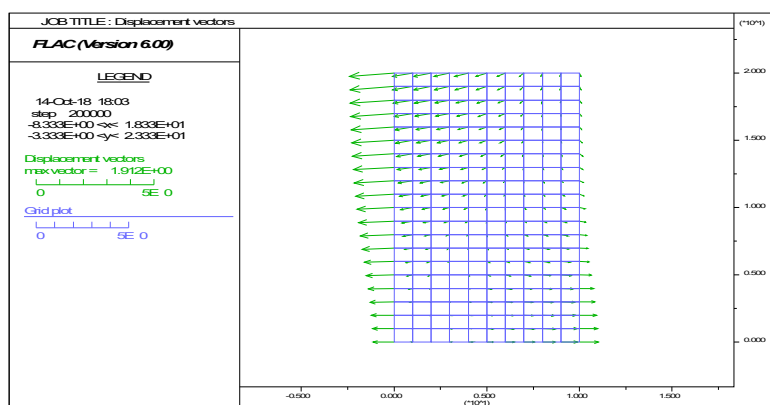
Σε όλες τις ζώνες του μοντέλου διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα.



Σχήμα 76 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

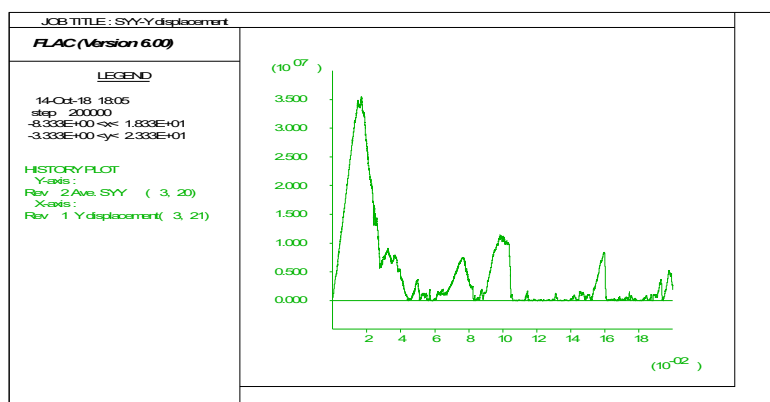
Οι τιμές της αύξησης της μέγιστης διατμητικής τροπής δεν δείχνουν να δημιουργείται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής.

4.3.4 Γωνία κλίσης 30°



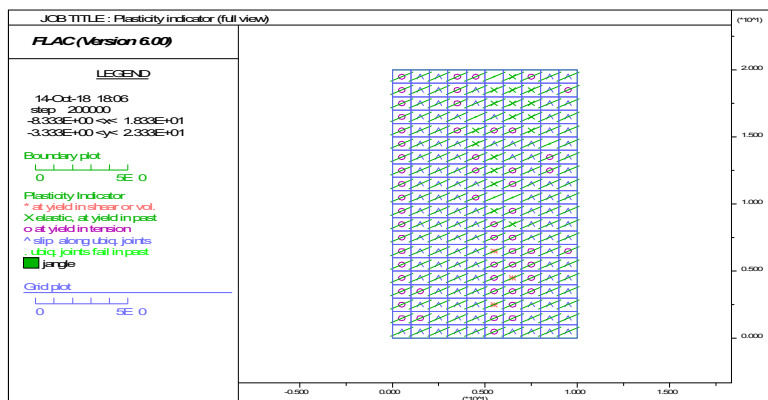
Σχήμα 77 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι μετατοπίσεις στους κόμβους του μοντέλου δείχνουν να ακολουθούν ένα μοτίβο που οφείλεται στην παρουσία ασυνεχειών με κλίση ίση με τη γωνία τριβής.



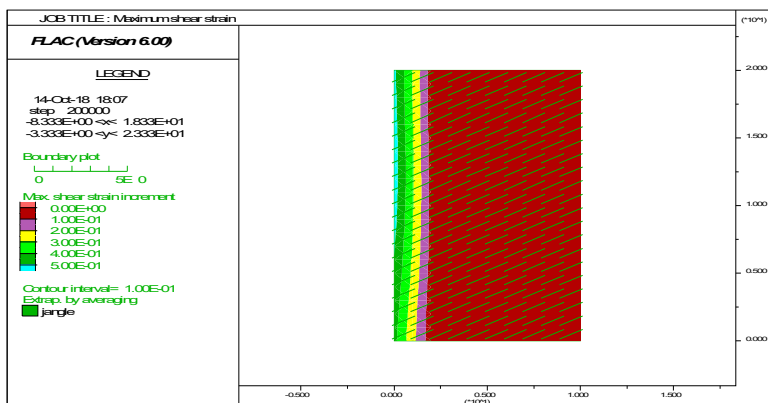
Σχήμα 78 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Το διάγραμμα παρουσιάζει αύξηση της φέρουσας ικανότητας μέχρι μία κορυφαία αντοχής της τάξης των 35 MPa, η οποία παρόλο που είναι μικρότερη από την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος δείχνει τη συνεισφορά του στην αντοχή της βραχομάζας. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα μειώνεται, γεγονός που οφείλεται στην ολίσθηση των ασυνεχειών του μοντέλου, η οποία και σε μεγάλη βράχυνση επικρατεί στο μοντέλο οδηγώντας την παραμένουσα αντοχή της βραχομάζας σε μηδενικές τιμές.



Σχήμα 79 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

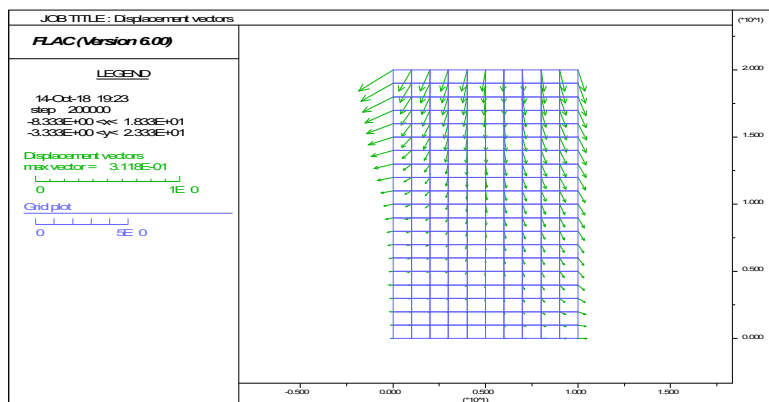
Παρατηρείται αστοχία τόσο του άρρηκτου πετρώματος, όσο και των ασυνεχειών. Το άρρηκτο πέτρωμα αστοχεί εφελκυστικά σε ζώνες παράλληλα προς τον κατακόρυφο άξονα, δίνοντας την εικόνα αστοχίας αξονικού σχισμού. Παράλληλα, ολισθαίνουν και όλες οι ασυνέχειες, κυρίως στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.



Σχήμα 80 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

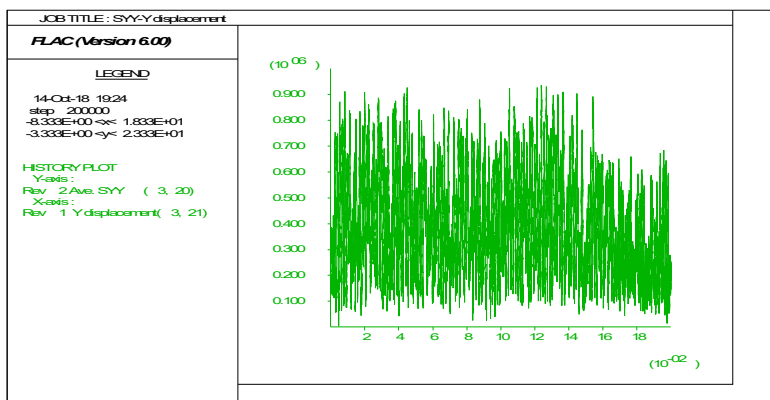
Οι τιμές της διατμητικής τροπής αυξάνονται έντονα κοντά στις πλευρές του δοκιμίου, δίνοντας την εικόνα σχηματισμού μετώπου διαρροής πλησίον αυτών δηλ. σαν να αποκολλείται φλοίδα του αριθμητικού μοντέλου.

4.3.5 Γωνία κλίσης 40°



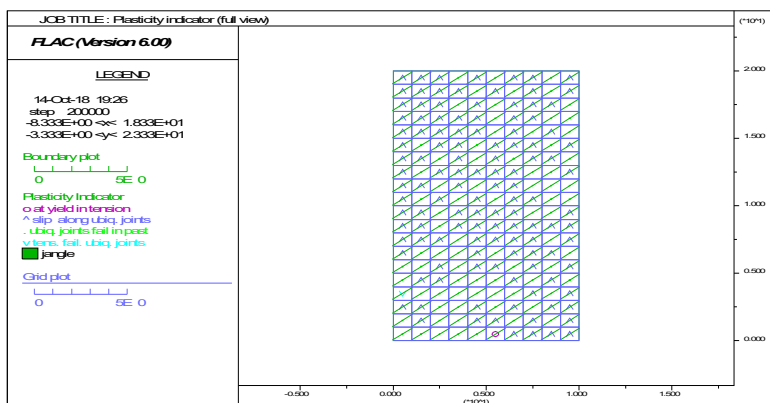
Σχήμα 81 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μοτίβο που επηρεάζεται από την ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



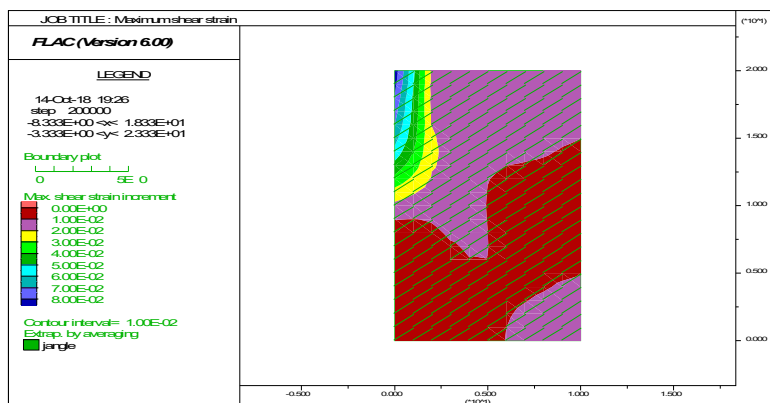
Σχήμα 82 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η κορυφαία αντοχή είναι πάρα πολύ χαμηλή, που συνάδει με ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες



Σχήμα 83 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

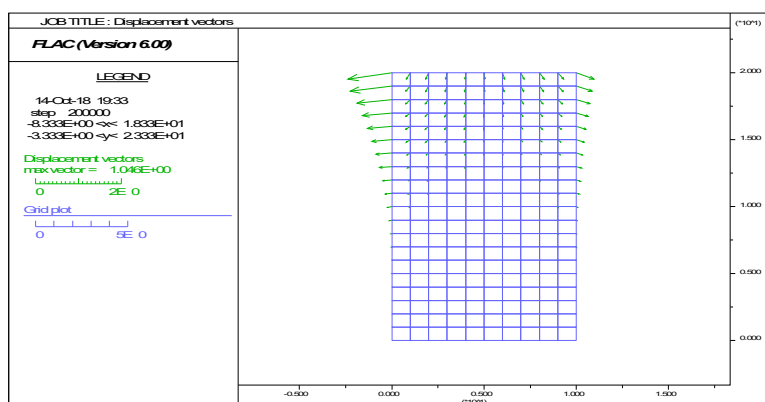
Παρατηρείται ολίσθηση μόνο πάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 84 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

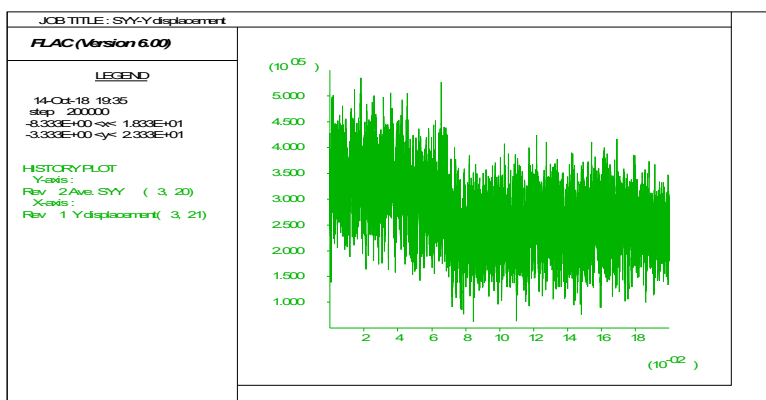
Το μέτωπο της διαρροής συγκεντρώνεται στην πάνω αριστερή γωνία, που συνάδει με την εικόνα των μετατοπίσεων.

4.3.6 Γωνία κλίσης 50°



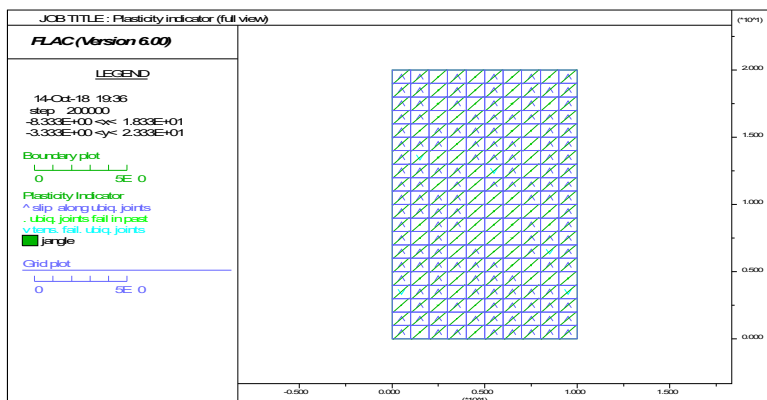
Σχήμα 85 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μοτίβο που επηρεάζεται από την ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



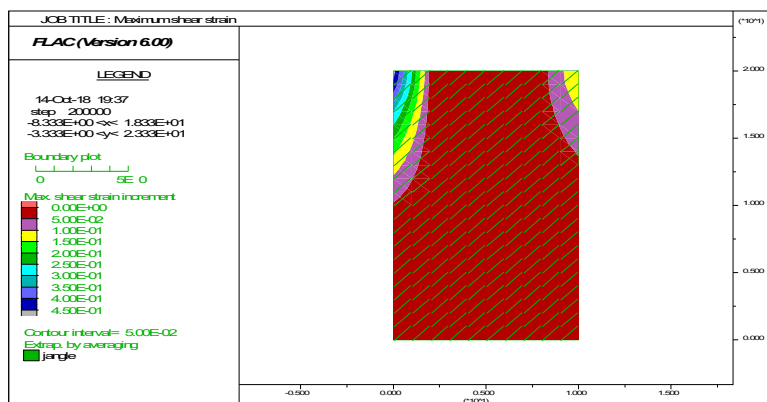
Σχήμα 86 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η κορυφαία αντοχή είναι πάρα πολύ χαμηλή, που συνάδει με ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 87 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

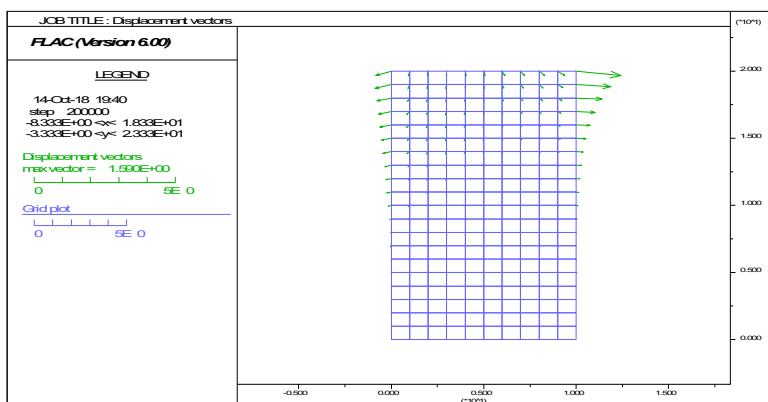
Παρατηρείται ολίσθηση μόνο πάνω στις ασυνέχειες.



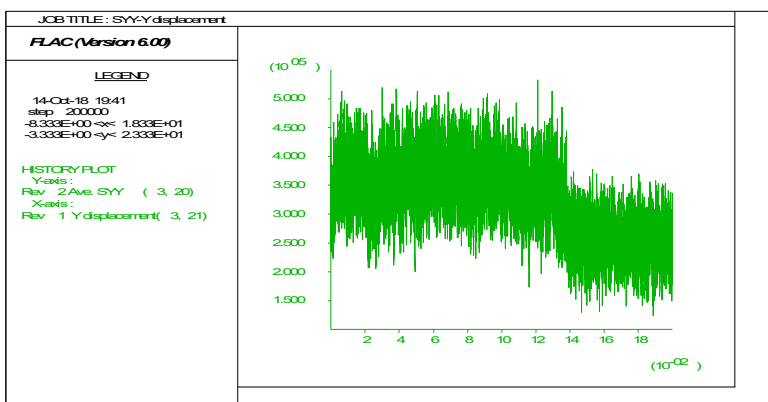
Σχήμα 88 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

Το μέτωπο της διαρροής συγκεντρώνεται στις πάνω γωνίες, που συνάδει με την εικόνα των μετατοπίσεων.

4.3.7 Γωνία κλίσης 60°

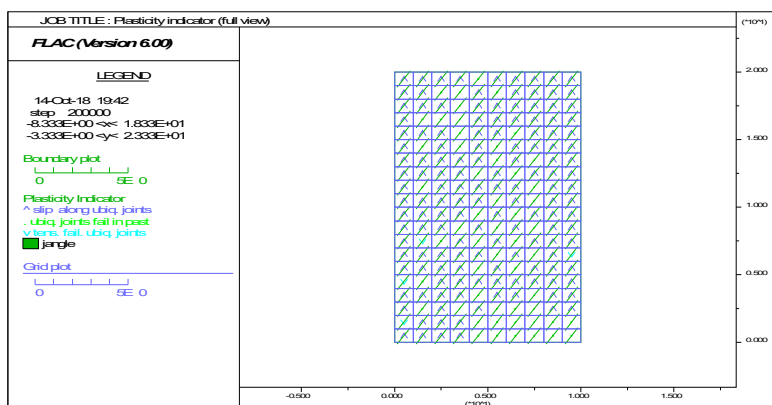


Οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μοτίβο που επηρεάζεται από την ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



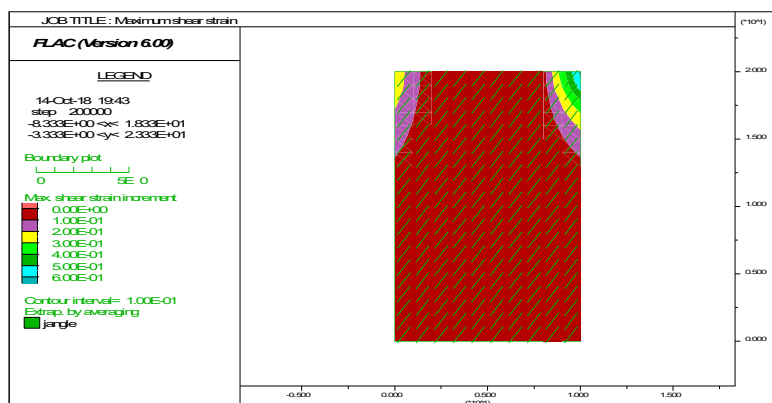
Σχήμα 89 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η κορυφαία αντοχή είναι πάρα πολύ χαμηλή, που συνάδει με ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 90 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

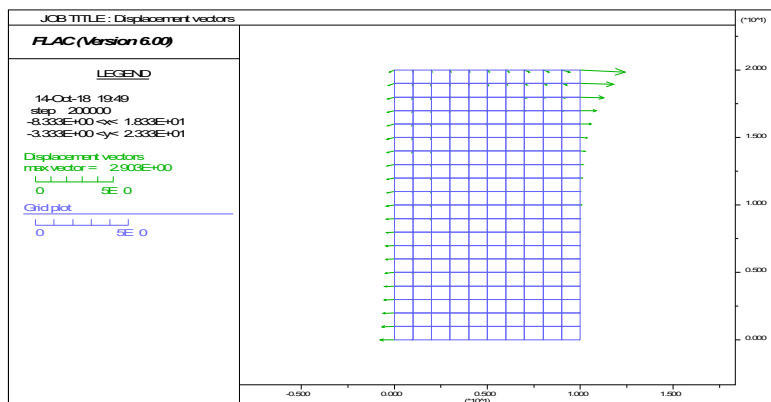
Παρατηρείται ολίσθηση μόνο πάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 91 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

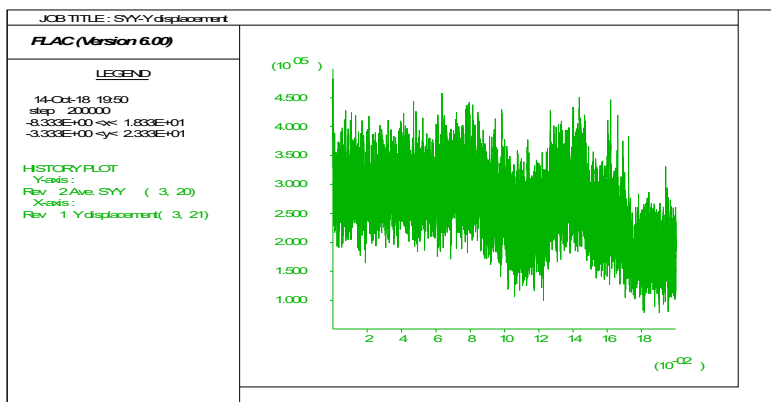
Το μέτωπο της διαρροής συγκεντρώνεται στις πάνω γωνίες, που συνάδει με την εικόνα των μετατοπίσεων.

4.3.8 Γωνία κλίσης 70°



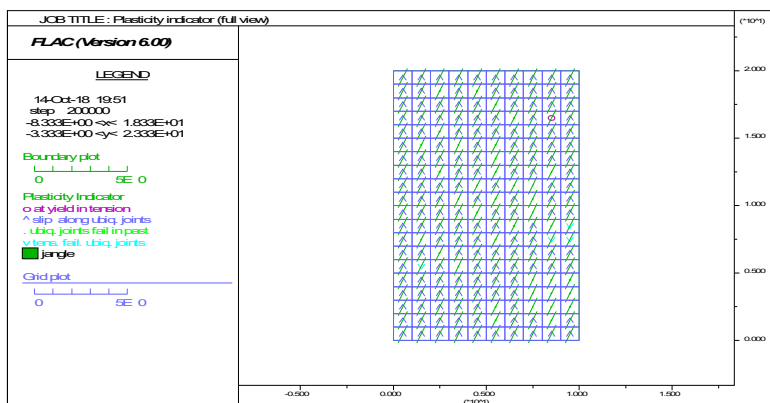
Σχήμα 92 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μοτίβο που επηρεάζεται από την ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



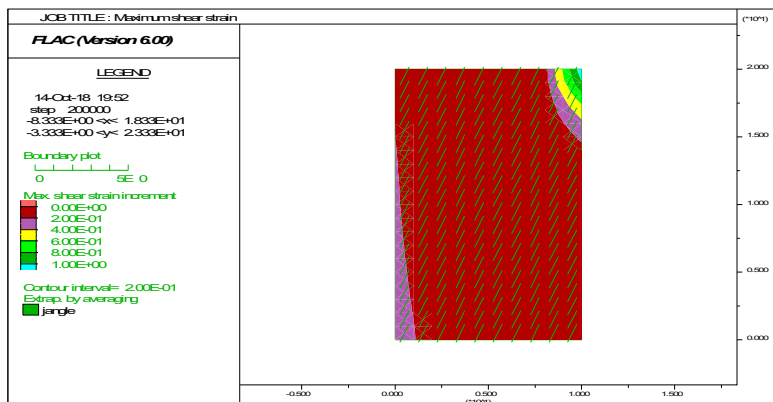
Σχήμα 93 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η κορυφαία αντοχή είναι πάρα πολύ χαμηλή, που συνάδει με ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 94 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

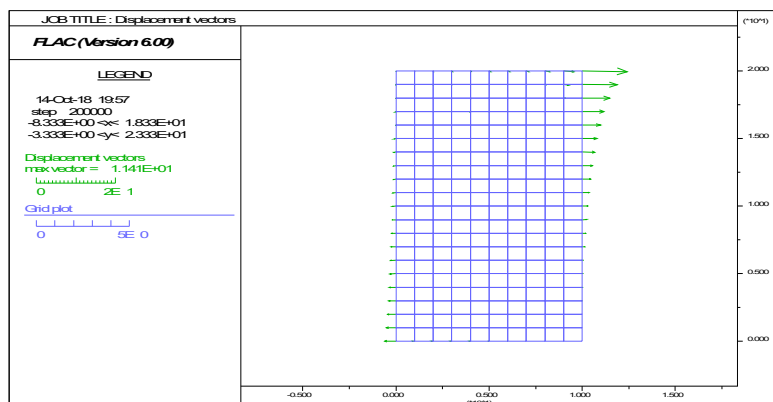
Παρατηρείται ολίσθηση μόνο πάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 95 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

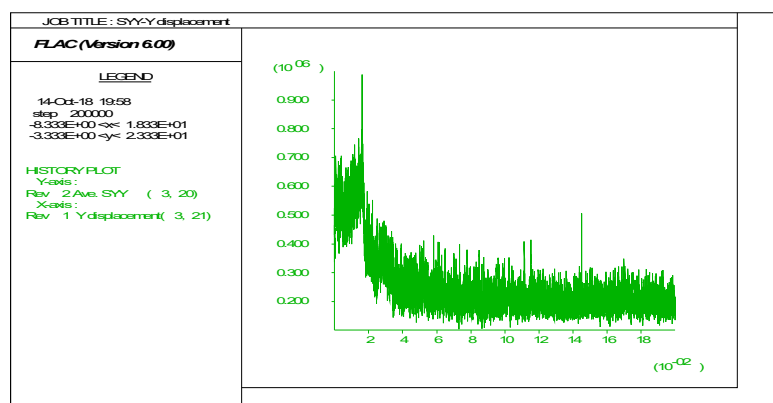
Το μέτωπο της διαρροής συγκεντρώνεται στην πάνω δεξιά γωνία, που συνάδει με την εικόνα των μετατοπίσεων.

4.3.9 Γωνία κλίσης 80°



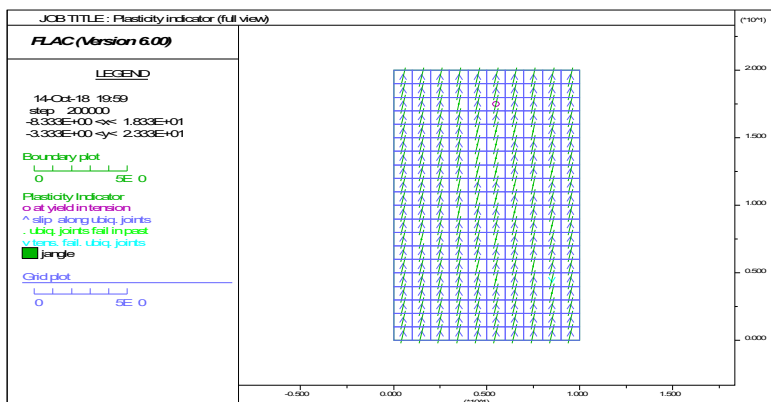
Σχήμα 96 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι μετατοπίσεις παρουσιάζουν μοτίβο που επηρεάζεται από την ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



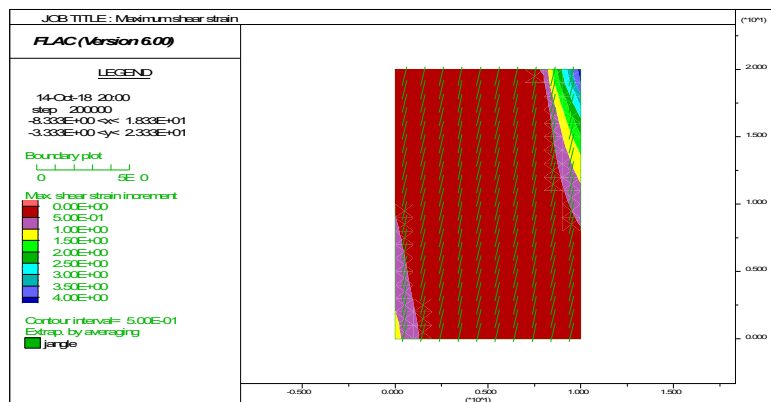
Σχήμα 97 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Η κορυφαία αντοχή είναι πάρα πολύ χαμηλή, που συνάδει με ολίσθηση επάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 98 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

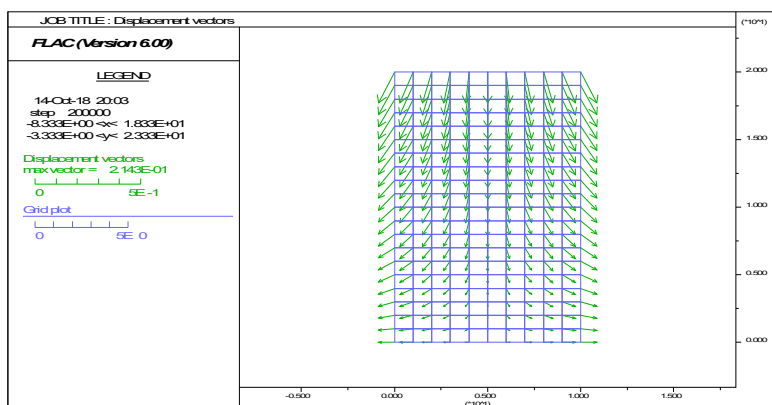
Παρατηρείται ολίσθηση μόνο πάνω στις ασυνέχειες.



Σχήμα 99 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

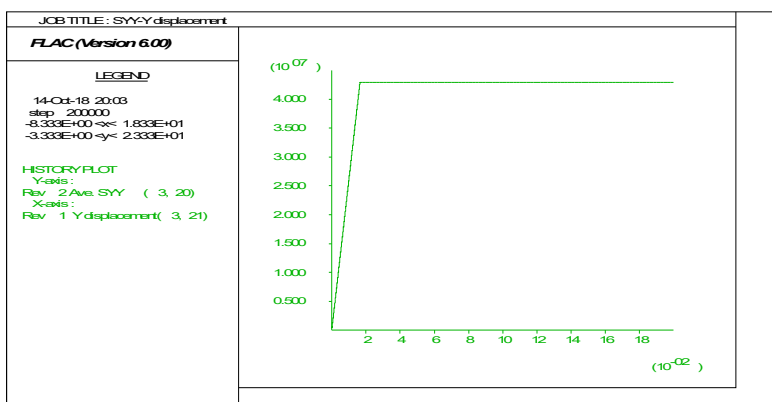
Το μέτωπο της διαρροής συγκεντρώνεται στην πάνω δεξιά γωνία, που συνάδει με την εικόνα των μετατοπίσεων.

4.3.10 Γωνία κλίσης 90°



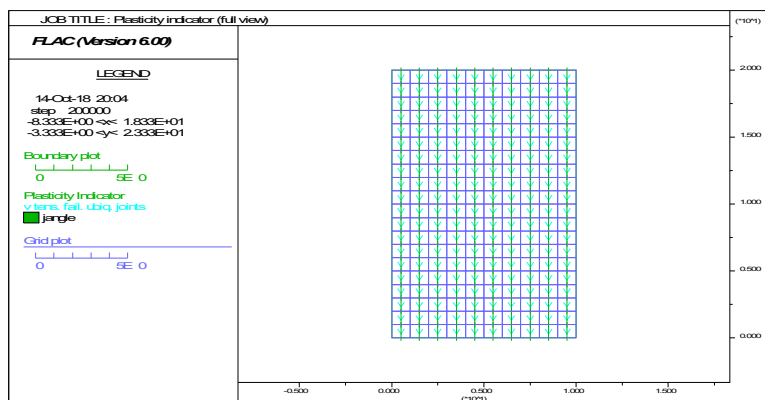
Σχήμα 100 Διάγραμμα μετακινήσεων

Οι κόμβοι του μοντέλου μετατοπίζονται εκατέρωθεν του άξονα κατακόρυφου συμμετρίας και δεν δημιουργείται κάποιο μοτίβο μετατοπίσεων λόγω της διαρροής.



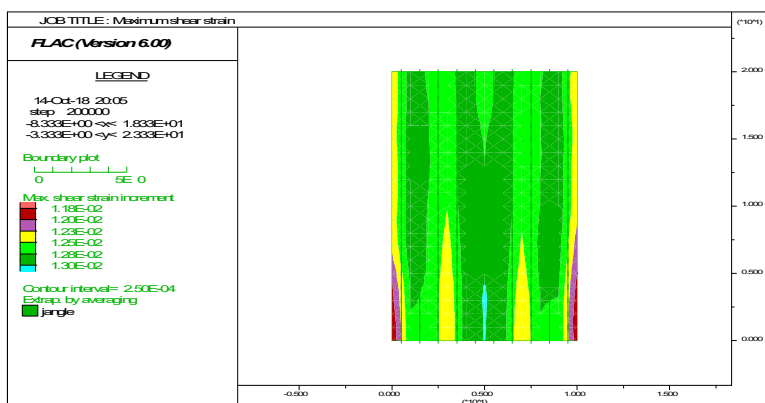
Σχήμα 101 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Παρατηρείται μία ελαστοπλαστική συμπεριφορά, η οποία συνάδει με αστοχία του άρρηκτου πετρώματος, παρόλο που αυτή δεν παρατηρείται στις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 102 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Σε όλες τις ζώνες του μοντέλου παρατηρείται εφελκυστική αστοχία των ασυνεχειών. Η εικόνα της διαρροής διαφέρει από εκείνη του αντίστοιχου μοντέλου της 1^{ης} σειράς με πλευρική πίεση, καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει η πλευρική πίεση που θα αποτρέψει το άνοιγμα των ασυνεχειών.



Σχήμα 103 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

Οι τιμές της αύξησης της μέγιστης διατμητικής τροπής δεν δείχνουν να δημιουργείται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής.

4.4 Σειρά 1joint-distance 0.1

Στις προηγούμενες σειρές αριθμητικών μοντέλων εξετάστηκε η περίπτωση όπου σε όλες τις ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint, που πρακτικά σημαίνει ότι έχω ένα επίπεδο αδυναμίας/ανιστροπίας σε κάθε θέση στη βραχομάζα. Σε πολλές περιπτώσεις η ανιστροπία της βραχομάζας καθορίζεται από λίγες μόνο ασυνέχειες οι οποίες είναι δυσμενώς προσανατολισμένες ως προς τη φόρτιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις έχει μελετηθεί η ανιστροπία της βραχομάζας με μεθόδους διακριτών στοιχείων (**βλ. Κεφ. 2**). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η χρήση αυτών των μεθόδων απαιτεί υψηλό υπολογιστικό κόστος κυρίως λόγω του χρόνου που απαιτείται για την επίλυση. Ως εκ τούτου, εξετάζουμε στην παρούσα τη δυνατότητα προσομοίωσης μεμονωμένων επιπέδων ασυνεχειών με το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint.

Σε αυτή τη σειρά αριθμητικών μοντέλων, προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας. Οι ιδιότητες των ζωνών αυτών είναι:

πυκνότητα=2500 kg/m³

ελαστικές ιδιότητες:

Μέτρο συστολής (bulk modulus)=2.77778x10¹⁰ Pa

Μέτρο διάτμησης (shear modulus)=2.08333 x10¹⁰ Pa

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος:

Συνοχή (cohesion)=10 x10⁶ Pa

Γωνία τριβής (friction)=40.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)=4.2 x10⁶ Pa

Ιδιότητες ασυνεχειών:

Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°

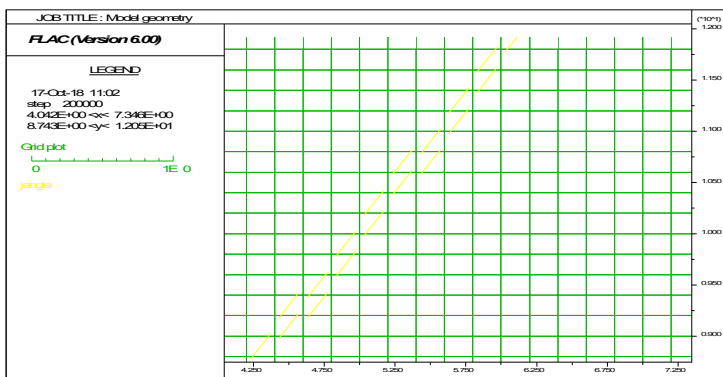
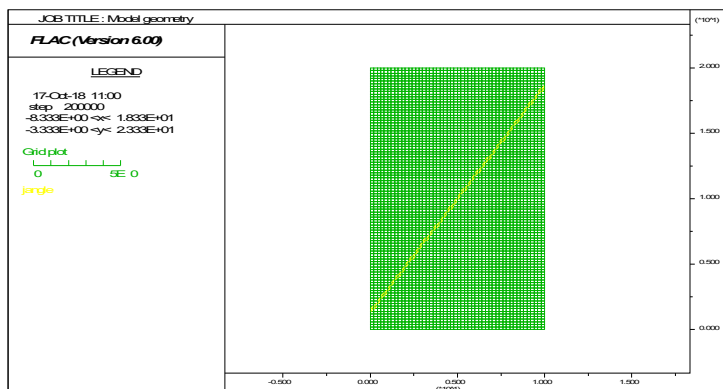
Συνοχή (jcohesion)=0.0

Γωνία τριβής (jfriction)=30.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

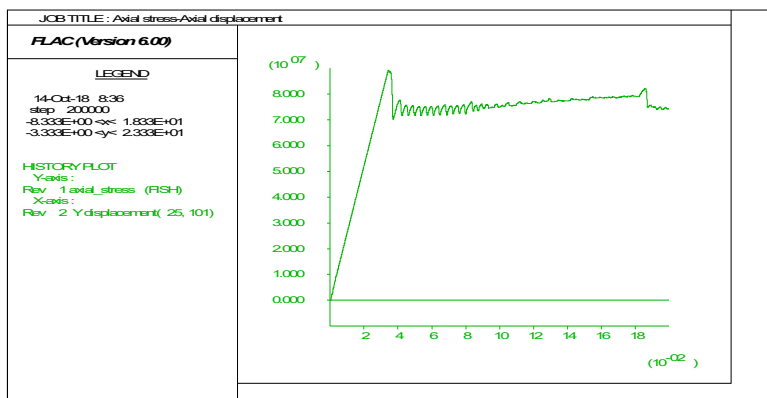
Στο **Σχήμα 104α** φαίνεται η γεωμετρία του μοντέλου για γωνία κλίσης ασυνέχειας 60° ενώ στο **Σχήμα 104β** η διάταξη των ζωνών με καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint (UJ) κοντά στην περιοχή της ασυνέχειας. Παρατηρείται ότι μεταξύ των ζωνών που έχουν μοντέλο UJ παρεμβάλλονται ζώνες άρρηκτου πετρώματος με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb (MC). Αυτό έχει επίδραση στα αποτελέσματα όπως θα φανεί και στη συνέχεια.



Σχήμα 104 (α) Γεωμετρία αριθμητικού μοντέλου σειράς *1* joint-distance 0.1 όπου παρατηρείται η προσομοίωση μίας ασυνέχειας με κλίση 60° , (β) Μεγέθυνση των ζωνών σε μία περιοχή πλησίον της ασυνέχειας.

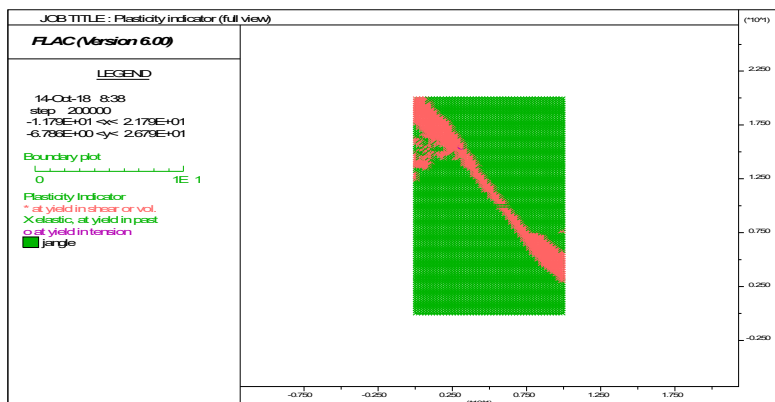
4.4.1 Γωνία κλίσης 0°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνση **Σχήμα 105** προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



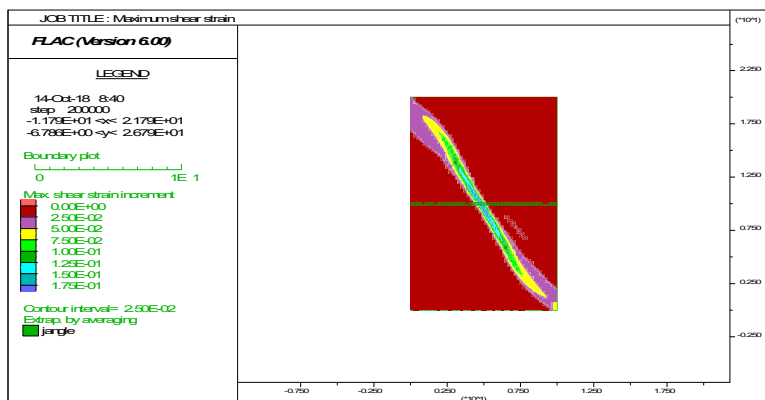
Σχήμα 105 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου **Σχήμα 106** προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή σε όλες τις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν εμπλέκονται στην αστοχία, κάτι που είναι σύμφωνο με τη θεωρία.



Σχήμα 106 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

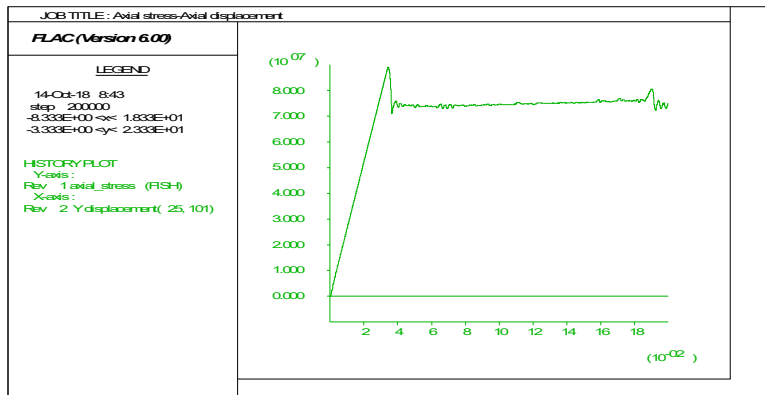
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC $(45+\phi/2)$.



Σχήμα 107 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

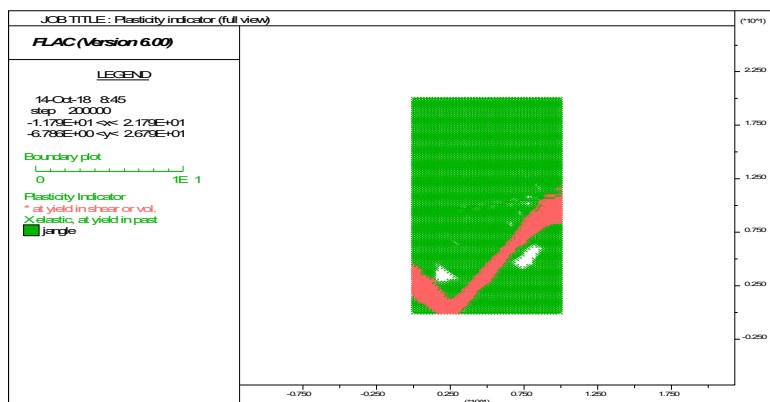
4.4.2 Γωνία κλίσης 10°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



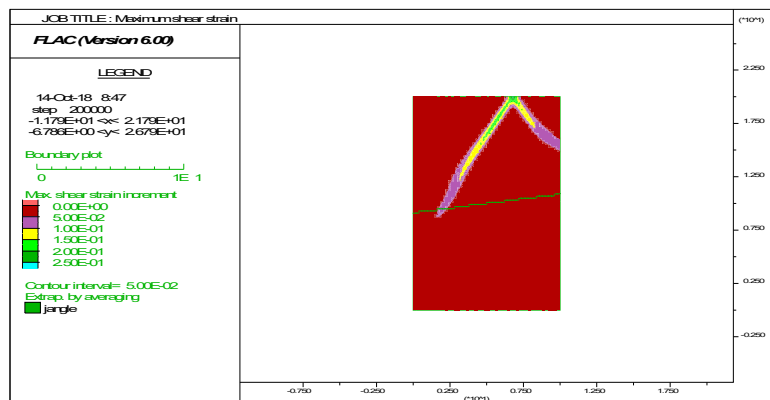
Σχήμα 108 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή σε όλες τις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν εμπλέκονται στην αστοχία, κάτι που είναι σύμφωνο με τη θεωρία.



Σχήμα 109 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC ($45+\phi/2$).

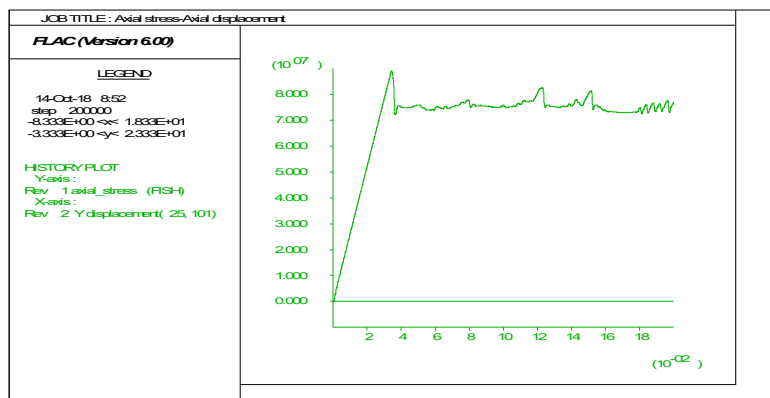


Σχήμα 110 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.3 Γωνία κλίσης 20°

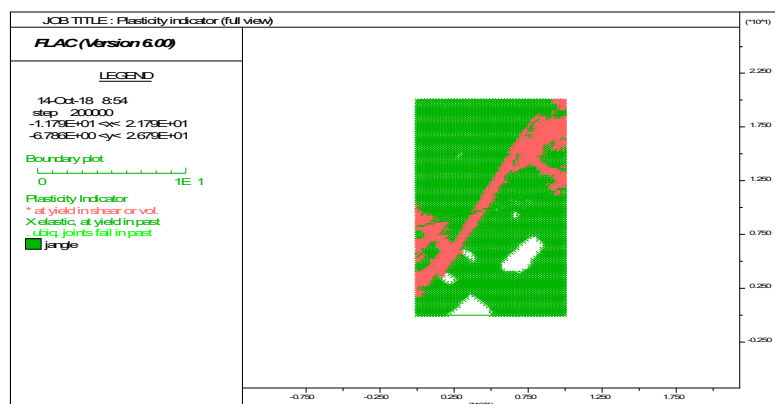
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκίμιου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Όμως παρατηρούνται

τοπικές αυξήσεις της φέρουσας ικανότητας που δεν μπορούνε να αποδοθούνε σε διαρροή ή ολίσθηση, και θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.



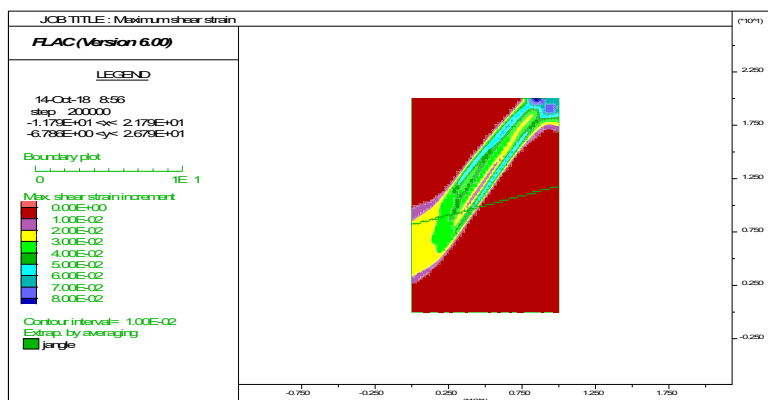
Σχήμα 111 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις περισσότερες ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Όμως, υπάρχουν και ζώνες που δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας με γωνία κλίσης 20° έχει επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια ολισθαίνουν.



Σχήμα 112 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

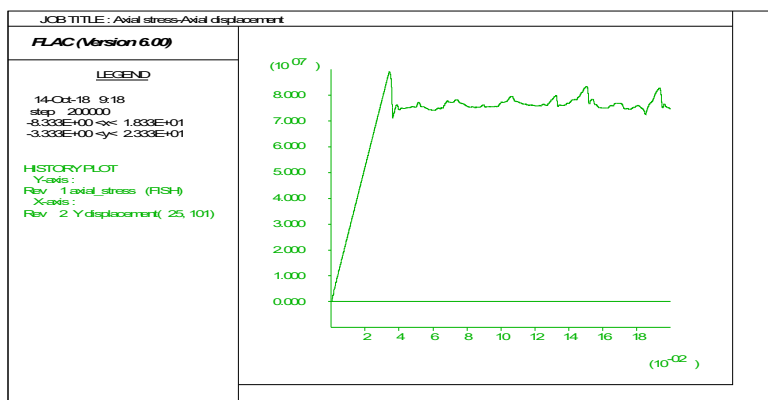
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής υπό μορφή ευρείας διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο.



Σχήμα 113 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.4 Γωνία κλίσης 30°

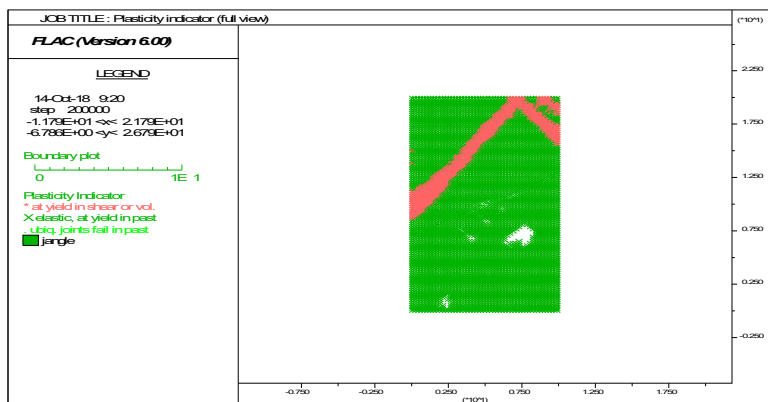
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Οι τοπικές αυξήσεις της φέρουσας ικανότητας δεν μπορούν να αποδοθούν σε διαρροή ή ολίσθηση και θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.



Σχήμα 114 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

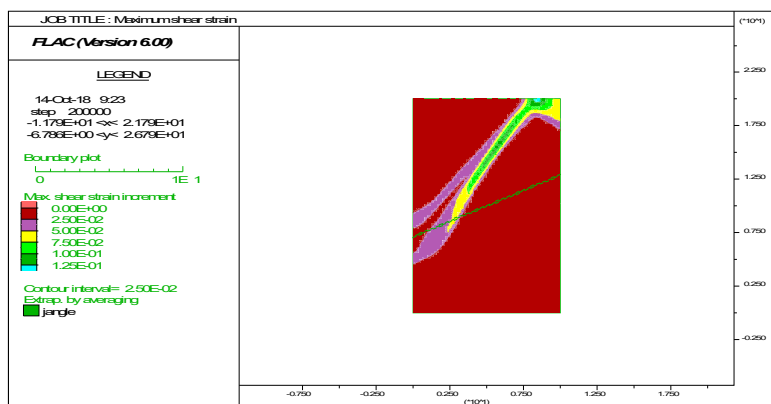
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις περισσότερες ζώνες άρρηκτου

πετρώματος. Όμως, υπάρχουν και ζώνες που δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας με γωνία κλίσης 30° έχει επίσης επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια ολισθαίνουν.



Σχήμα 115 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

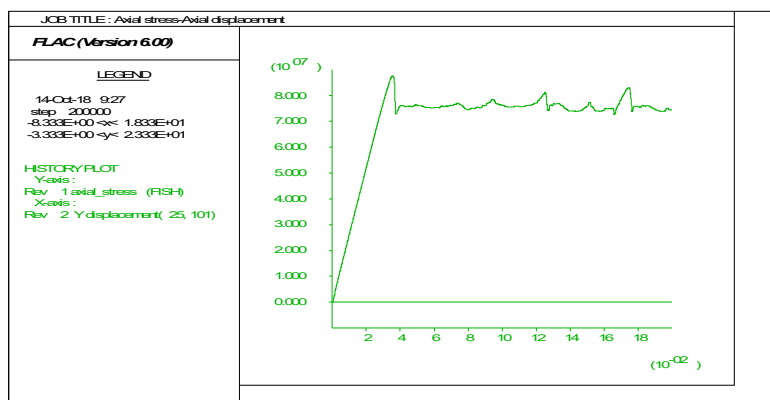
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής υπό μορφή στενής διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο. Ταυτόχρονα, οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια βρίσκονται σε ολίσθηση.



Σχήμα 116 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

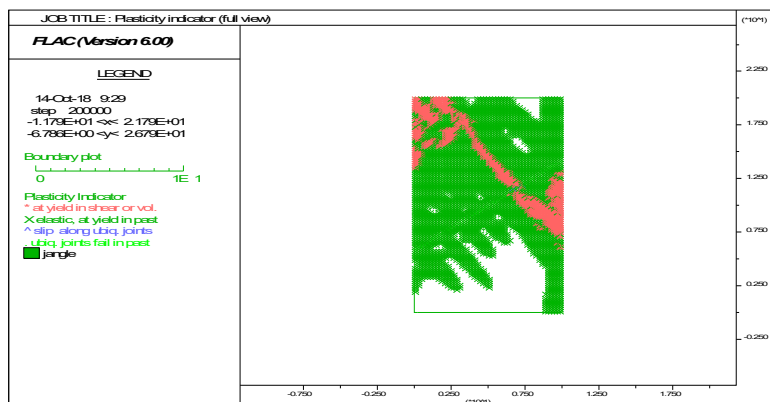
4.4.5 Γωνία κλίσης 40°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Οι τοπικές αυξήσεις της φέρουσας ικανότητας δεν μπορούν να αποδοθούν σε διαρροή ή ολίσθηση και θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.



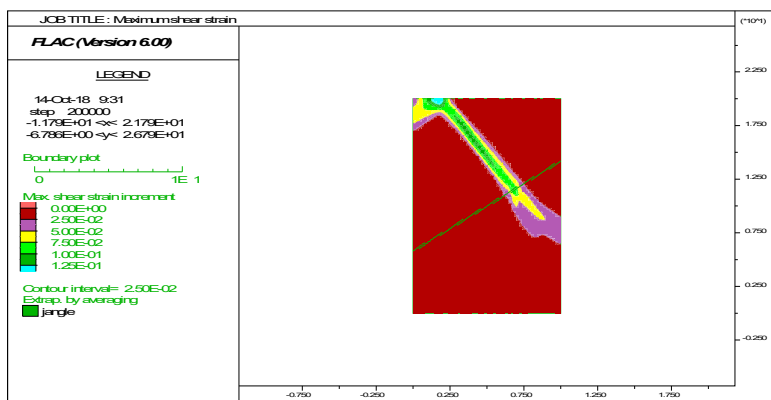
Σχήμα 117 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις περισσότερες ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Όμως, υπάρχουν και σημαντικές περιοχές που οι ζώνες δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας με γωνία κλίσης 40° έχει επίσης επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια ολισθαίνουν.



Σχήμα 118 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

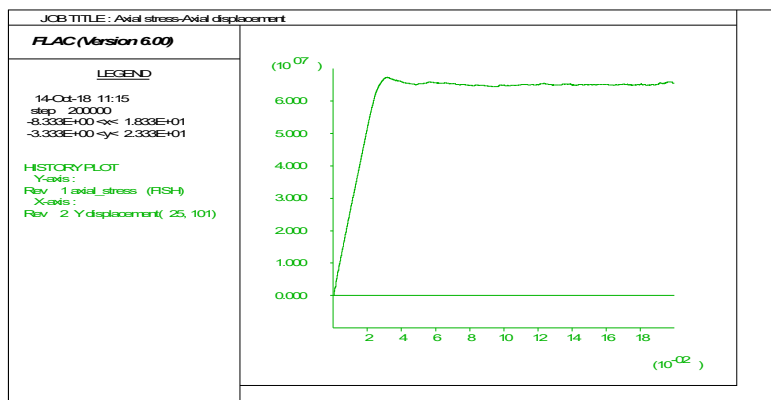
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής υπό μορφή στενής διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο. Ταυτόχρονα, οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια βρίσκονται σε ολίσθηση.



Σχήμα 119 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.6 Γωνία κλίσης 50°

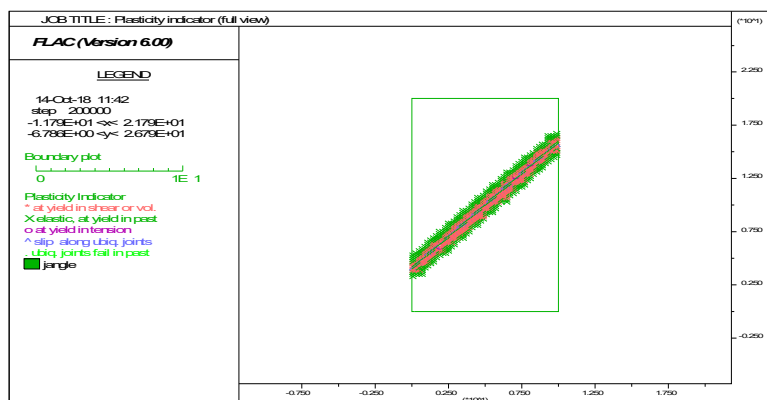
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια.



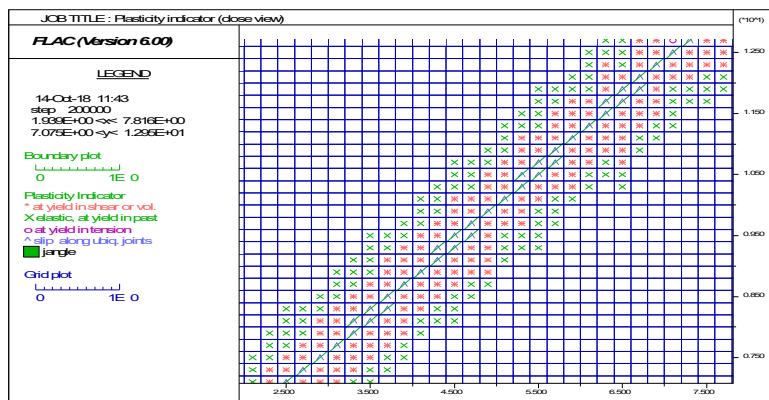
Σχήμα 120 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατεμνόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια. Κατά την υπό κλίση διάδοση παρασέρνει γειτονικές ζώνες οι οποίες αστοχούν σε εφελκυσμό.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

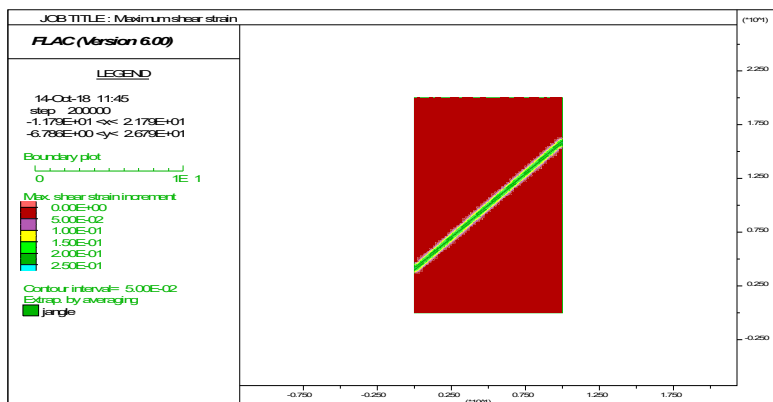


Σχήμα 121 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 122 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου στην περιοχή πλησίον της ασυνέχειας. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

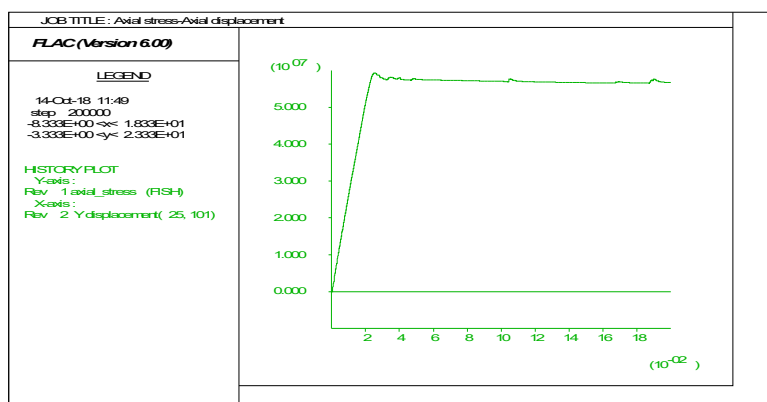
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 123 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.7 Γωνία κλίσης 60°

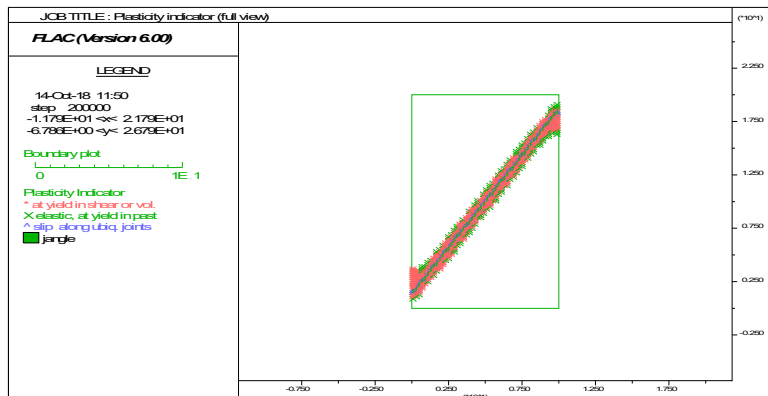
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια.



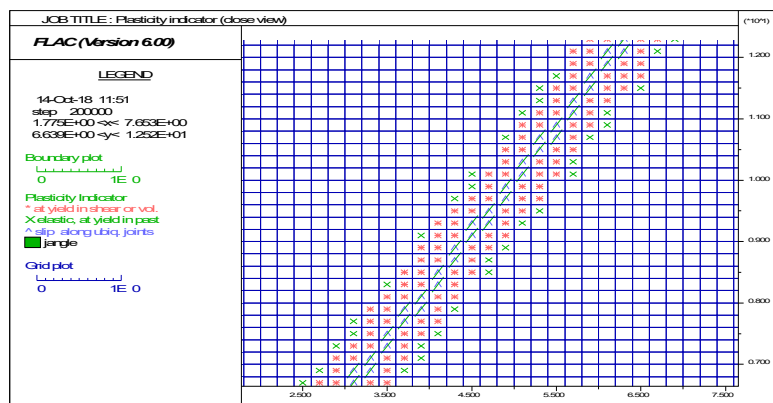
Σχήμα 124 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατενόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

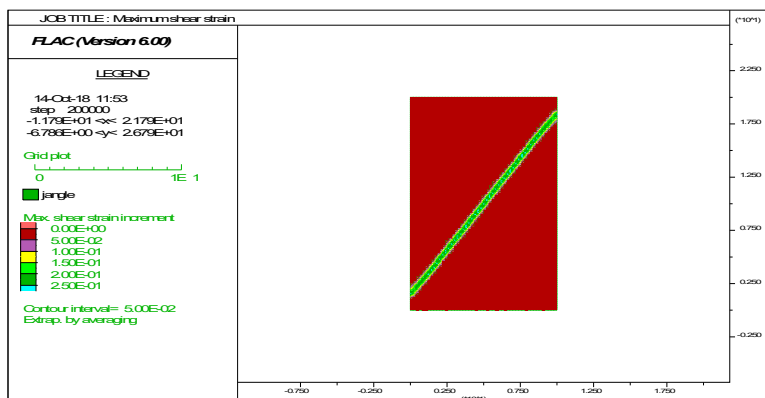


Σχήμα 125 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 126 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

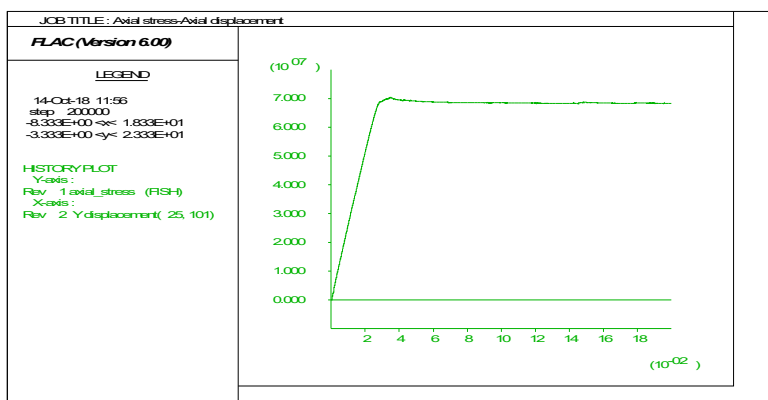
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 127 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.8 Γωνία κλίσης 70°

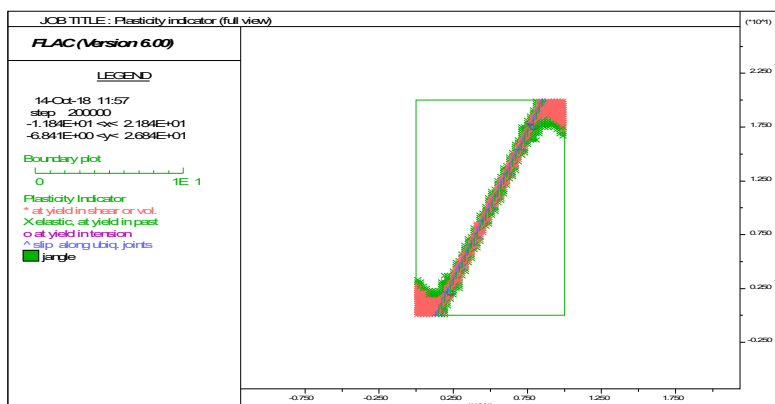
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια.



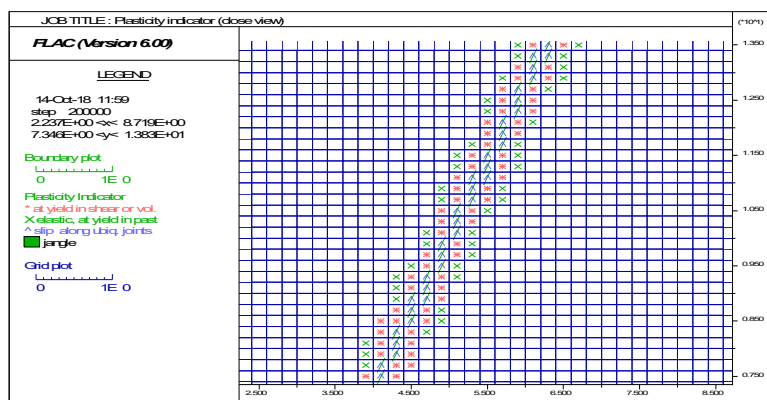
Σχήμα 128 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατενόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια. Κατά την υπό κλίση διάδοση παρασέρνει γειτονικές ζώνες οι οποίες αστοχούν σε εφελκυσμό.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

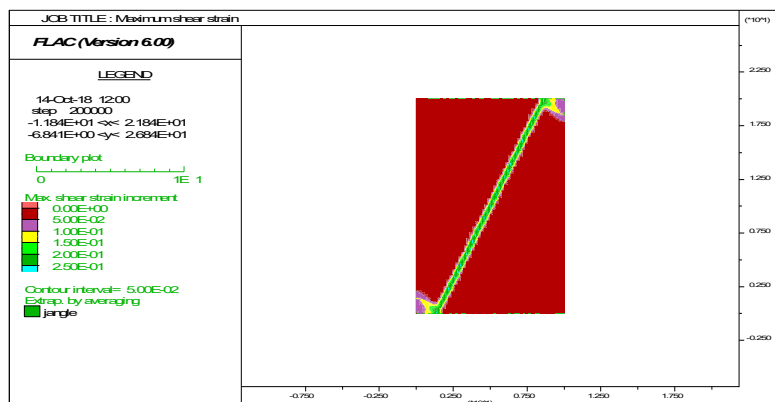


Σχήμα 129 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 130 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

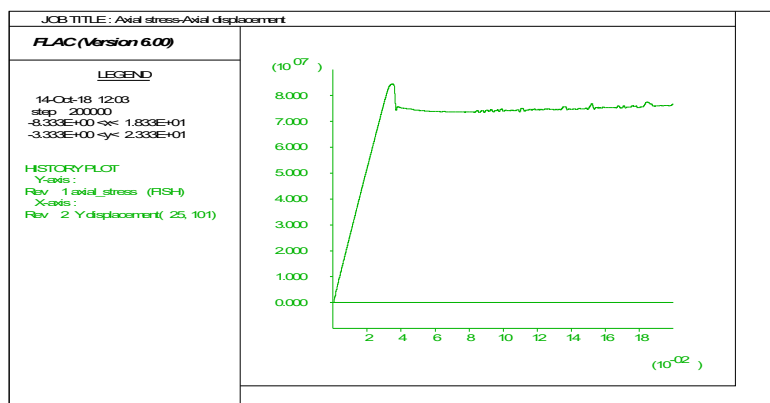
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 131 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.9 Γωνία κλίσης 80°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση της φέρουσας ικανότητας η οποία ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο στην ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια, καθώς η μείωση της φέρουσας ικανότητας μετά την κορυφαία αντοχή θα πρέπει να περιλαμβάνει και αστοχία του ίδιου του άρρηκτου πετρώματος.

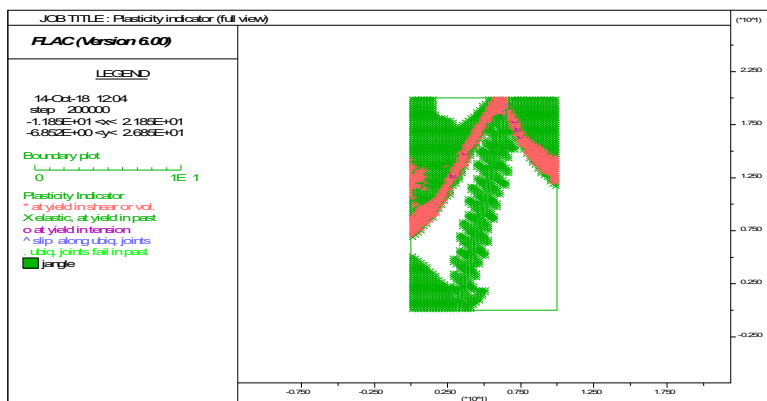


Σχήμα 132 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται αφενός σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας, αφετέρου σε διατμητική αστοχία ζωνών του άρρηκτου πετρώματος. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται, όπως και στα προηγούμενα στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα.

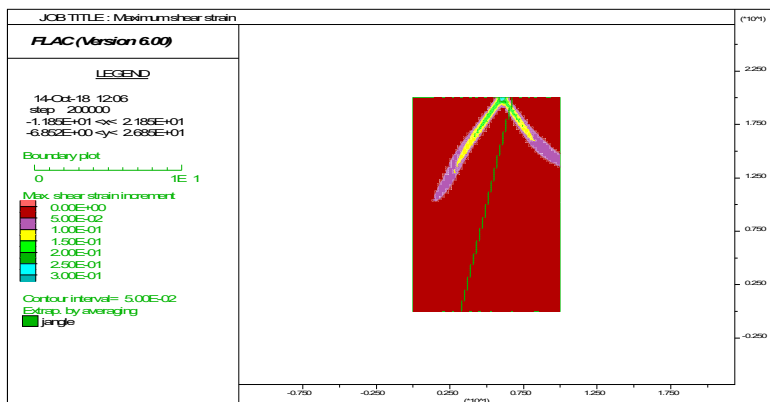
Επιπλέον, αστοχούν σε διάτμηση ζώνες του πετρώματος μακριά από το επίπεδο της ασυνέχειας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη γεωμετρία του δοκιμίου καθώς μετά από την αρχική ολίσθηση στην περιοχή της ασυνέχειας ο παρεμποδισμός της ολίσθησης από της συνοριακές συνθήκες οδηγεί στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.



Σχήμα 133 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

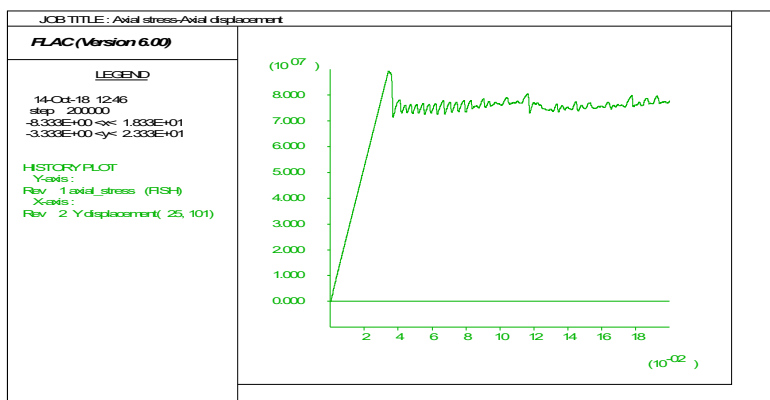
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής μακριά από την ασυνέχεια, που οφείλεται στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος. Επιπλέον, οι ζώνες που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια διαρρέουν.



Σχήμα 134 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.4.10 Γωνία κλίσης 90°

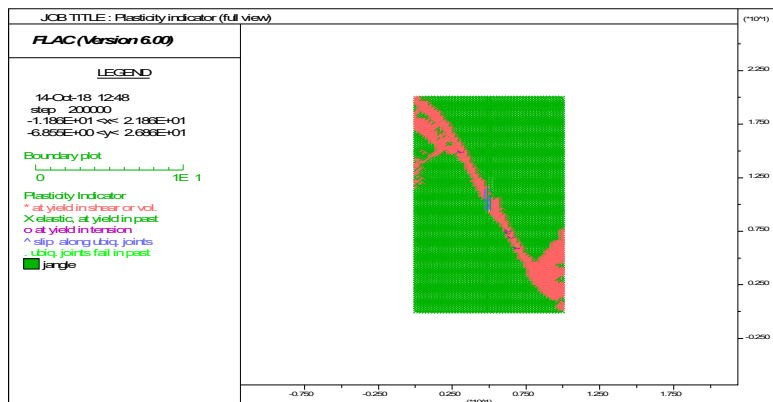
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση της φέρουσας ικανότητας η οποία ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



Σχήμα 135 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

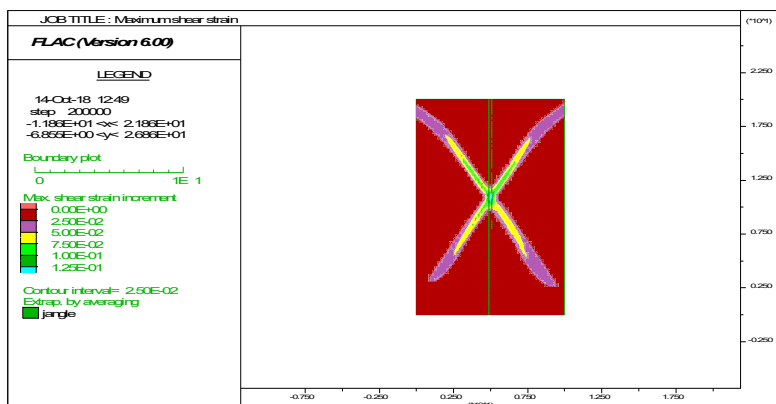
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή σε όλες τις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν εμπλέκονται στην αστοχία, παρά μόνο στην περιοχή που το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας συναντάει το μέτωπο διαρροής

στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, όπως αυτό προκύπτει από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής.



Σχήμα 136 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC ($45+\phi/2$).



Σχήμα 137 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.5 Σειρά Ijoint-distance 0.2

Στην προηγούμενη σειρά αριθμητικών μοντέλων προσομοιώθηκε μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργήθηκε από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου UJ στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στους μηχανισμούς αστοχίας του δοκιμίου συμμετέχει και η διαρροή του άρρηκτου πετρώματος ακόμη και για γωνίες κλίσεις της ασυνέχειας που θεωρητικά θα αστοχούσε μόνο η ασυνέχεια. Έτσι, οι τιμές της αντοχής του δοκιμίου της βραχομάζας διαφέρουν από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες.

Έτσι, αποφασίστηκε να διερευνηθεί μία νέα σειρά μοντέλων, όπου να προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.2 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας. Οι ιδιότητες των ζωνών αυτών είναι:

πυκνότητα=2500 kg/m³

ελαστικές ιδιότητες:

Μέτρο συστολής (bulk modulus)=2.77778x10¹⁰ Pa

Μέτρο διάτμησης (shear modulus)=2.08333 x10¹⁰ Pa

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος:

Συνοχή (cohesion)=10 x10⁶ Pa

Γωνία τριβής (friction)=40.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)=4.2 x10⁶ Pa

Ιδιότητες ασυνεχειών:

Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°

Συνοχή (jcohesion)= 10 x10⁶ Pa

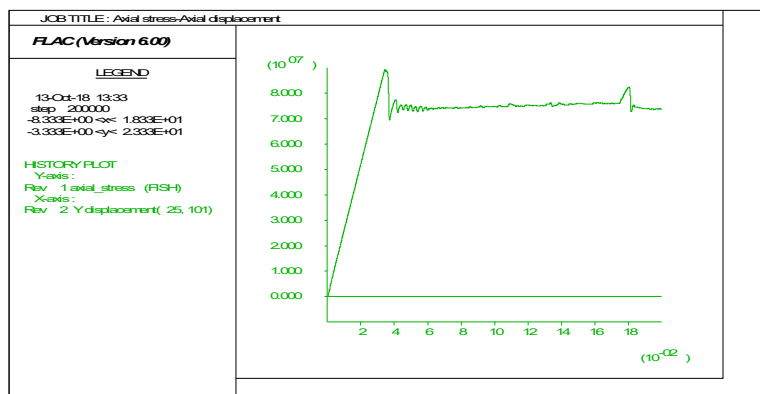
Γωνία τριβής (jfriction)= 40.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (jtension)= 4.2 x10⁶ Pa

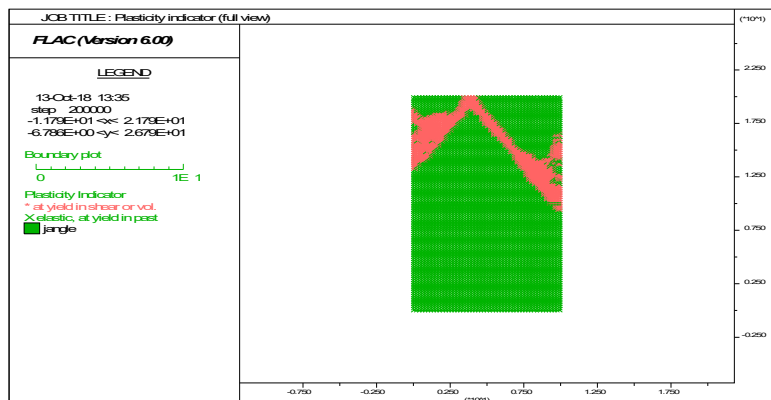
4.5.1 Γωνία κλίσης θ°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.

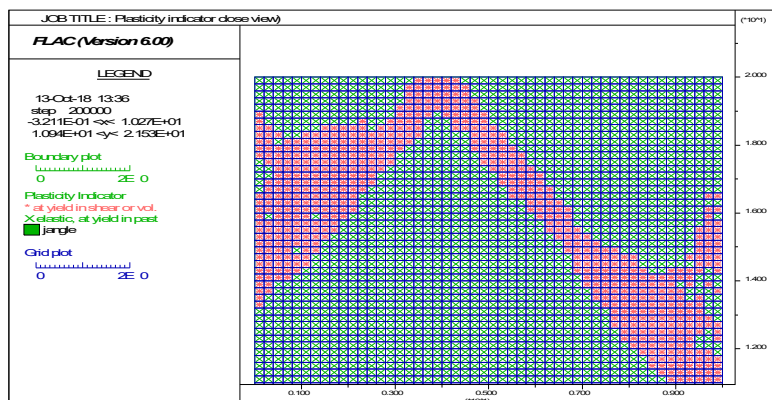


Σχήμα 138 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή σε όλες τις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν εμπλέκονται στην αστοχία, κάτι που είναι σύμφωνο με τη θεωρία.

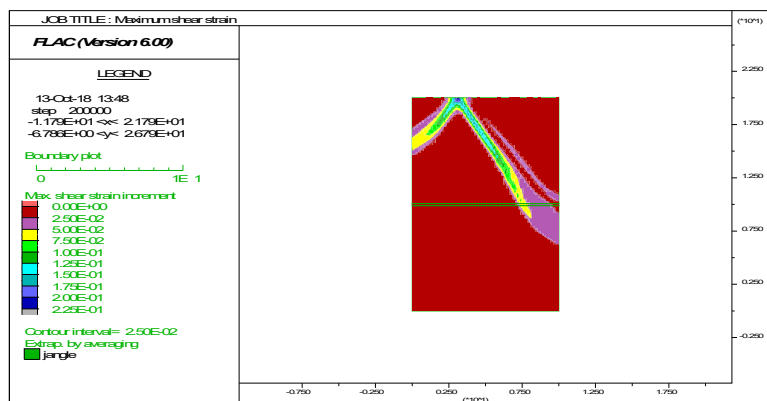


Σχήμα 139 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 140 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

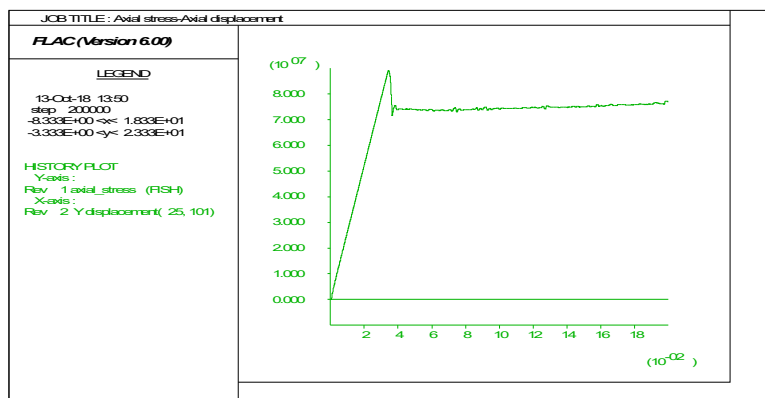
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC ($45+\varphi/2$).



Σχήμα 141 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

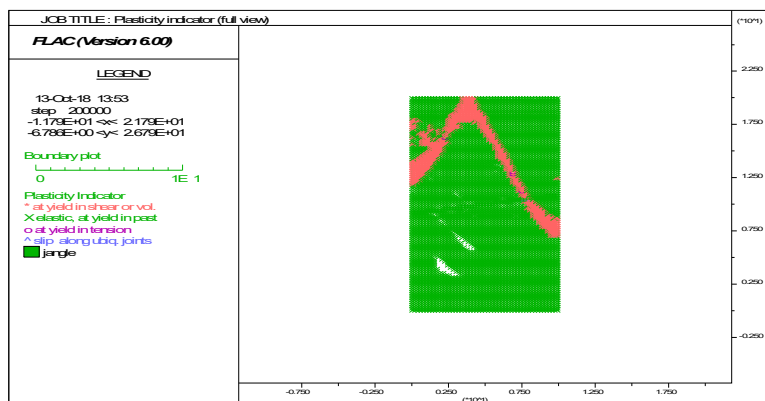
4.5.2 Γωνία κλίσης 10°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.

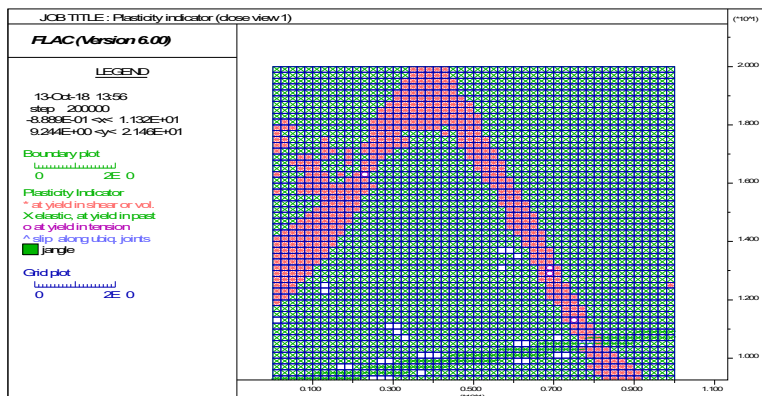


Σχήμα 142 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

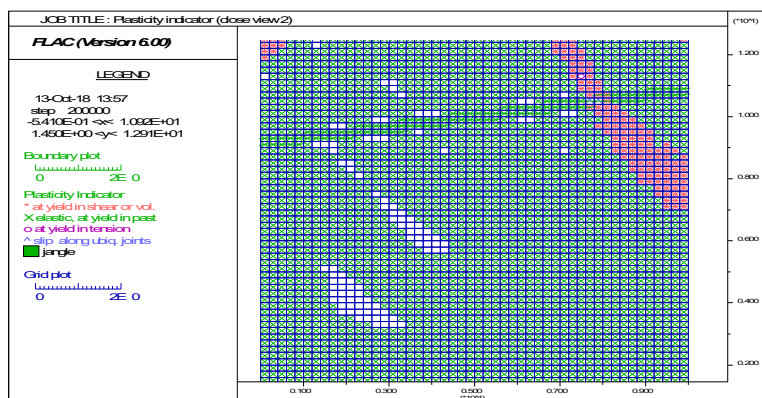
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή σε όλες τις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Υπάρχουν μόνο ορισμένες μικρές περιοχές στις οποίες δεν παρατηρείται διαρροή, που σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας έχει επίδραση στον τρόπο αστοχίας του μοντέλου. Εντούτοις, οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια ως επί το πλείστον δεν εμπλέκονται στην αστοχία, κάτι που είναι σύμφωνο με τη θεωρία.



Σχήμα 143 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

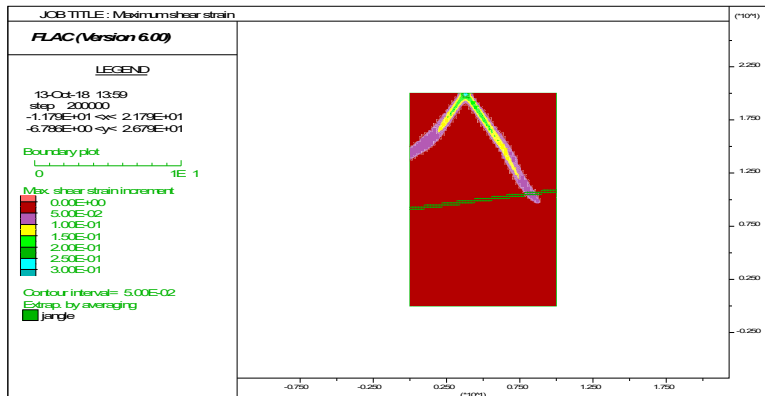


Σχήμα 144 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 145 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

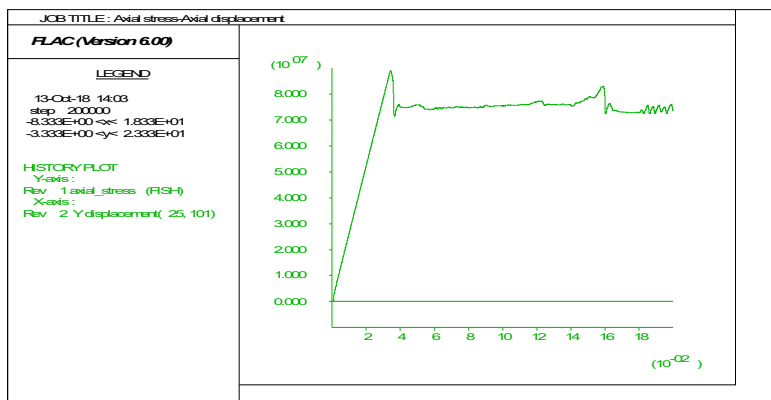
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC $(45+\phi/2)$.



Σχήμα 146 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

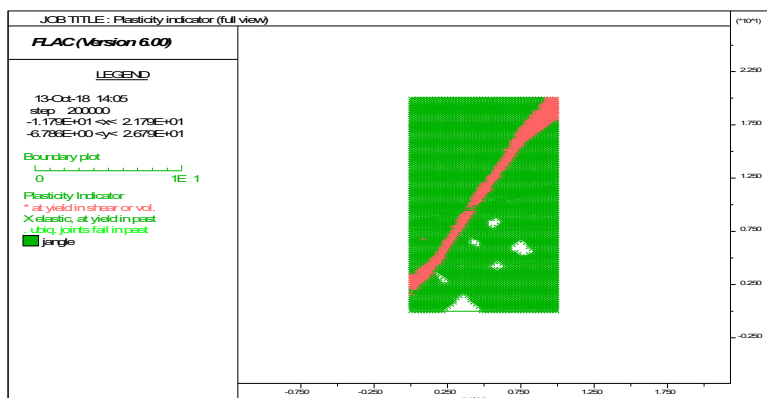
4.5.3 Γωνία κλίσης 20°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Όμως παρατηρούνται τοπικές αυξήσεις της φέρουσας ικανότητας που δεν μπορούν να αποδοθούν σε διαρροή ή ολίσθηση, και θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.

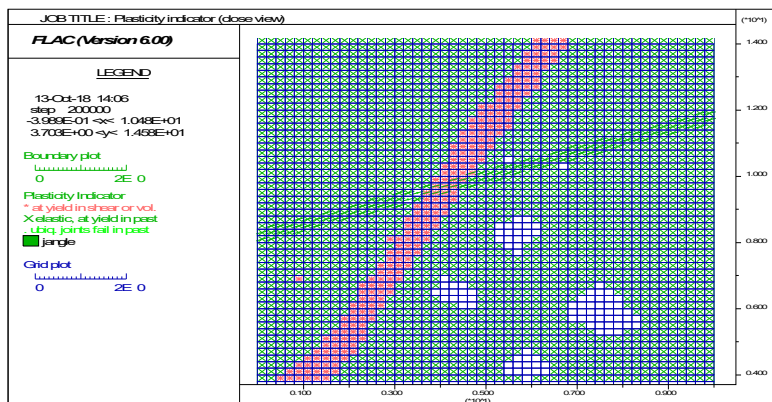


Σχήμα 147 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις περισσότερες ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Όμως, υπάρχουν και ζώνες που δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας με γωνία κλίσης 20° έχει επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια ολισθαίνουν

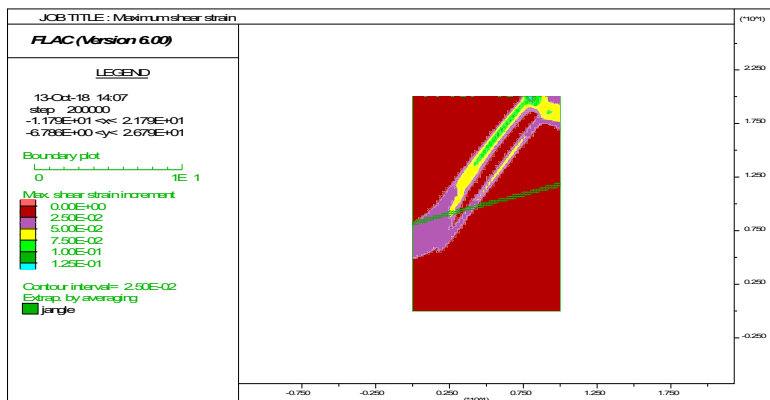


Σχήμα 148 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 149 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

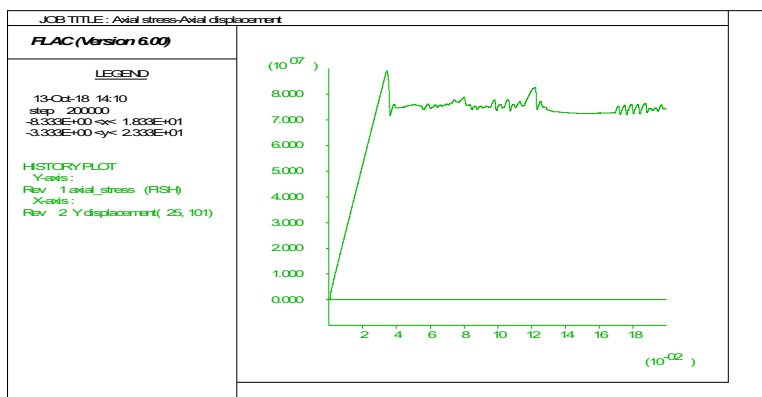
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής υπό μορφή διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο.



Σχήμα 150 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

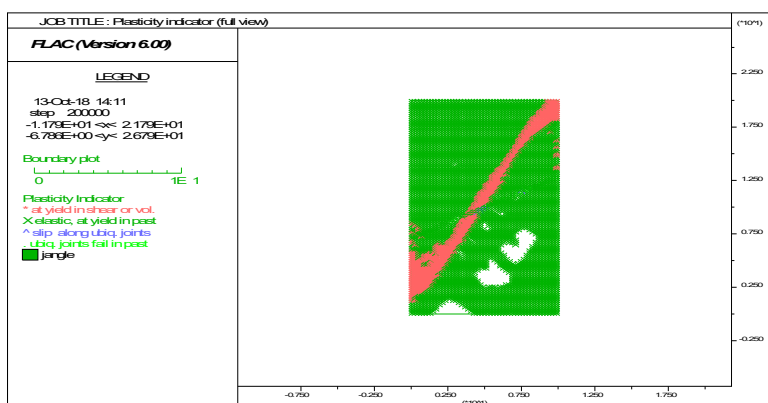
4.5.4 Γωνία κλίσης 30°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Οι τοπικές αυξήσεις της φέρουσας ικανότητας δεν μπορούν να αποδοθούν σε διαρροή ή ολίσθηση και θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.



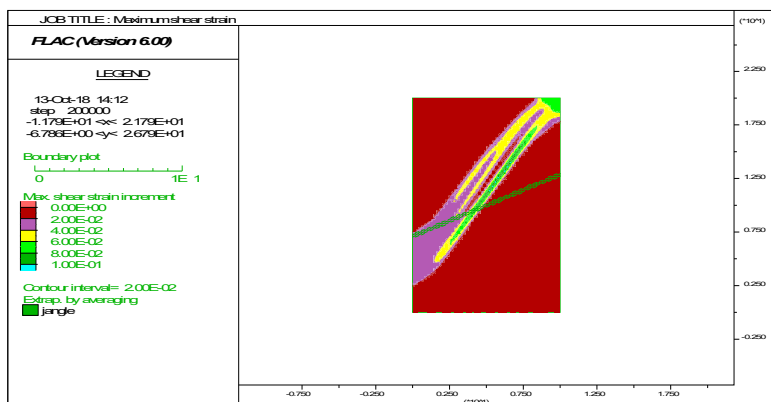
Σχήμα 151 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις περισσότερες ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Όμως, υπάρχουν και ζώνες που δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας με γωνία κλίσης 30° έχει επίσης επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια ολισθαίνουν.



Σχήμα 152 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

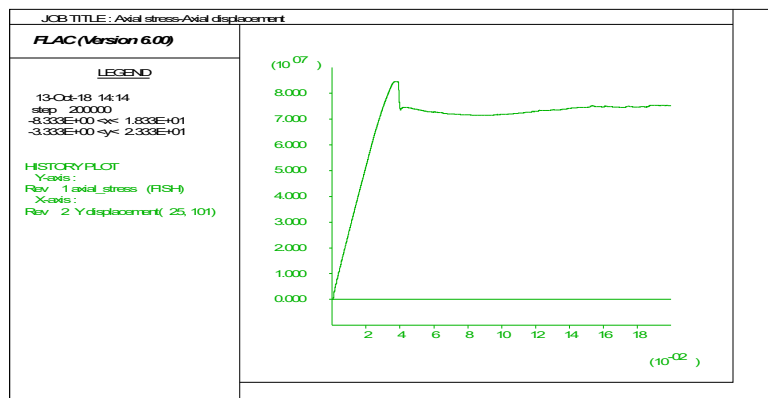
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής υπό μορφή διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο. Ταυτόχρονα, οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια βρίσκονται σε ολίσθηση.



Σχήμα 153 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

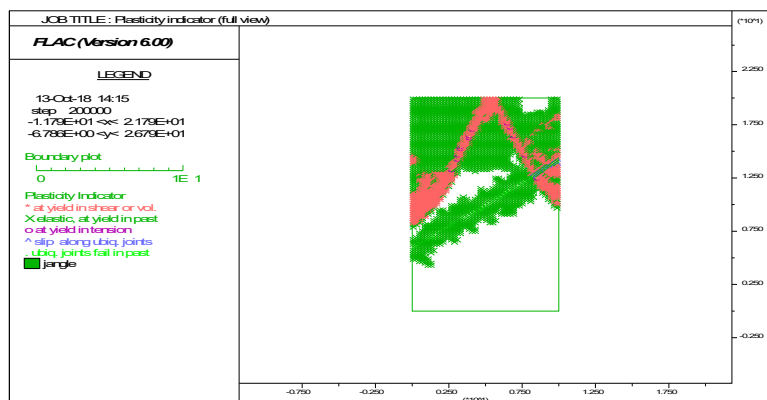
4.5.5 Γωνία κλίσης 40°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.

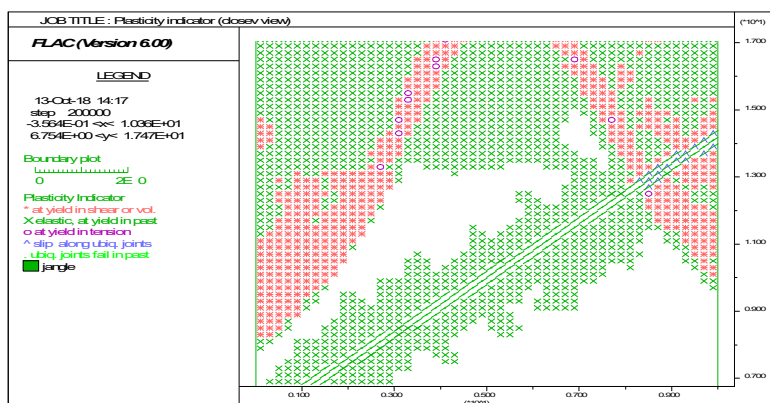


Σχήμα 154 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται τόσο με ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια, όσο και με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος.

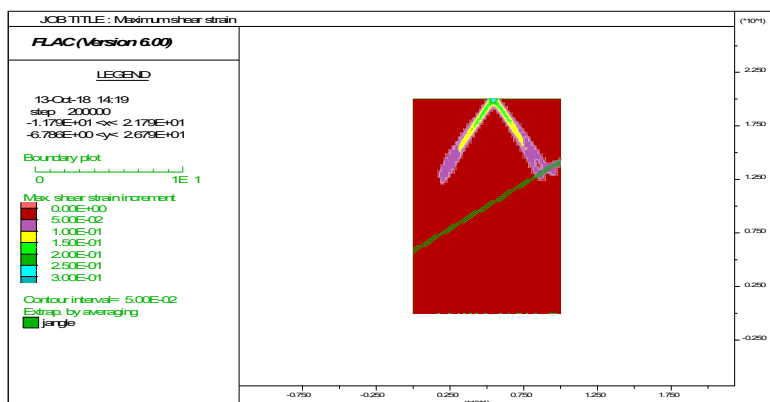


Σχήμα 155 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 156 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο. Ταυτόχρονα, οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια βρίσκονται σε ολίσθηση.

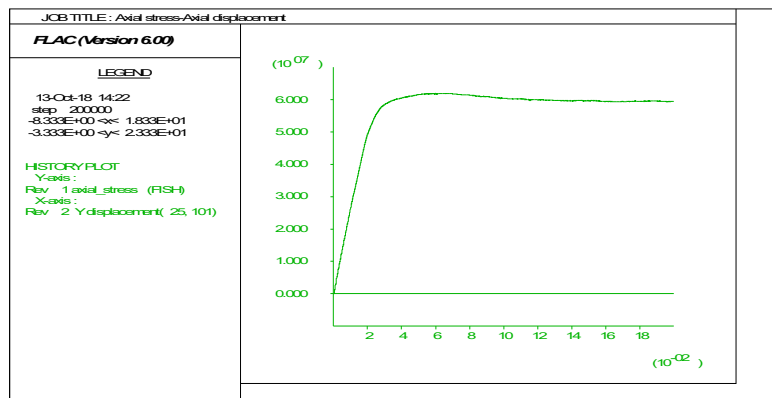


Σχήμα 157 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.5.6 Γωνία κλίσης 50°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά. Στη συνέχεια, πλησίον της κορυφαιάς αντοχής παρατηρείται μία όλκιμη συμπεριφορά που ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί

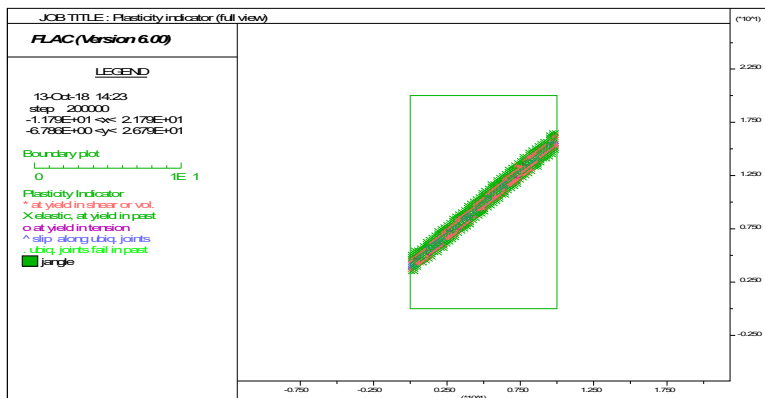
τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.



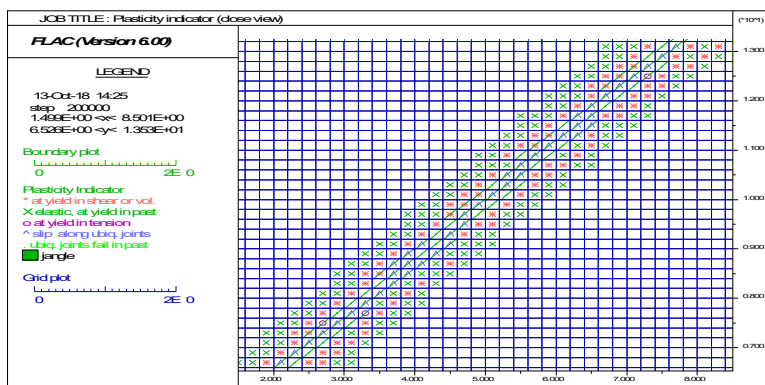
Σχήμα 158 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι, όπως και στην προηγούμενη σειρά μοντέλων, η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ επιπλέον, οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατενόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

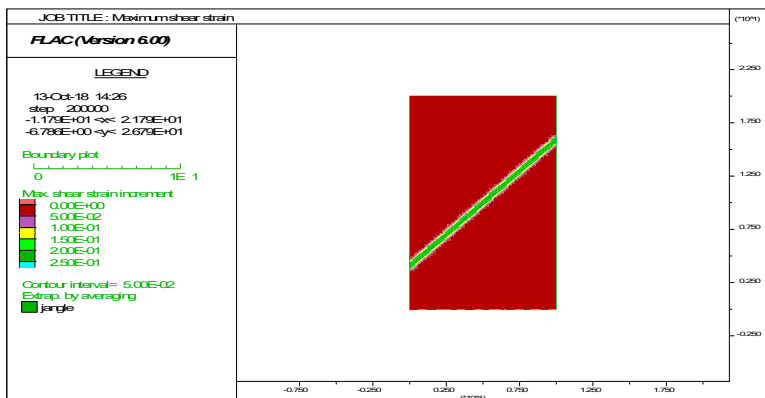


Σχήμα 159 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 160 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

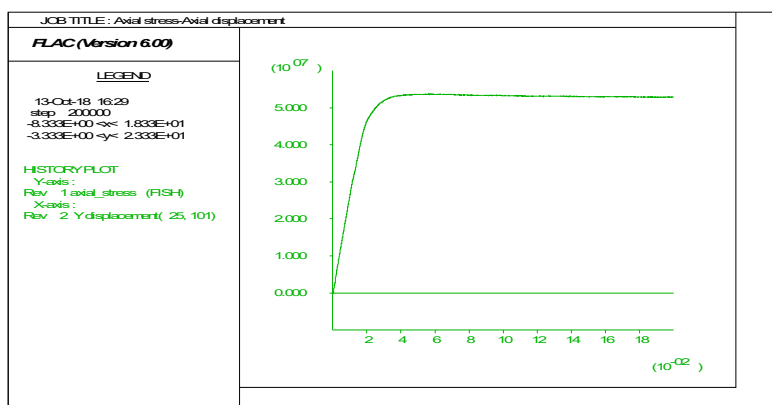
Από την εικόνα της μέγιστης διαμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 161 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διαμηκτικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.5.7 Γωνία κλίσης 60°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά. Στη συνέχεια, πλησίον της κορυφαιάς αντοχής παρατηρείται μία όλκιμη συμπεριφορά που ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.

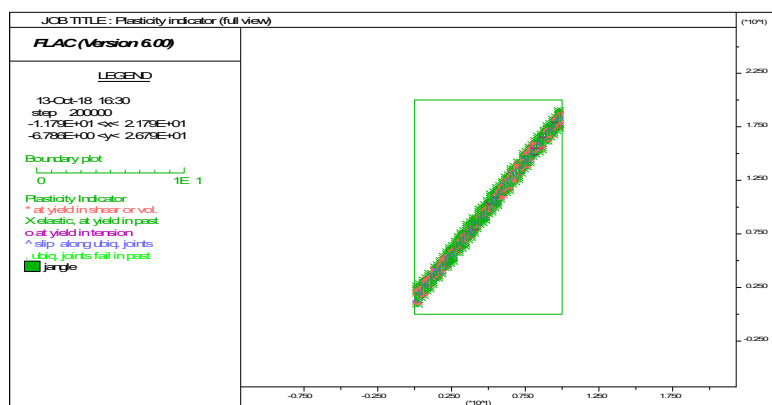


Σχήμα 162 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

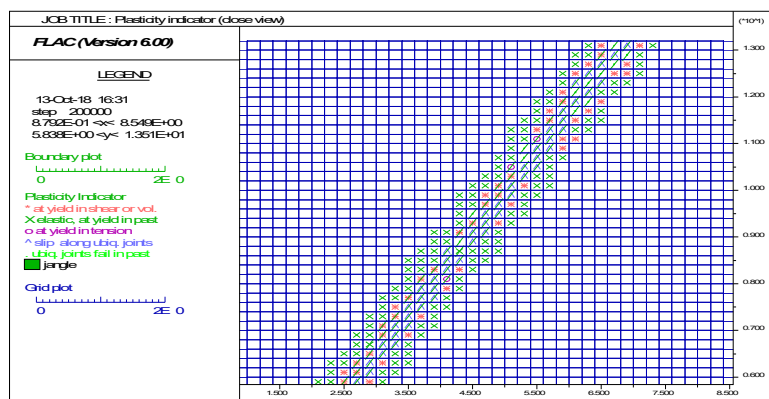
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι, όπως και στην προηγούμενη σειρά μοντέλων, η αστοχία εκδηλώνεται σε μία

διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ επιπλέον, οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατεμνόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

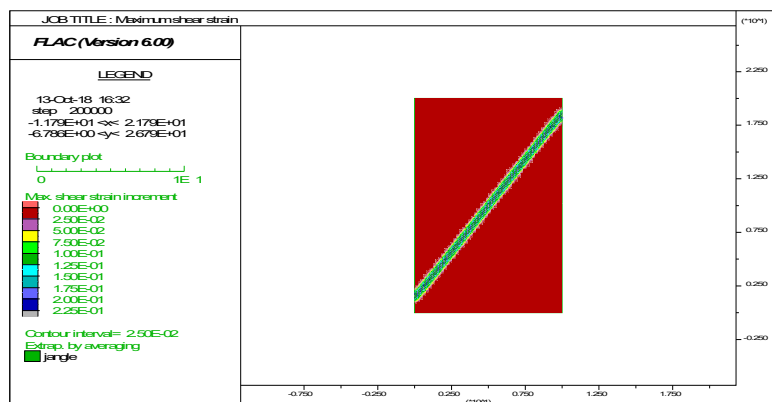


Σχήμα 163 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 164 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

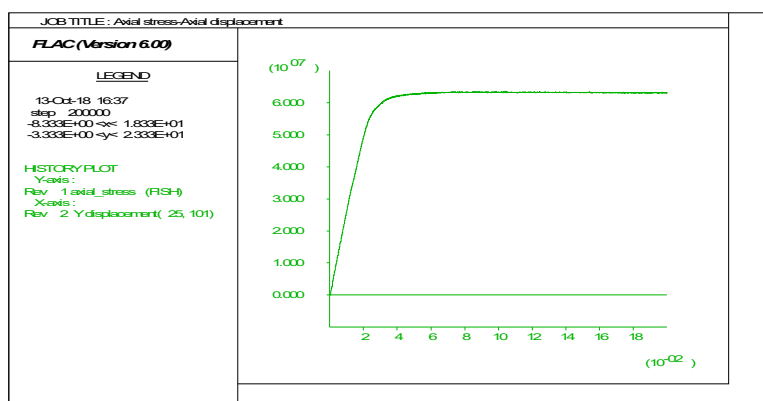
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 165 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.5.8 Γωνία κλίσης 70°

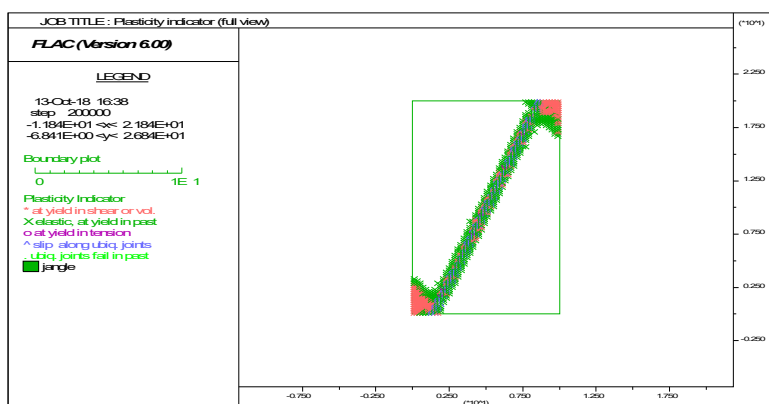
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά. Στη συνέχεια, πλησίον της κορυφαίας αντοχής παρατηρείται μία όλκιμη συμπεριφορά που ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.



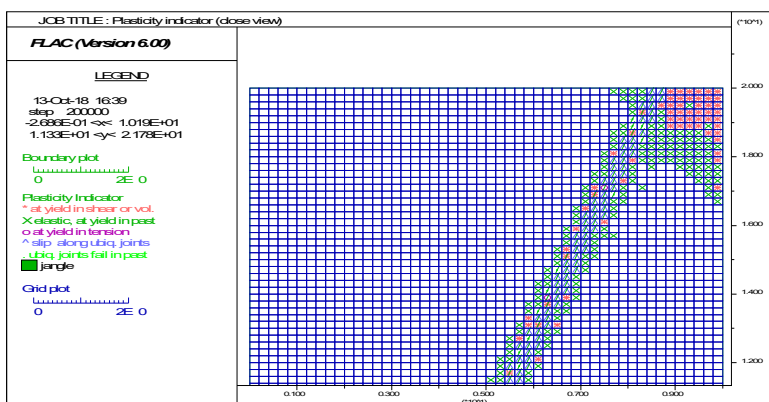
Σχήμα 166 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι, όπως και προηγουμένως, η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ ολισθαίνουν, ενώ επιπλέον, οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου και των συνοριακών συνθηκών, εμφανίζονται περιοχές διαρροής στην πάνω δεξιά και στην κάτω αριστερή γωνία του μοντέλου, όπου και καταλήγουν τα άκρα της ασυνέχειας.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

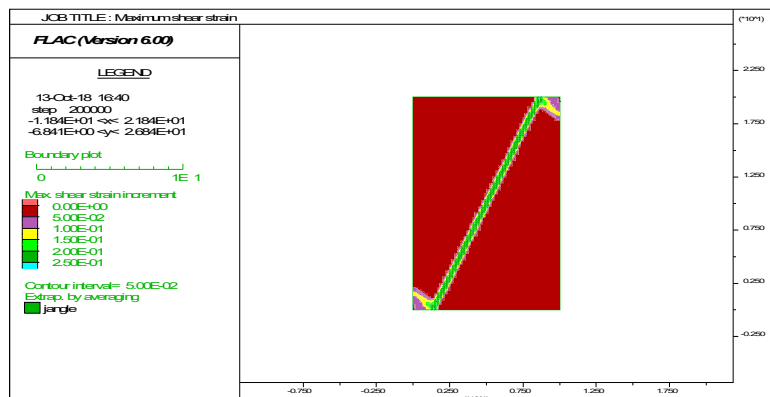


Σχήμα 167 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 168 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

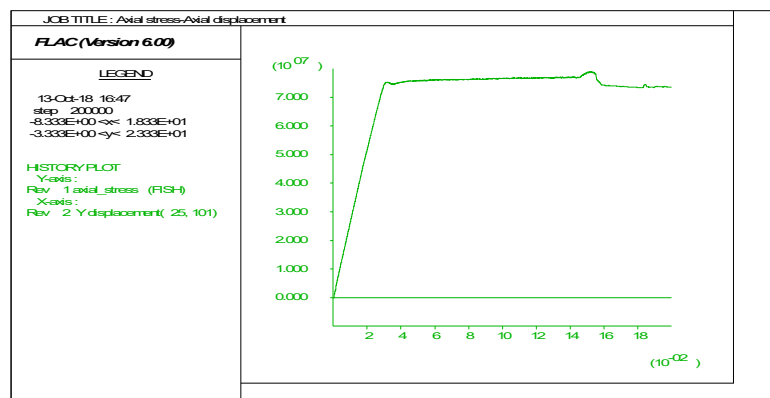
Από την εικόνα της μέγιστης διαμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 169 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διαμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.5.9 Γωνία κλίσης 80°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή και στη συνέχεια παρατηρείται φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.

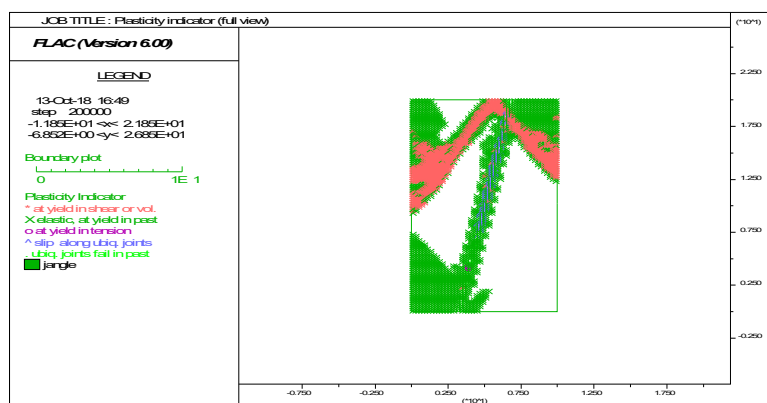


Σχήμα 170 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται αφενός σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας, αφετέρου σε διατμητική αστοχία ζωνών του άρρηκτου πετρώματος. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ ολισθαίνουν. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται, όπως και στα προηγούμενα στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα.

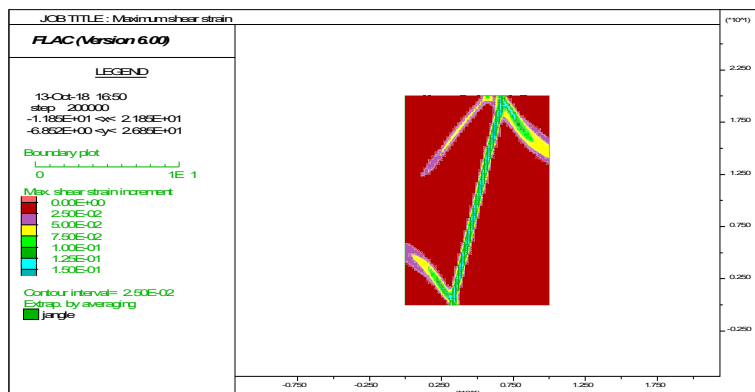
Επιπλέον, αστοχούν σε διάτμηση ζώνες του πετρώματος μακριά από το επίπεδο της ασυνέχειας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη γεωμετρία του δοκιμίου καθώς μετά από την αρχική ολίσθηση στην περιοχή της ασυνέχειας ο παρεμποδισμός της ολίσθησης από της συνοριακές συνθήκες οδηγεί στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.



Σχήμα 171 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

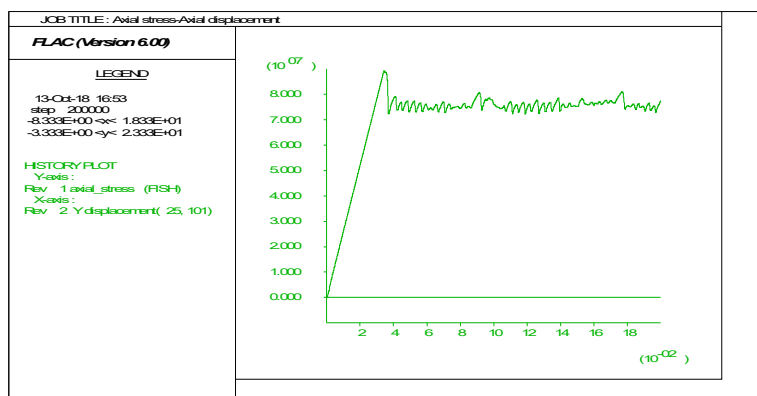
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένα μέτωπα διαρροής μακριά από την ασυνέχεια, που οφείλονται στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος. Επιπλέον, οι ζώνες που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια διαρρέουν.



Σχήμα 172 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.5.10 Γωνία κλίσης 90°

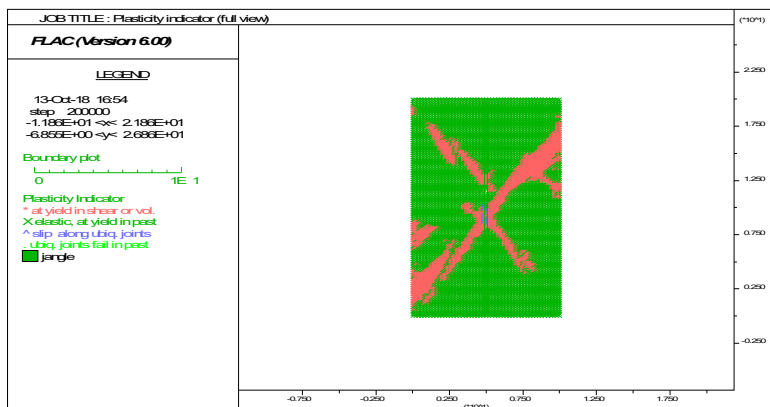
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση της φέρουσας ικανότητας η οποία ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



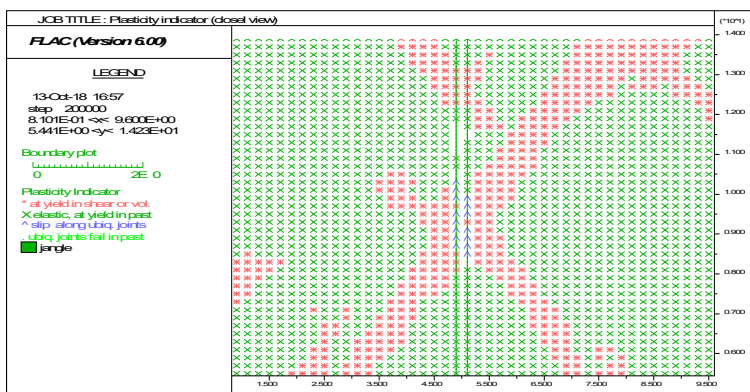
Σχήμα 173 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή σε όλες τις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν εμπλέκονται στην αστοχία, παρά μόνο στην περιοχή που το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας συναντάει το μέτωπο διαρροής

στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, όπως αυτό προκύπτει από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής.

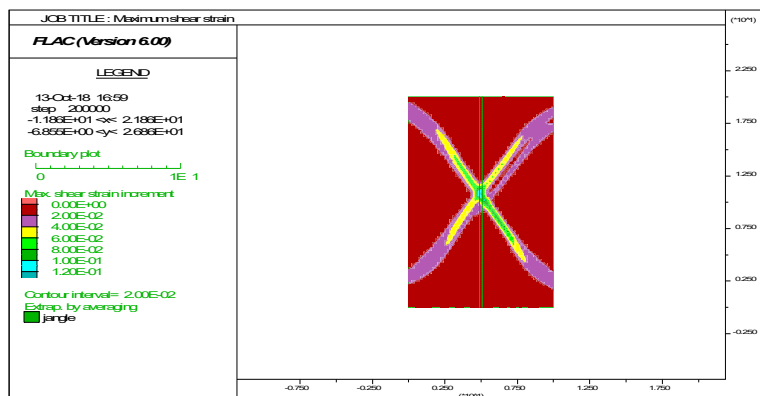


Σχήμα 174 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 175 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC ($45+\phi/2$).



Σχήμα 176 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.6 Σειρά 1joint-distance 0.1 – ίδιες ιδιότητες

Σε αυτή τη σειρά αριθμητικών μοντέλων, προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας. Επιπλέον, στην προσπάθεια να προσομοιωθεί αποτελεσματικότερα η ασυνέχεια, οι ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος σε αυτές τις ζώνες τίθενται ίδιες με τις ιδιότητες της ασυνέχειας. Οι ιδιότητες των ζωνών αυτών είναι:

πυκνότητα=2500 kg/m³

ελαστικές ιδιότητες:

Μέτρο συστολής (bulk modulus)=2.77778x10¹⁰ Pa

Μέτρο διάτμησης (shear modulus)=2.08333 x10¹⁰ Pa

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος (στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ):

Συνοχή (cohesion)= 0 Pa

Γωνία τριβής (friction)=30.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)=0 Pa

Ιδιότητες ασυνεχειών:

Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°

Συνοχή (jcohesion)=0.0

Γωνία τριβής (jfriction)=30.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

Στις υπόλοιπες ζώνες του μοντέλου (με καταστατικό μοντέλο MC), οι ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος είναι:

Συνοχή (cohesion)= 10×10^6 Pa

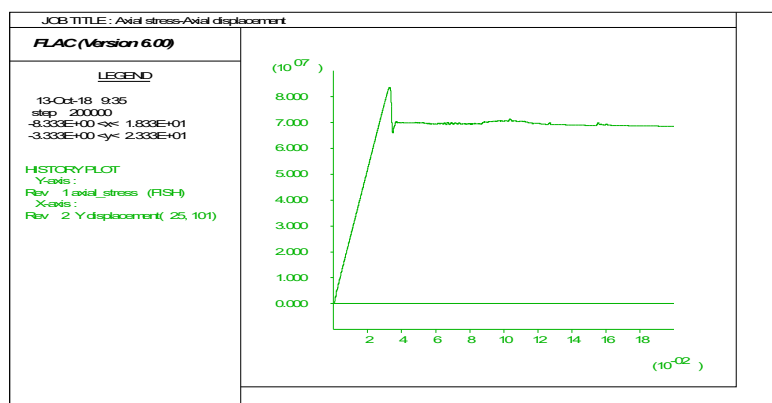
Γωνία τριβής (friction)= 40.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)= 4.2×10^6 Pa

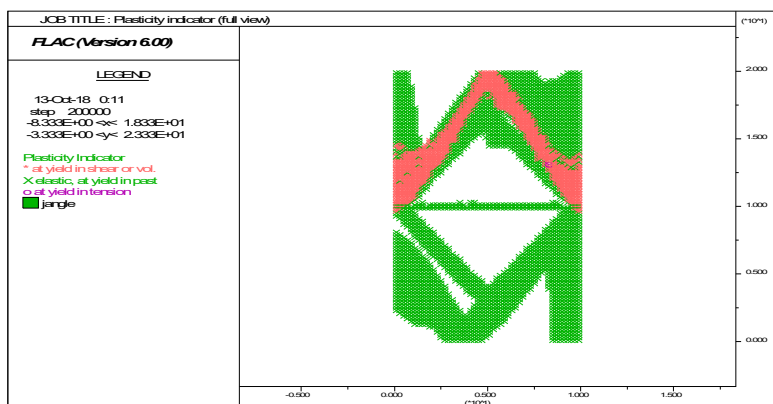
4.6.1 Γωνία κλίσης θ^0

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



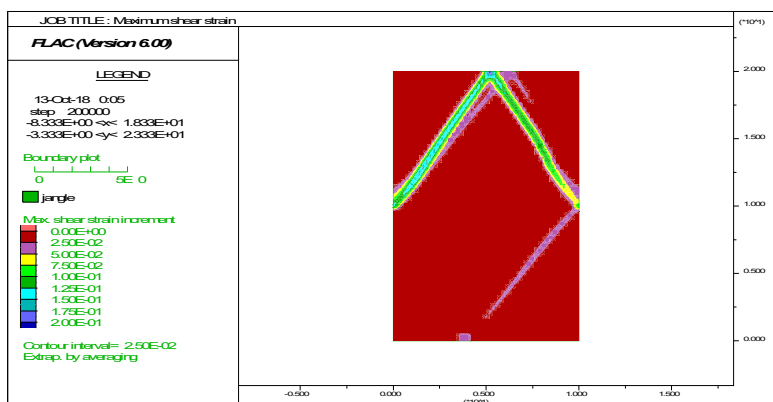
Σχήμα 177 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος τόσο πλησίον της ασυνέχειας όσο και μακριά από αυτή. Όμως, υπάρχουν και σημαντικές περιοχές που οι ζώνες δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας έχει επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ασυνέχειες στις ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν ολισθαίνουν.



Σχήμα 178 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

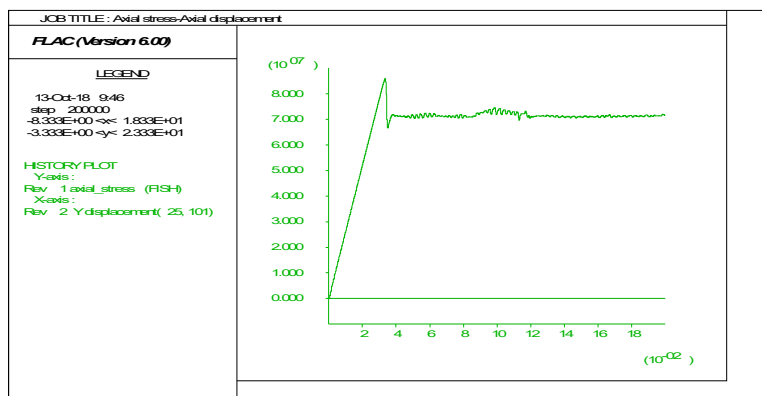
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται κεκλιμένα μέτωπο διαρροής υπό μορφή διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο.



Σχήμα 179 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

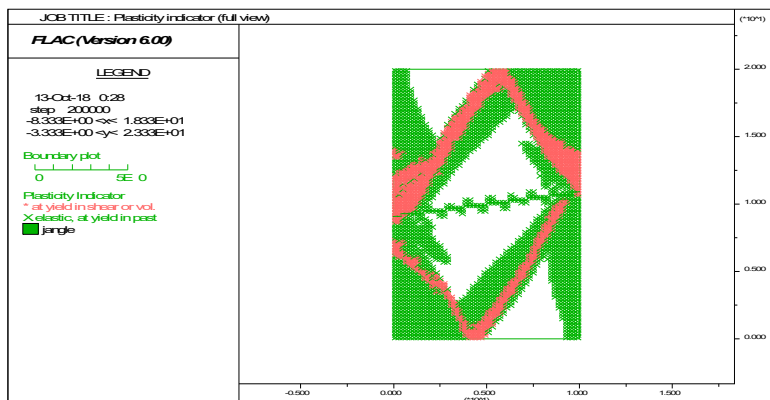
4.6.2 Γωνία κλίσης 10°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



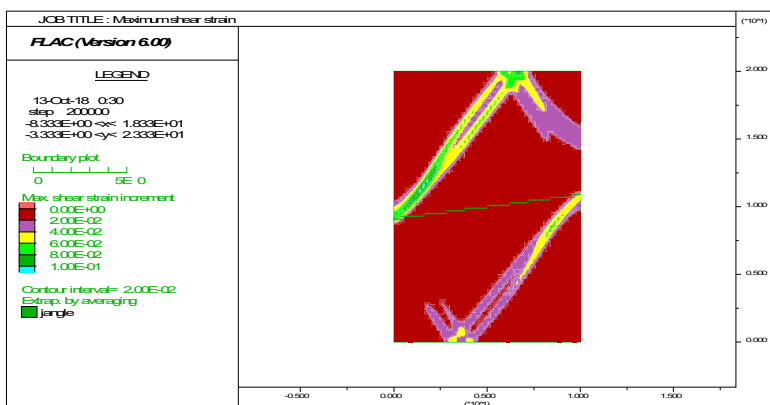
Σχήμα 180 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος τόσο πλησίον της ασυνέχειας όσο και μακριά από αυτή. Όμως, υπάρχουν και σημαντικές περιοχές που οι ζώνες δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας έχει επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ασυνέχειες στις ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν ολισθαίνουν.



Σχήμα 181 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

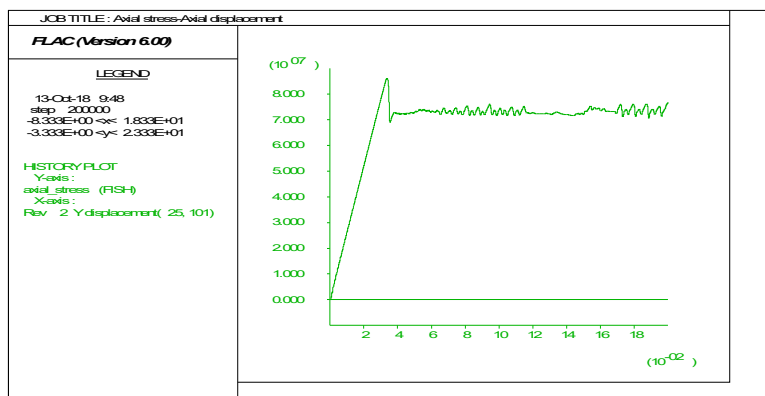
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται κεκλιμένα μέτωπα διαρροής υπό μορφή διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο.



Σχήμα 182 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

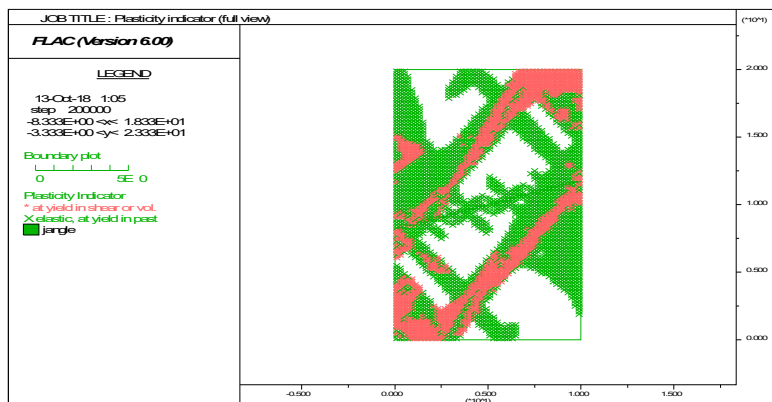
4.6.3 Γωνία κλίσης 20°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



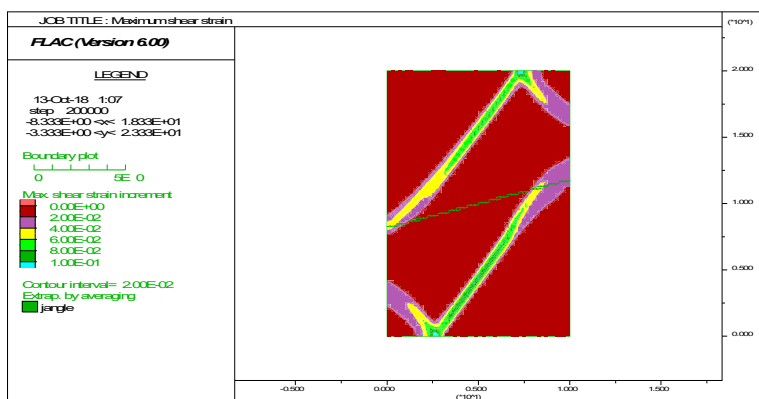
Σχήμα 183 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος τόσο πλησίον της ασυνέχειας όσο και μακριά από αυτή. Όμως, υπάρχουν και σημαντικές περιοχές που οι ζώνες δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας έχει επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ασυνέχειες στις ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν ολισθαίνουν.



Σχήμα 184 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

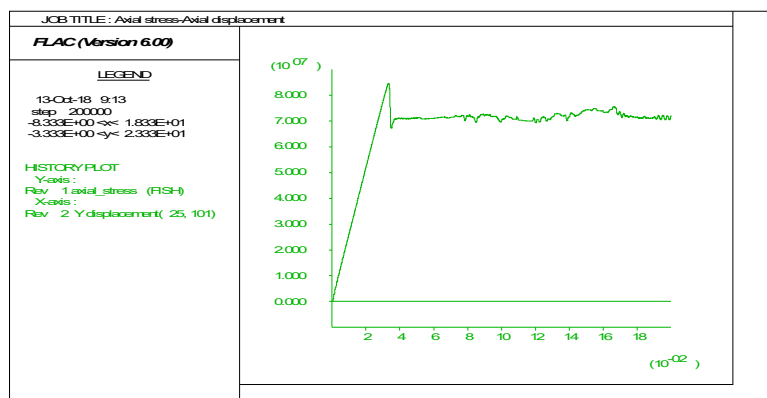
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται κεκλιμένα μέτωπα διαρροής υπό μορφή διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο.



Σχήμα 185 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

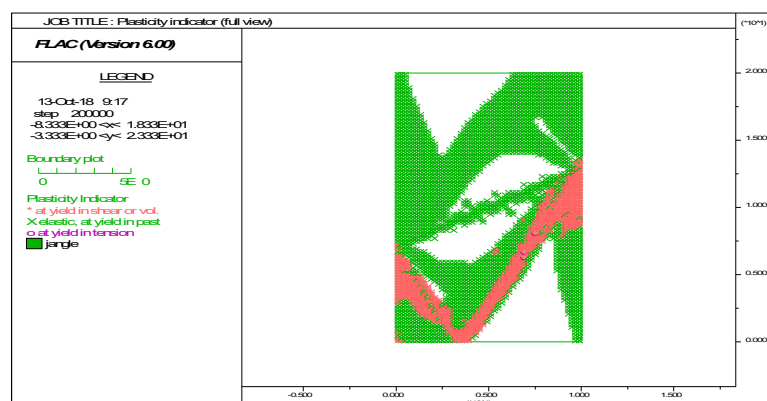
4.6.4 Γωνία κλίσης 30°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



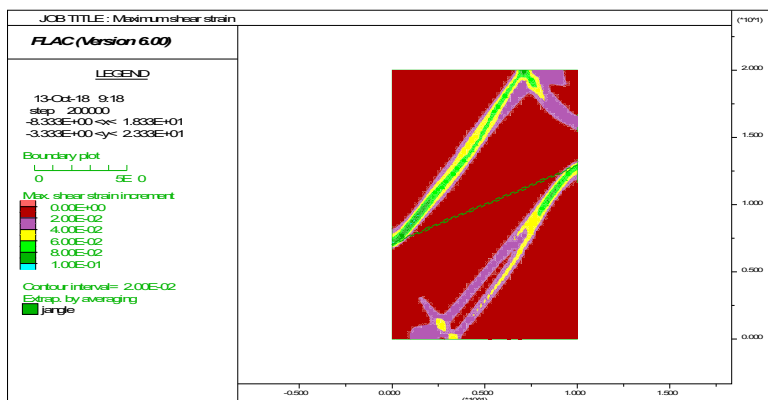
Σχήμα 186 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος τόσο πλησίον της ασυνέχειας όσο και μακριά από αυτή. Όμως, υπάρχουν και σημαντικές περιοχές που οι ζώνες δεν έχουν διαρρεύσει και αυτό σημαίνει ότι η παρουσία της ασυνέχειας έχει επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου. Οι ασυνέχειες στις ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν ολισθαίνουν.



Σχήμα 187 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

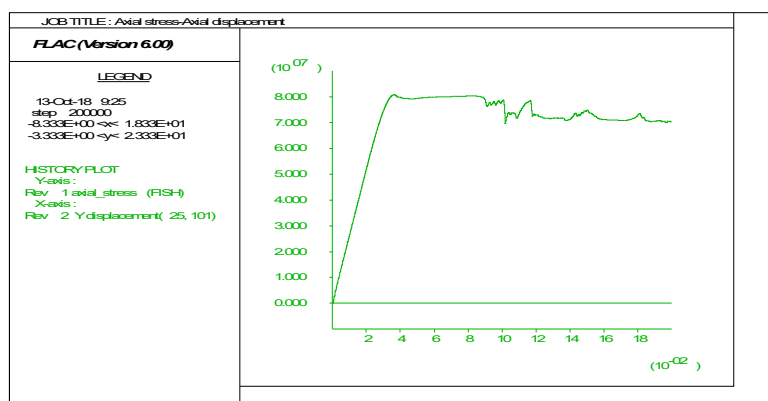
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται κεκλιμένα μέτωπα διαρροής υπό μορφή διατμητικής ζώνης σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο.



Σχήμα 188 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

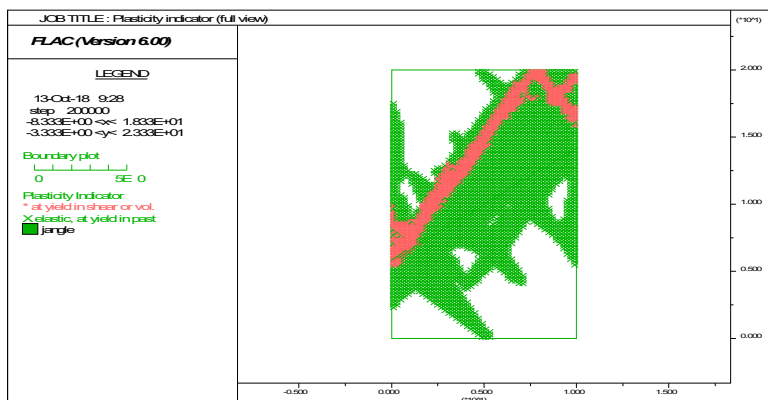
4.6.5 Γωνία κλίσης 40°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται μία φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.



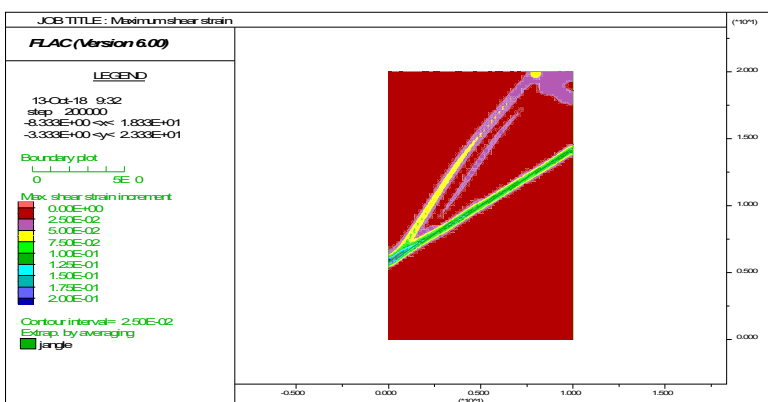
Σχήμα 189 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται τόσο με ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια, όσο και με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 190 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

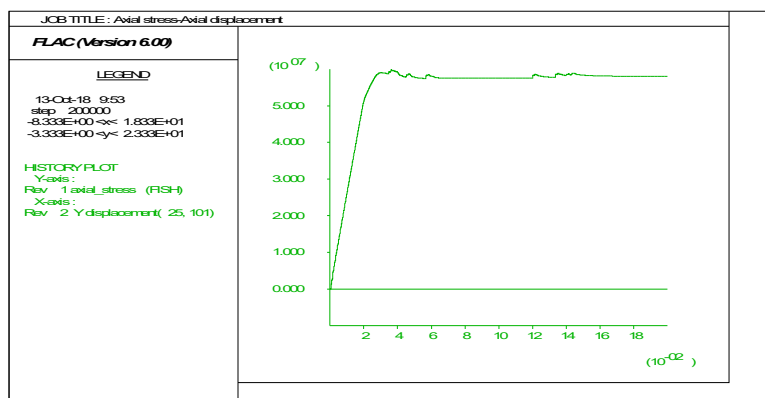
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο. Ταυτόχρονα, οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια βρίσκονται σε ολίσθηση.



Σχήμα 191 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.6.6 Γωνία κλίσης 50°

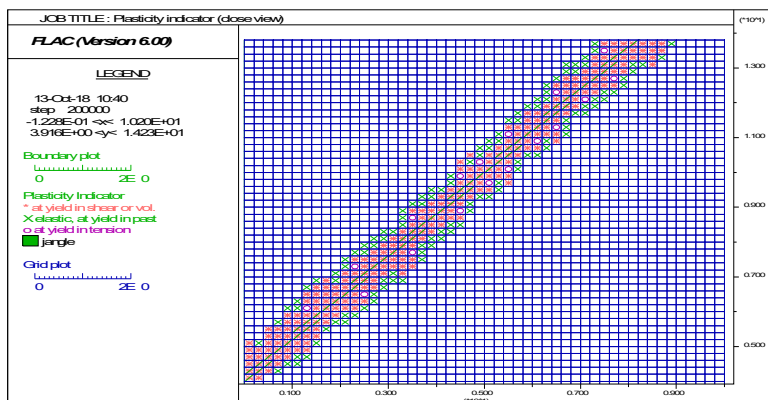
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά. Στη συνέχεια, πλησίον της κορυφαίας αντοχής παρατηρείται μία όλκιμη συμπεριφορά που ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 192 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

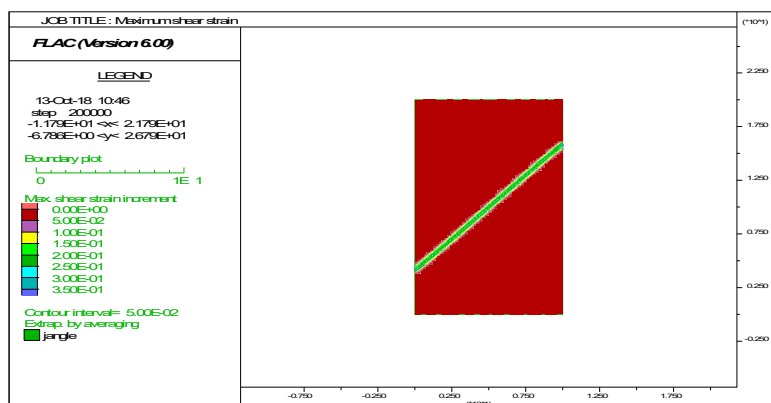
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι, η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν, ενώ επιπλέον, και οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατεμνόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.



Σχήμα 193 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

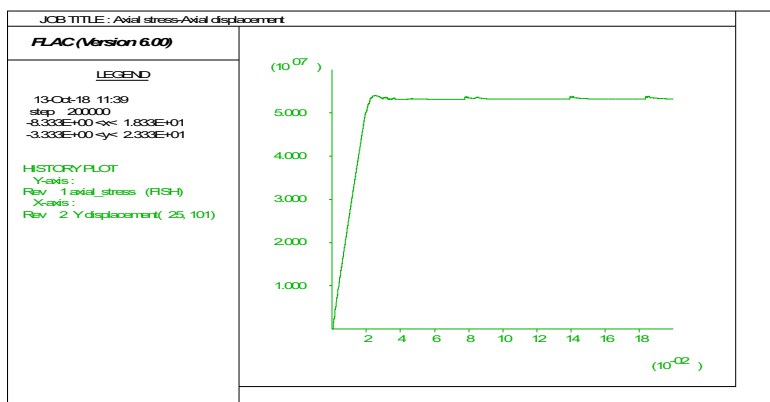
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 194 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.6.7 Γωνία κλίσης 60°

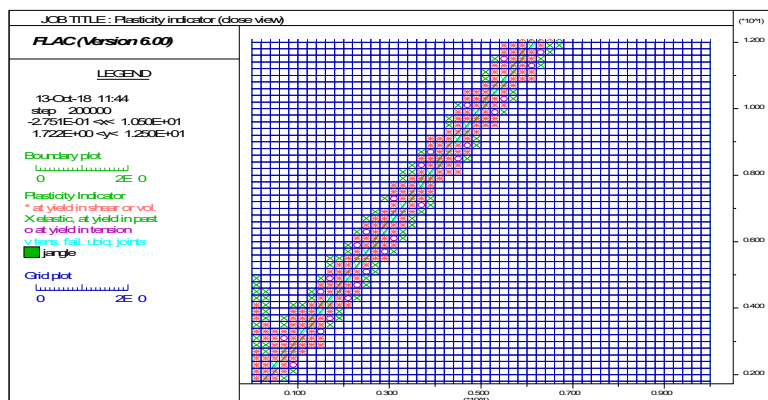
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή και στη συνέχεια ακολουθεί φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 195 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

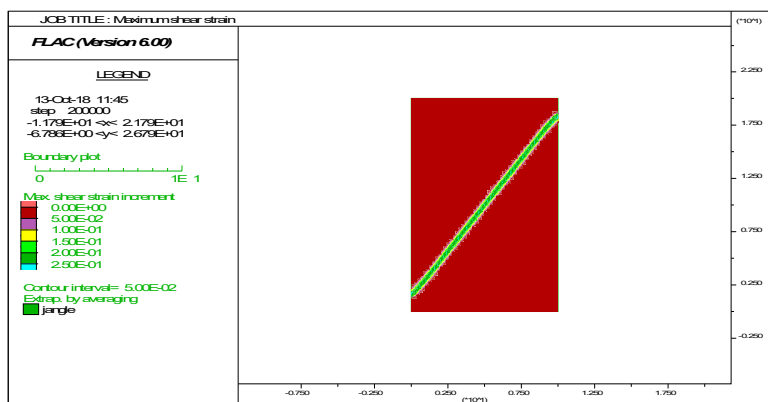
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι, όπως και στην προηγούμενη σειρά μοντέλων, η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ επιπλέον, οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.



Σχήμα 196 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

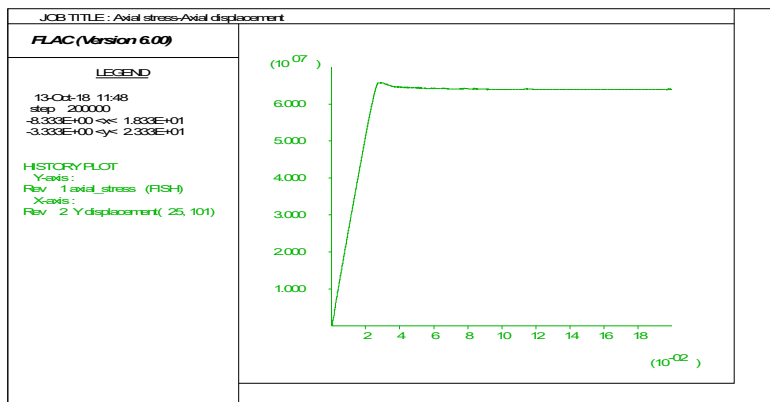
Από την εικόνα της μέγιστης διαμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 197 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διαμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.6.8 Γωνία κλίσης 70°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή και στη συνέχεια ακολουθεί φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.

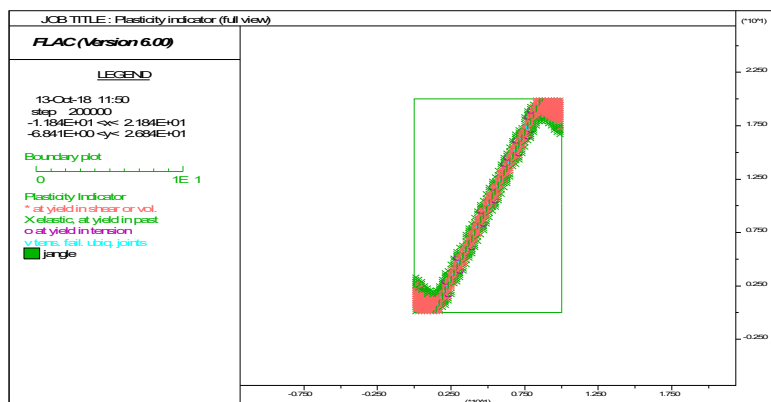


Σχήμα 198 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

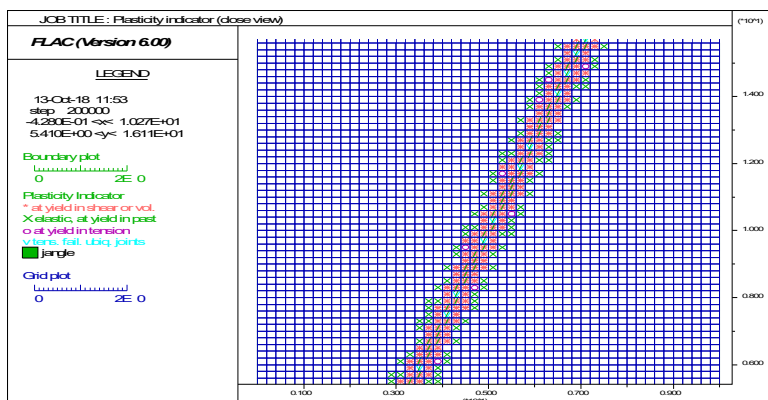
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι, όπως και στην προηγούμενη σειρά μοντέλων, η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ επιπλέον, οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση.

Επιπλέον, λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου και των συνοριακών συνθηκών, εμφανίζονται περιοχές διαρροής στην πάνω δεξιά και στην κάτω αριστερή γωνία του μοντέλου, όπου και καταλήγουν τα άκρα της ασυνέχειας.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

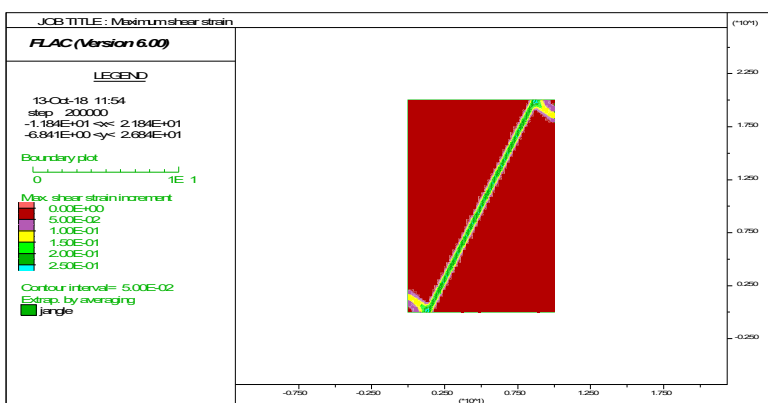


Σχήμα 199 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 200 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

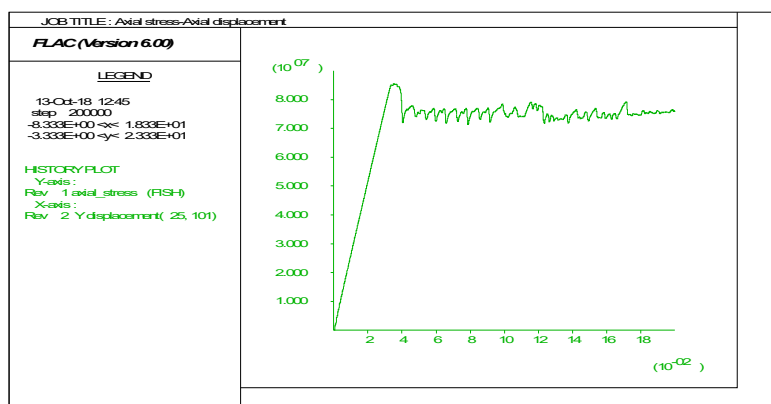
Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζεται κεκλιμένο μέτωπο διαρροής στην περιοχή των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια και παράλληλα προς αυτή.



Σχήμα 201 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

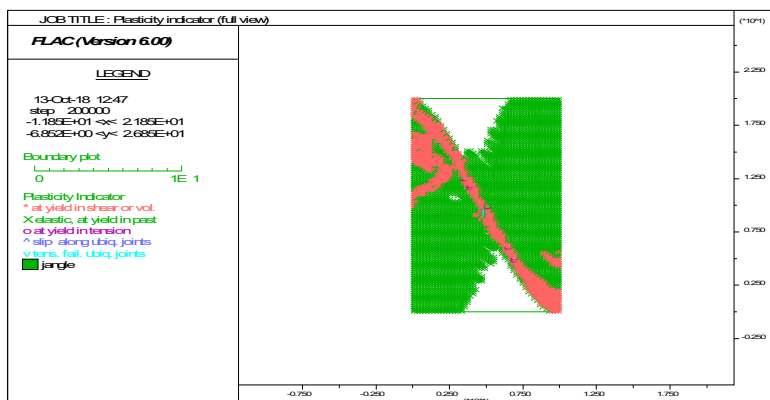
4.6.9 Γωνία κλίσης 80°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται αρχικά ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή και στη συνέχεια παρατηρείται απότομη μείωση της αντοχής που ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Η μορφή του διαγράμματος μπορεί να αποδοθεί τόσο σε ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν την ασυνέχεια όσο και σε διαρροή του άρρηκτου πετρώματος.



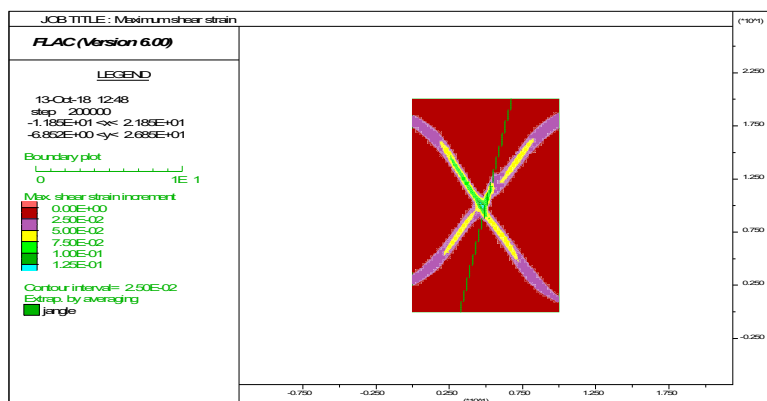
Σχήμα 202 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή του άρρηκτου πετρώματος σε ζώνες παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας, αλλά και μακριά από αυτό. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη γεωμετρία του δοκιμίου καθώς μετά από την αρχική ολίσθηση στην περιοχή της ασυνέχειας ο παρεμποδισμός της ολίσθησης από της συνοριακές συνθήκες οδηγεί στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.



Σχήμα 203 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται κεκλιμένα μέτωπα διαρροής μακριά από την ασυνέχεια, που οφείλονται στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.

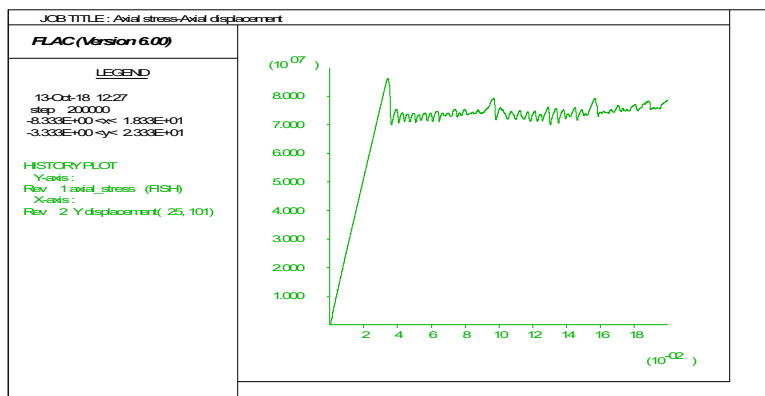


Σχήμα 204 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.6.10 Γωνία κλίσης 90°

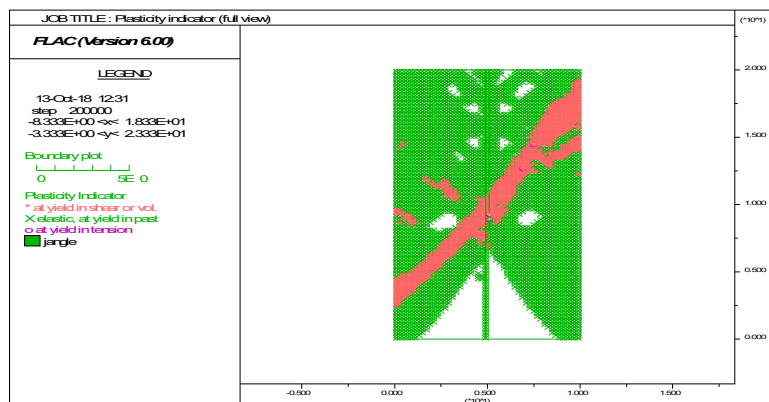
Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής βράχυνσης προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται μια

μείωση της φέρουσας ικανότητας η οποία ακολουθείται από φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή.



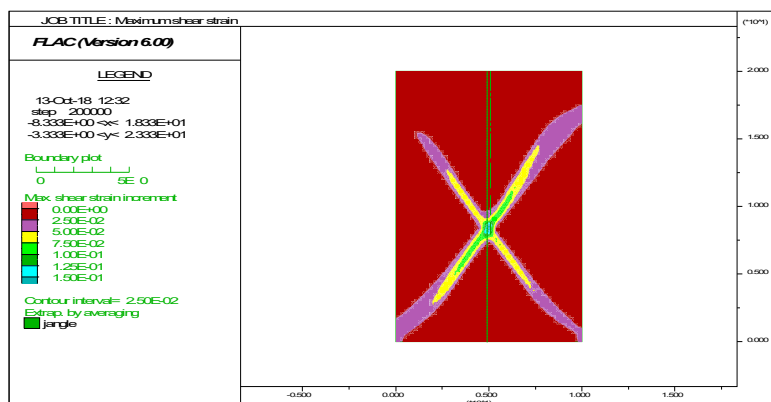
Σχήμα 205 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται με διαρροή στις ζώνες άρρηκτου πετρώματος. Οι ζώνες που προσομοιώνουν την ασυνέχεια δεν εμπλέκονται στην αστοχία, παρά μόνο στην περιοχή που το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας συναντάει το μέτωπο διαρροής στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, όπως αυτό προκύπτει από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής.



Σχήμα 206 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

Από την εικόνα της μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρείται να σχηματίζονται συζυγή κεκλιμένα μέτωπα διαρροής σε γωνία περίπου 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC ($45+\phi/2$).



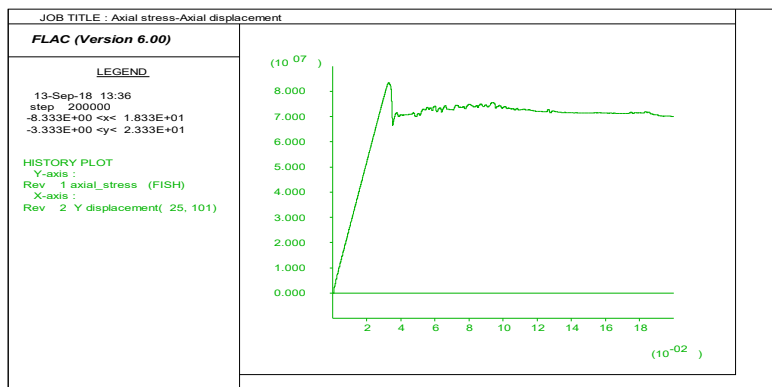
Σχήμα 207 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.7 Σειρά 1joint-distance 0.2 – ίδιες ιδιότητες

Σε αυτή τη σειρά μοντέλων δίνουμε ιδιότητες UJ στις ζώνες του μοντέλου που το κεντροειδές τους απέχει απόσταση 0,2m από το επίπεδο της ασυνέχειας. Στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ οι ιδιότητες αντοχής του άρρηκτου πετρώματος των ζωνών τίθενται ίσες με εκείνες της ασυνέχειας, δηλαδή $c=0^\circ, \phi=30^\circ, \delta=0^\circ, \sigma_f=0$. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει διαφορά στην υπολογιζόμενη αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου σε σχέση με την αναλυτική λύση για ένα επίπεδο ασυνέχειας. Επιπλέον στις γωνίες για τις οποίες η αναλυτική λύση προβλέπει αστοχία του άρρηκτου πετρώματος και όχι της ασυνέχειας η αριθμητικά υπολογιζόμενη αντοχή είναι μικρότερη από εκείνη της αναλυτικής λύσης.

Στη συνέχεια εξετάζονται αναλυτικά μόνο ορισμένα από τα μοντέλα καθώς από τα αποτελέσματα προέκυψε παρόμοια συμπεριφορά με τα μοντέλα της προηγούμενης σειράς.

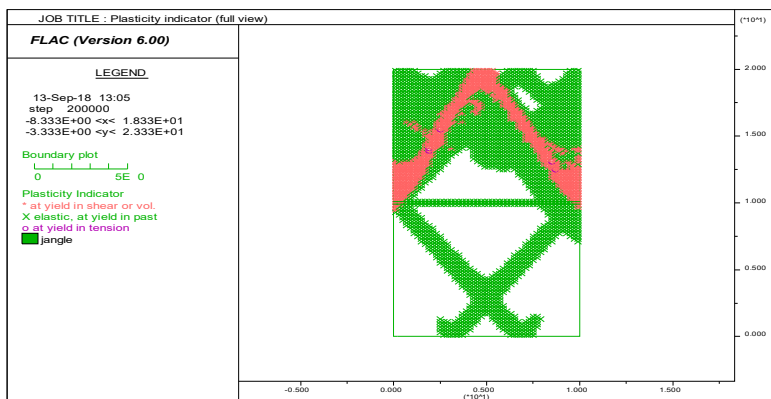
4.7.1 Γωνία κλίσης 0°



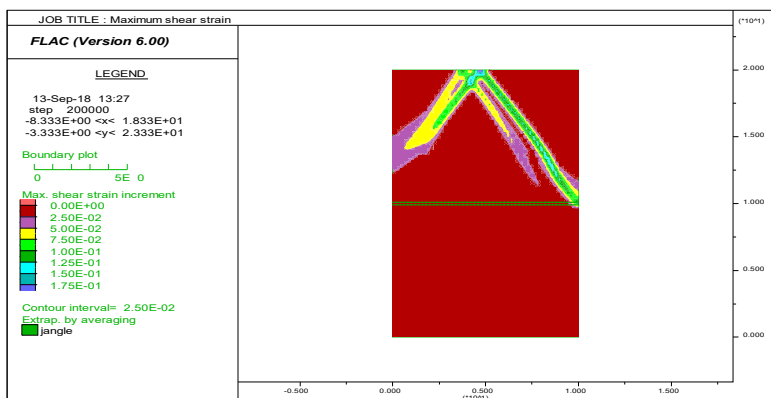
Σχήμα 208 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής προκύπτει ότι το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι την κορυφαία αντοχή. Στη συνέχεια η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται απότομα (ψαθυρή συμπεριφορά). Έπειτα παρατηρείται μια φάση διαρροής, όπου και το δοκίμιο φτάνει στην παραμένουσα αντοχή. Οι αυξομειώσεις της αξονικής τάσης κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής δείχνουν συμπεριφορά ‘stick-slip’.

Γενικά, παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στα μοντέλα με μικρές γωνίες κλίσεις της ασυνέχειας. Μετά την κορυφαία αντοχή παρουσιάζονται αυξομειώσεις της αξονικής τάσης με την αύξηση της βράχυνσης, που αντιστοιχούν σε διάφορα στάδια αστοχίας του μοντέλου. Η συμπεριφορά δίνει τη εικόνα αστοχίας μορφής “stick-slip”. Αυτό παρατηρείται για τα μοντέλα με ασυνέχεια κλίσης 0°, 10°, 20°, 30°. Η κορυφαία αντοχή είναι αντιστοίχως : 83.44 MPa, 83.04 MPa, 81.8 MPa, 80.86 MPa.

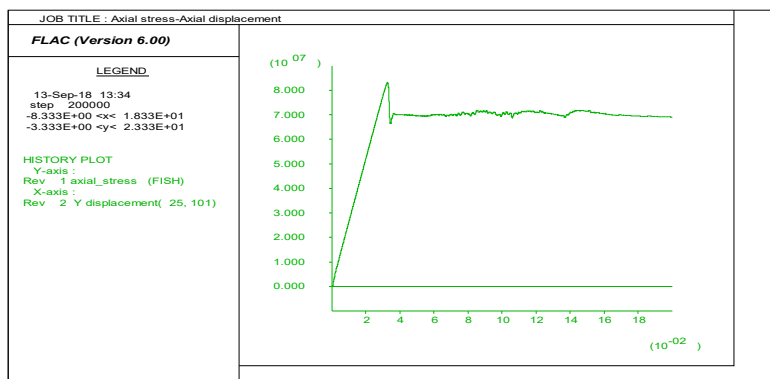


Σχήμα 209 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 210 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

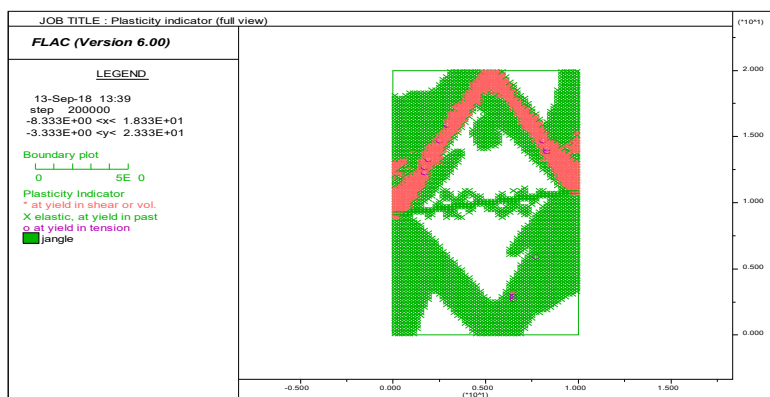
4.7.2 Γωνία 10°



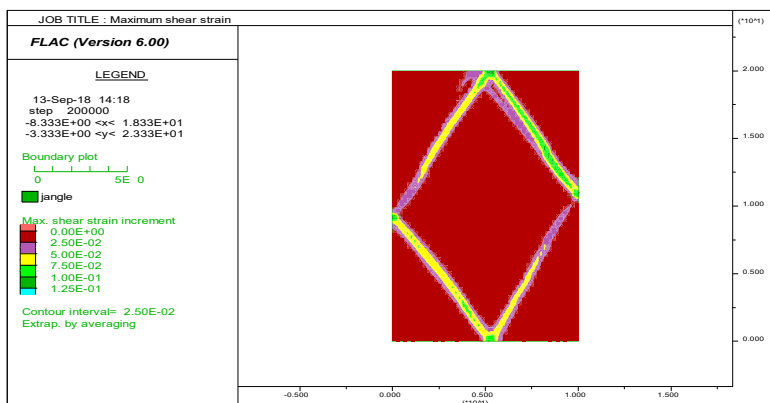
Σχήμα 211 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

Από την εικόνα της κατάστασης πλαστικοποίησης διακρίνουμε:

- δημιουργία διατμητικών ζωνών στο άρρηκτο πέτρωμα.
- στην περιοχή του μετώπου της διαρροής (yield front) παρατηρείται και η μέγιστη διατμητική τροπή.
- από την εικόνα των μετατοπίσεων διακρίνονται τμήματα του δοκιμίου τα οποία κινούνται προς τα έξω ολισθαίνοντας σε ένα πυρήνα μορφής ρόμβου που μένει άθικτος.
- Οι ζώνες που έχουν καταστατικό μοντέλο UJ επίσης έχουν διαρρεύσει, όμως το μέτωπο της διαρροής εντοπίζεται μακριά απ'αυτές. Η διαρροή αυτών των ζωνών αποδίδεται στις μειωμένες τιμές των παραμέτρων αντοχής τους.

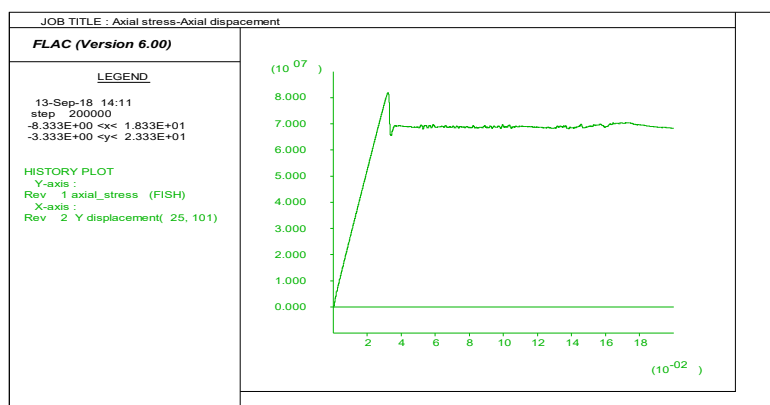


Σχήμα 212 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

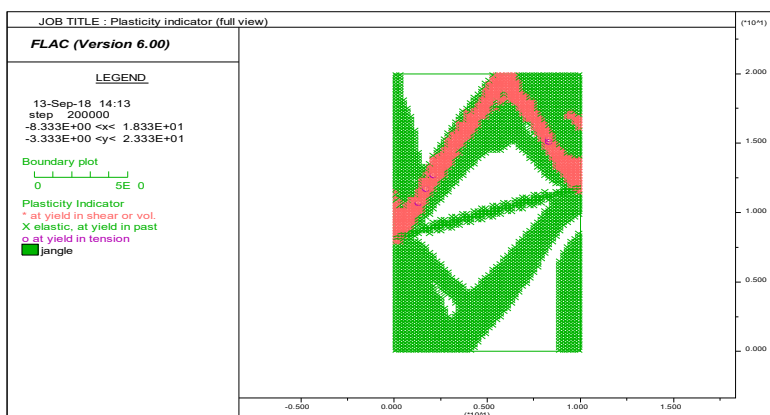


Σχήμα 213 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

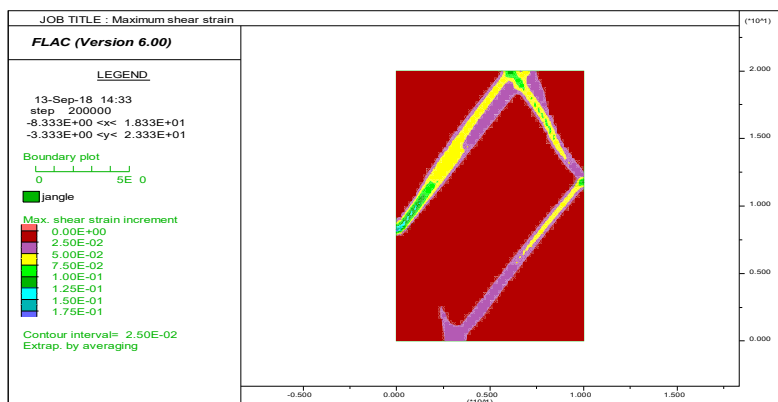
4.7.3 Γωνία κλίσης 20°



Σχήμα 214 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (τον οριζόντιο άξονα).

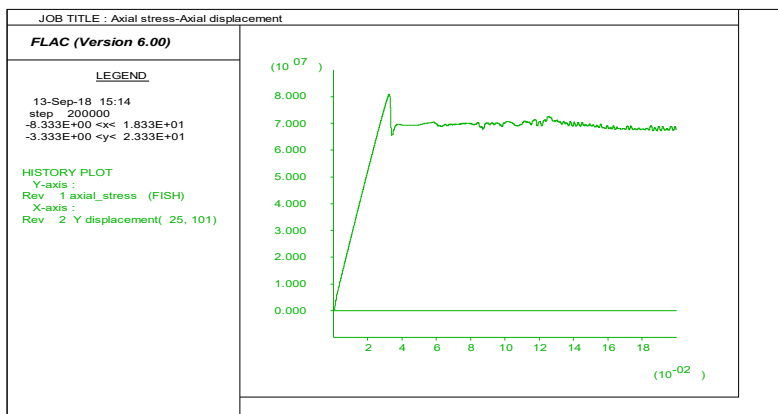


Σχήμα 215 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

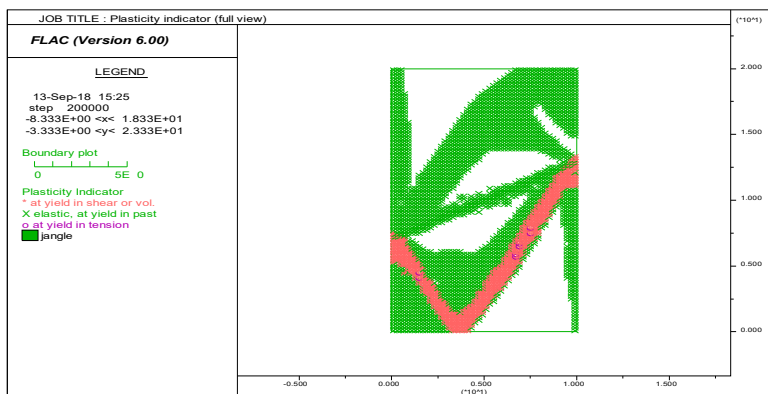


Σχήμα 216 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

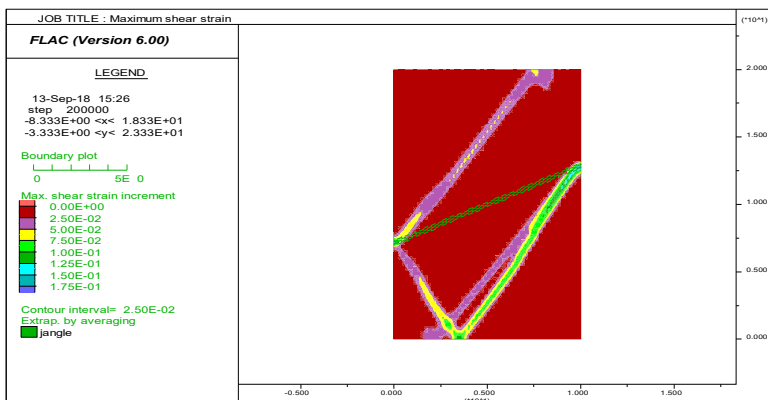
4.7.4 Γωνία κλίσης 30°



Σχήμα 217 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

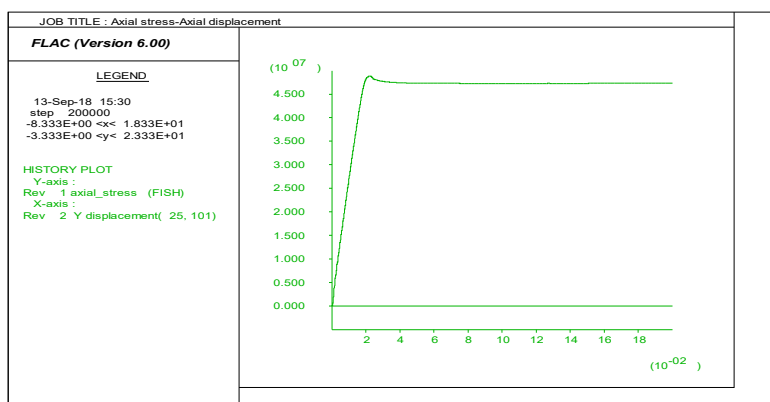


Σχήμα 218 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

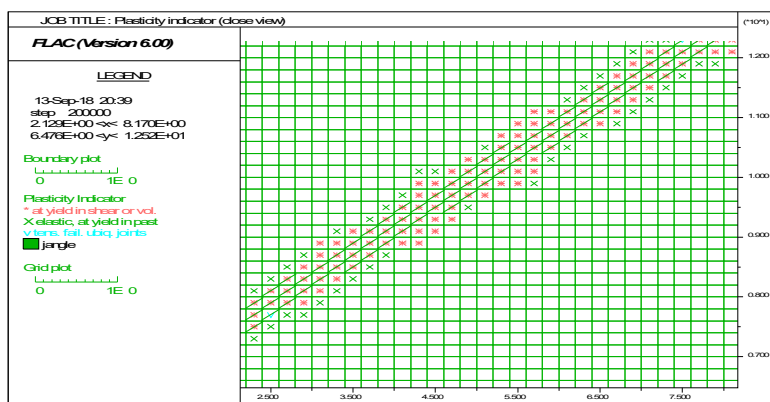


Σχήμα 219 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (*yield front*) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

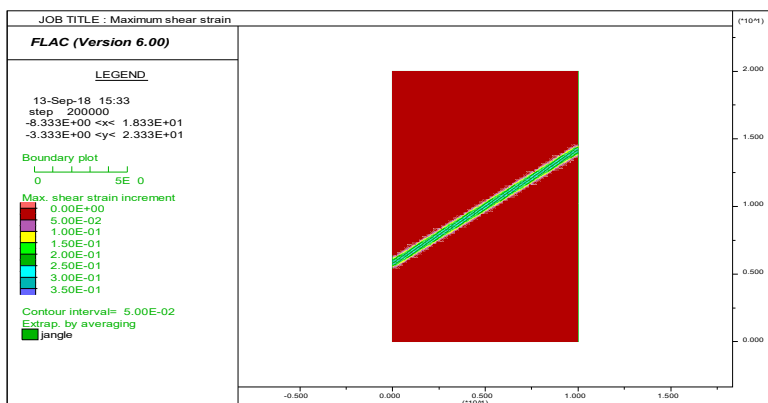
4.7.5 Γωνία κλίσης 40°



Σχήμα 220 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).



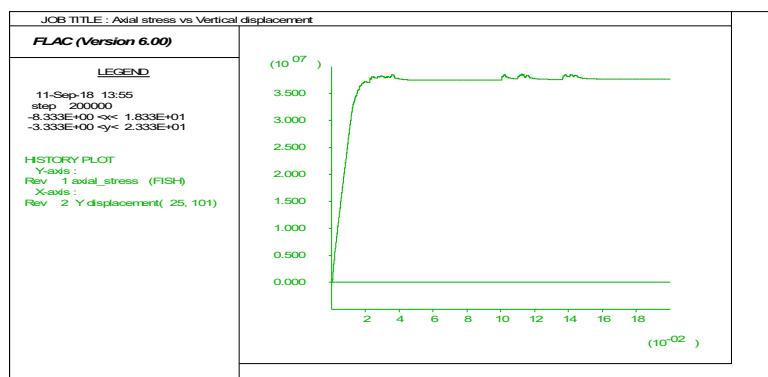
Σχήμα 221 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 222 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

4.7.6 Γωνία κλίσης 50°

Από το διάγραμμα αξονικής τάσης – βράχυνσης του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της αριθμητικής δοκιμής, παρατηρείται μία αρχική φάση διαρροής πριν την επίτευξη της κορυφαίας αντοχής. Μετά την κορυφαία αντοχή παρουσιάζει αυξομειώσεις της αξονικής τάσης με την αύξηση της βράχυνσης, που αντιστοιχούν σε διάφορα στάδια αστοχίας του μοντέλου. Η συμπεριφορά δίνει τη εικόνα αστοχίας μορφής “stick-slip”.

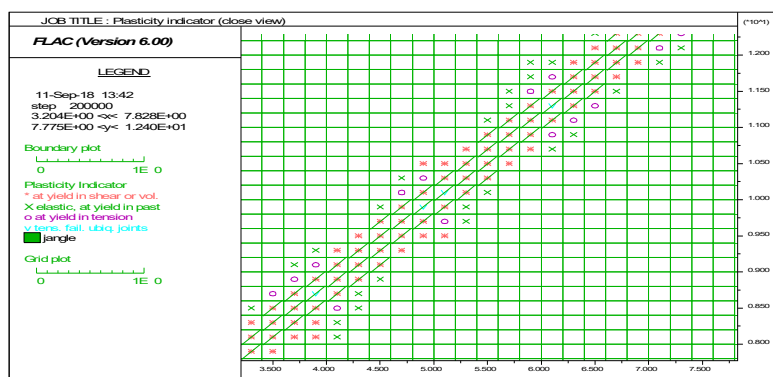


Σχήμα 223 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

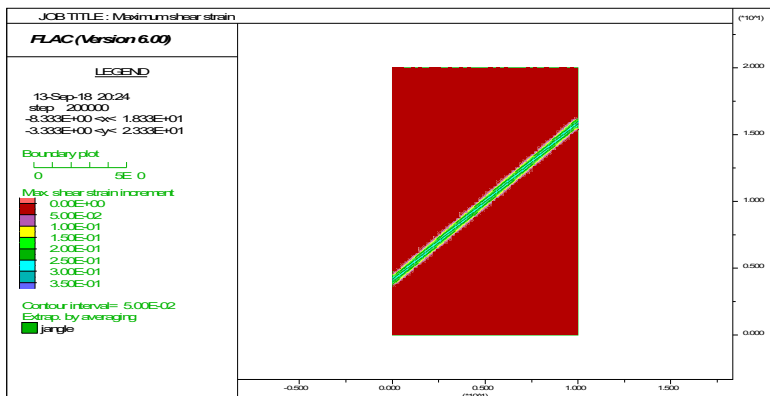
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου (plasticity indicator) προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη

παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση ενώ ορισμένες και σε εφελκυσμό. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με κατασκευαστικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατεμνόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια. Κατά την υπό κλίση διάδοση παρασέρνει γειτονικές ζώνες οι οποίες αστοχούν σε εφελκυσμό.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος σε αυτή τη διαδικασία αστοχίας οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά.

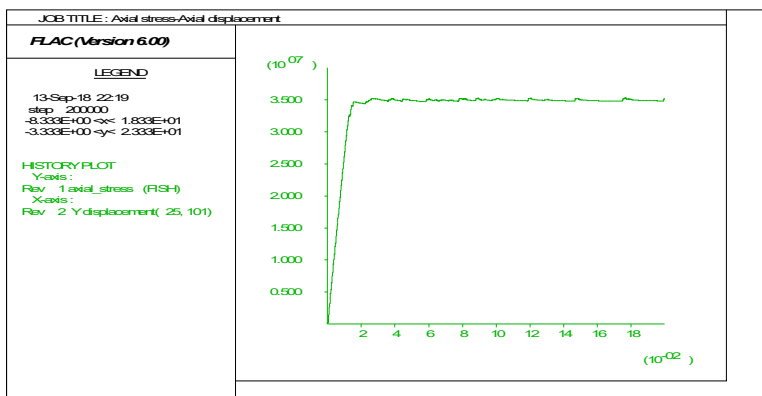


Σχήμα 224 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών *ubiquitous joint* στις ζώνες του μοντέλου.

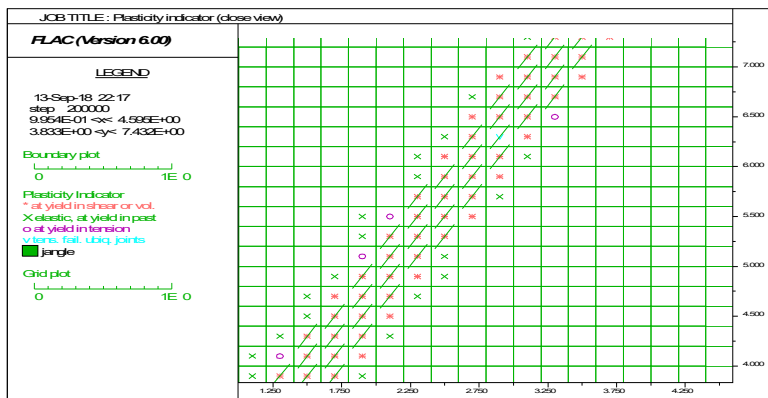


Σχήμα 225 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

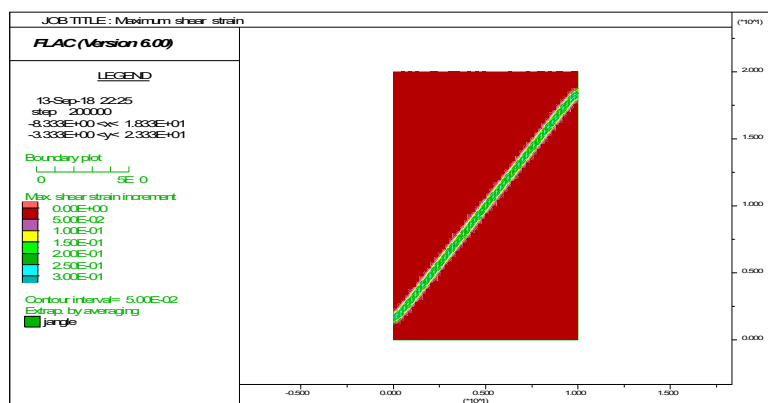
4.7.7 Γωνία κλίσης 60°



Σχήμα 226 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

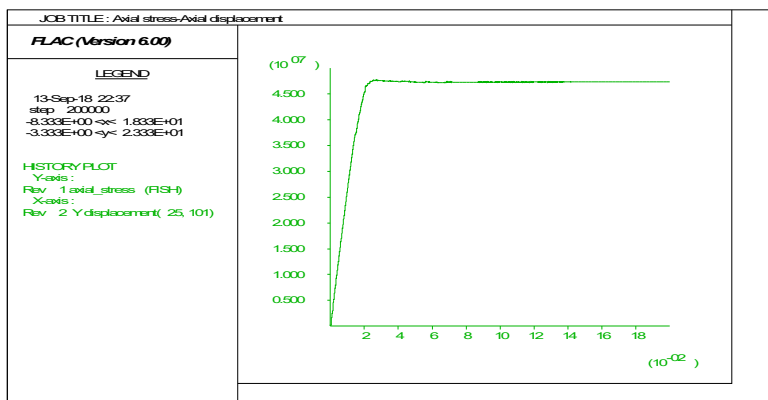


Σχήμα 227 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

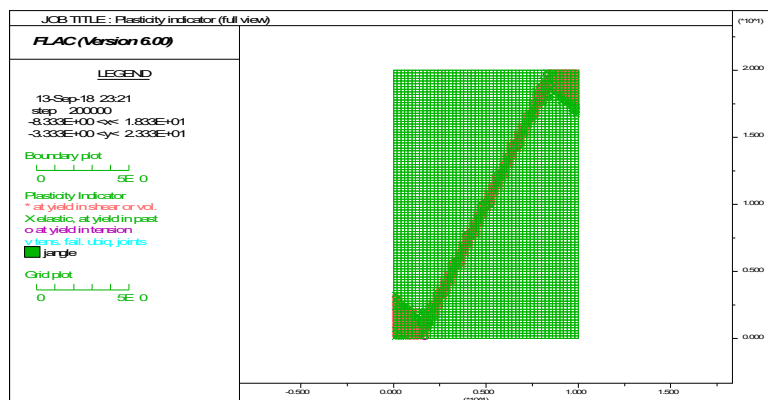


Σχήμα 228 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

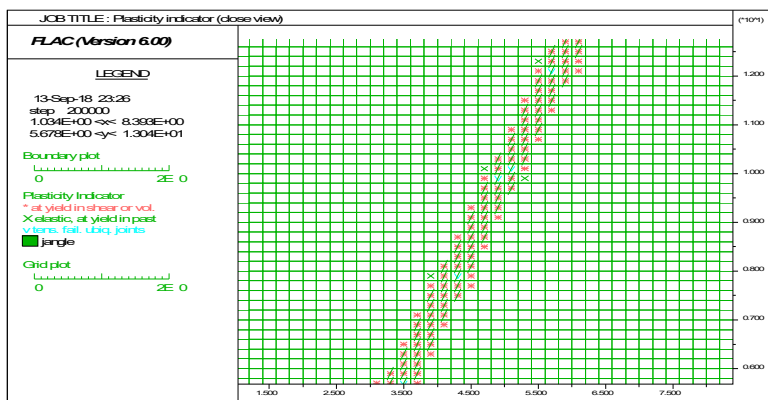
4.7.8 Γωνία κλίσης 70°



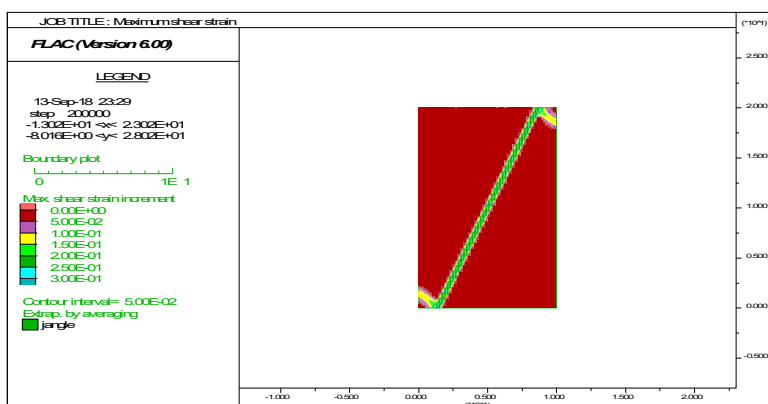
Σχήμα 229 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).



Σχήμα 230 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

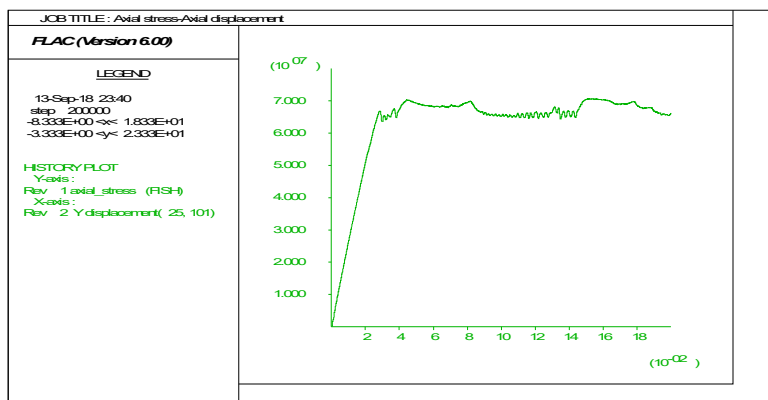


Σχήμα 231 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.

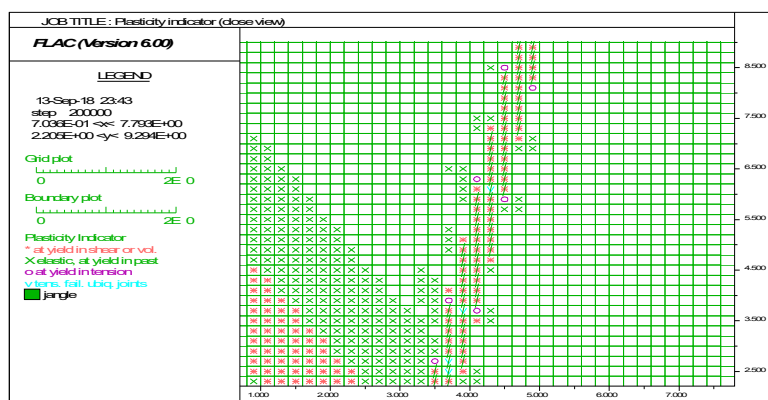


Σχήμα 232 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

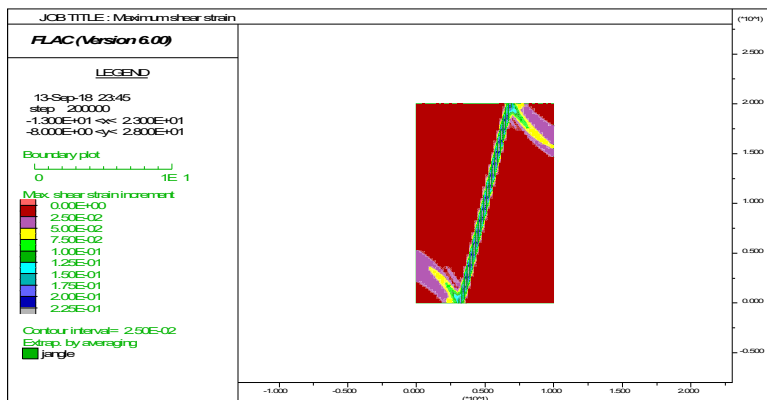
4.7.9 Γωνία κλίσης 80°



Σχήμα 233 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσεως της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).

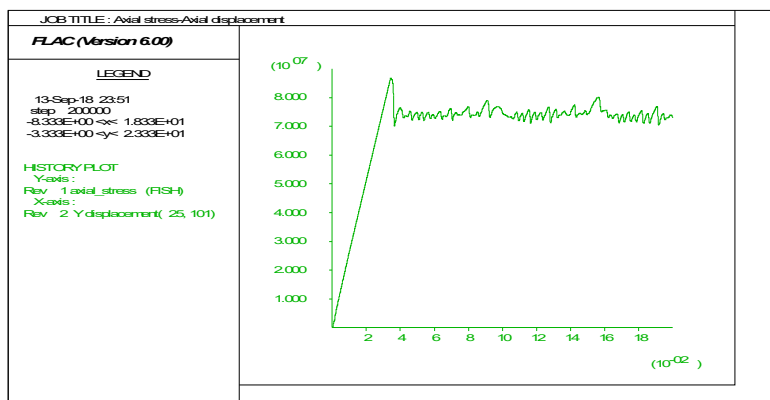


Σχήμα 234 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 235 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

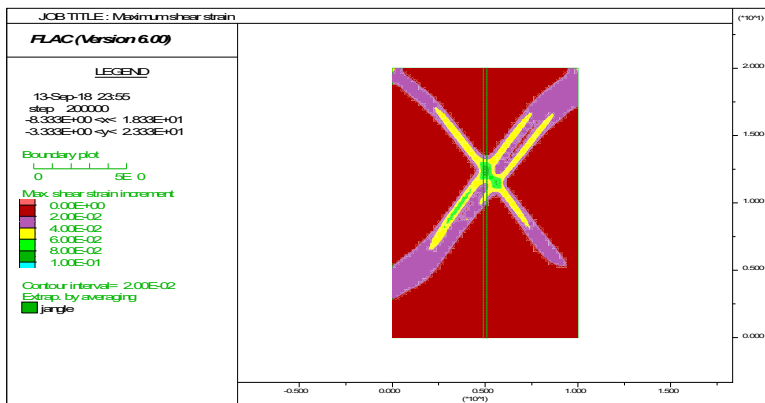
4.7.10 Γωνία κλίσης 90°



Σχήμα 236 Διάγραμμα αξονικής τάσης (στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει της βράχυνσης (στον οριζόντιο άξονα).



Σχήμα 237 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου.



Σχήμα 238 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

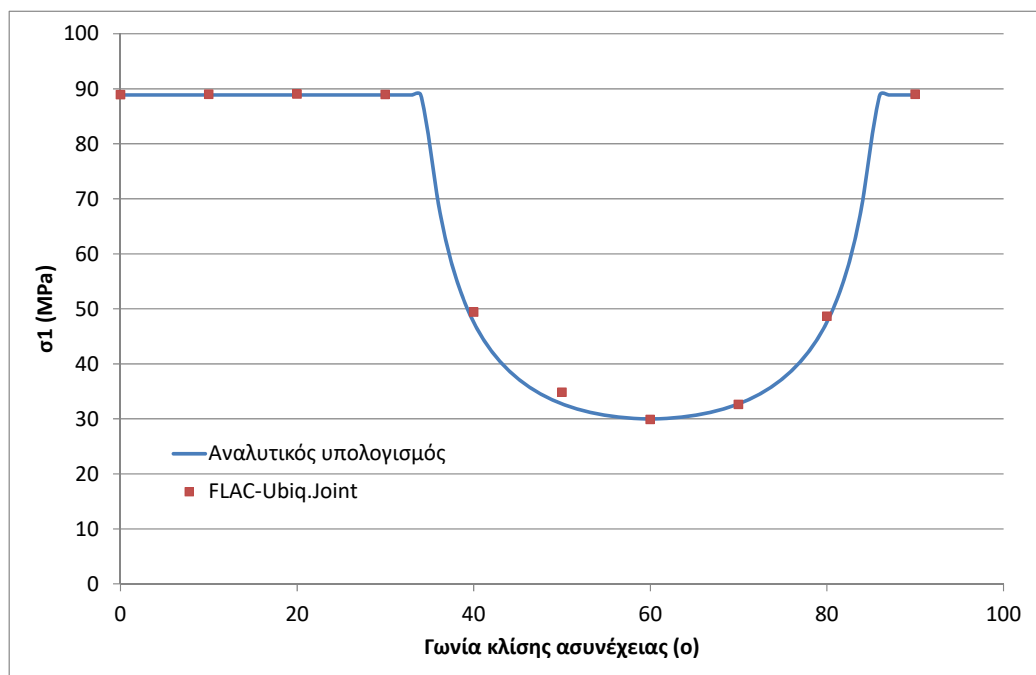
4.8 Συμπεράσματα αριθμητικών προσομοιώσεων

Στις προηγούμενες σειρές αριθμητικών μοντέλων μελετήθηκε ένα θεωρητικό δοκίμιο βραχομάζας διαστάσεων 10x20m, δίνοντας συγκεκριμένες ιδιότητες στο άρρηκτο πέτρωμα και προσομοιώνοντας τα επίπεδα των ασυνεχειών με το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint, με διάφορους συνδυασμούς. Στη συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά του μοντέλου και συγκεκριμένα οι μετακινήσεις, το όριο διαρροής, η αντοχή κλπ. Από την προσομοίωση προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Οι δύο πρώτες σειρές αφορούσαν επίλυση με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb, χωρίς (1^η σειρά) και με πλευρική πίεση (2^η σειρά). Από τη σύγκριση της αντοχής του αριθμητικού δοκιμίου με τη θεωρητική αντοχή ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία του κώδικα, η οποία και επιβεβαιώθηκε.

Από την 3^η σειρά (UJ1-με πλευρική πίεση), παρατηρήθηκε ότι για γωνίες κλίσεις των ασυνεχειών 0°, 10°, 20°, 30°, 70°, 80° και 90° γραμμική αύξηση της τάσης καθώς αυξάνεται η βράχυνση του δοκιμίου. Επιπλέον, για γωνίες κλίσης ασυνεχειών 40° και 50° παρατηρήθηκαν αυξομειώσεις της φέρουσας ικανότητας που παραπέμπουν σε συμπεριφορά “stick-slip”. Για γωνίες 0° – 30° και 90° η αστοχία εμφανίζεται με διαρροή άρρηκτου πετρώματος, ενώ για γωνίες 40° και 50° παρατηρήθηκε διαρροή τόσο των ασυνεχειών, καθώς η κλίση είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής των ασυνεχειών, όσο και άρρηκτου που δεν ήταν αναμενόμενη με βάση την επικρατούσα αντίληψη. Συνεπώς, συνάγεται το συμπέρασμα ότι, με τη χρήση του μοντέλου UJ εμφανίζεται μία μεταβατική ζώνη, στην οποία συμμετέχει και το άρρηκτο πέτρωμα στην αντοχή της βραχομάζας. Όμως για γωνίες κλίσης 60° ως 80° παρατηρήθηκε μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, που συμφωνεί με τη θεωρία.

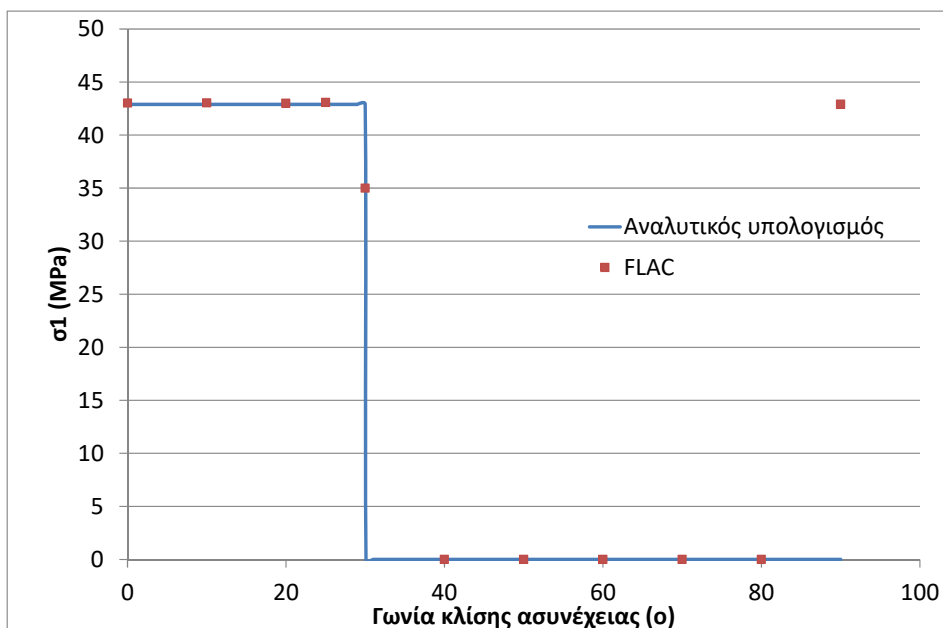
Αναφορικά με την αντοχή των αριθμητικών δοκιμίων, στο **Σχήμα 239** παρουσιάζεται η σύγκριση της αριθμητικά υπολογιζόμενης αντοχής με τον κώδικα FLAC και του αναλυτικού υπολογισμού του **Κεφ. 3**. Από το διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται μία πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύσης.



Σχήμα 239 Σύγκριση αποτελεσμάτων 3^{ης} σειράς αριθμητικών μοντέλων με τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας (βλ. Κεφ. 3).

Από την 4^η σειρά (UJ1-χωρίς πλευρική πίεση), παρατηρήθηκαν παρόμοιοι μηχανισμοί με την 3^η σειρά, με τη διαφορά ότι η απουσία πλευρικής πίεσης επέτρεπε επιπλέον το άνοιγμα κάθετα προς τις ασυνέχειες, όπου η γεωμετρία το επέτρεπε. Συγκεκριμένα, για γωνίες 0 – 20, 90° παρατηρείται αστοχία με διαρροή άρρηκτου πετρώματος. Για γωνία 30° , παρατηρείται τόσο ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς η κλίση είναι ίση με τη γωνία τριβής, όσο και διαρροή του άρρηκτου. Συνεπώς, συνάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει μία μεταβατική ζώνη στις 30° , στην οποία συμμετέχει και το άρρηκτο πέτρωμα στην αντοχή της βραχομάζας. Για γωνίες 40° – 80° παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, που συμφωνεί με τη θεωρία.

Η σύγκριση μεταξύ της αντοχής που υπολογίζεται αναλυτικά και αριθμητικά έδειξε επίσης πολύ καλή συσχέτιση **Σχήμα 240**.



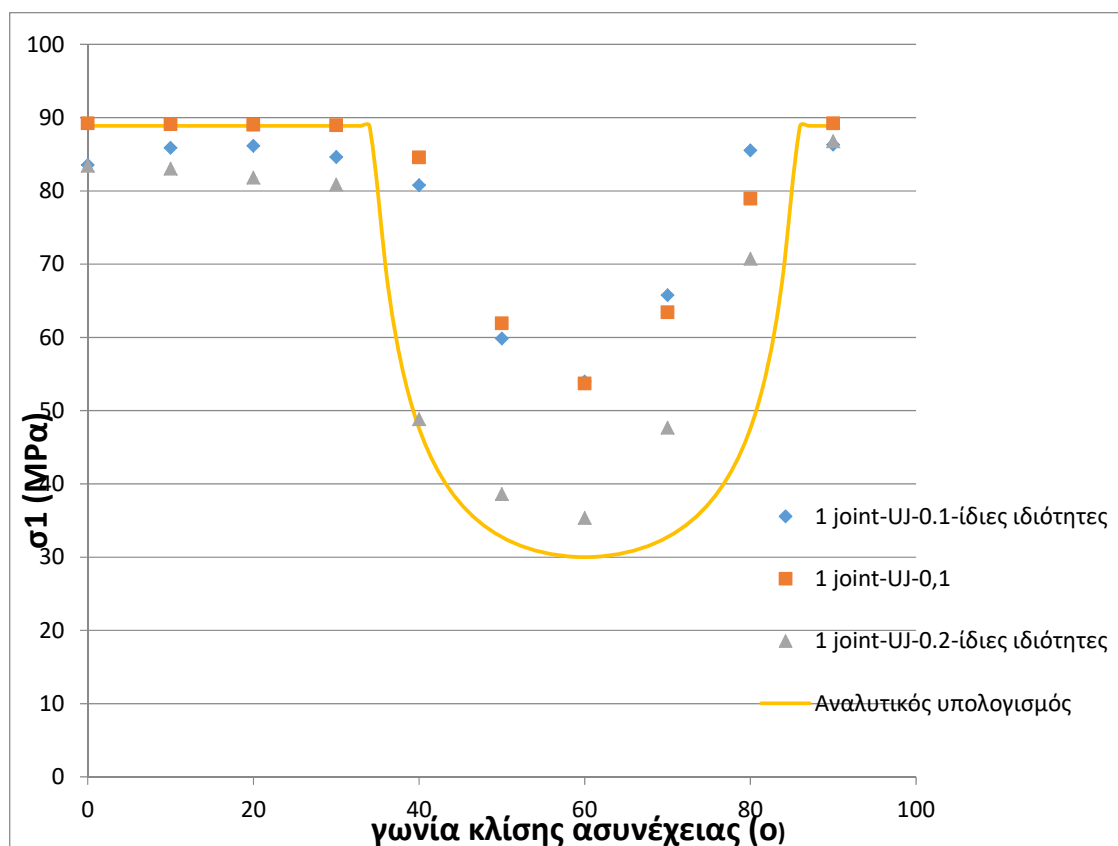
Σχήμα 240 Σύγκριση αποτελεσμάτων 4^{ης} σειράς αριθμητικών μοντέλων με τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας (βλ. Κεφ. 3).

Στην 5^η σειρά αριθμητικών μοντέλων (1joint-distance 0.1), έγινε προσπάθεια προσομοίωσης μίας διακριτής ασυνέχειας από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας. Στα μοντέλα αυτά, για γωνίες κλίσης έως και 40° παρατηρήθηκε αστοχία με διαρροή του άρρηκτου πετρώματος, ενώ η παρουσία της ασυνέχειας είχε επίδραση στις περιοχές όπου συνέβαινε η αστοχία του άρρηκτου πετρώματος. Για μεγαλύτερες γωνίες κλίσεις, από 50° έως 80°, προέκυψε ότι η αστοχία εκδηλώνεται σε διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατενόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια. Κατά την υπό κλίση διάδοση παρασέρνει γειτονικές ζώνες οι οποίες αστοχούν σε εφελκυσμό. Για γωνία κλίσης 90° αστοχεί πάλι μόνο το άρρηκτο πέτρωμα.

Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος στη διαδικασία αστοχίας σε γωνίες που θεωρητικά ολισθαίνει η ασυνέχεια οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά για αυτές τις γωνίες.

Στην 6^η σειρά αριθμητικών μοντέλων (1joint-distance 0.2), προέκυψαν παρόμοια συμπεράσματα με την 5^η σειρά.

Στην 7^η και 8^η σειρά επιχειρήθηκε να βελτιωθεί η αριθμητική επίλυση δίδοντας στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος ίδιες με τις παραμέτρους αντοχής της ασυνέχειας. Και στις αυτές σειρές, οι μηχανισμοί αστοχίας είναι παρόμοιοι με τις σειρές 5 και 6. Τα αριθμητικά αποτελέσματα για την αντοχή είναι πιο κοντά στη θεωρητική λύση, όμως για γωνίες μικρές κλίσης της ασυνέχειας η αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου προκύπτει μειωμένη σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος καθώς έχουμε παρεμβάλλει μία ζώνη με ασθενές υλικό στο μοντέλο.



Σχήμα 241 Σύγκριση αποτελεσμάτων 5^{ης}, 7^{ης}, 8^{ης} σειράς αριθμητικών μοντέλων με τον αναλυτικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας (βλ. Κεφ. 3).

5 Εφαρμογή στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός βραχώδους πρανούς

5.1 Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων

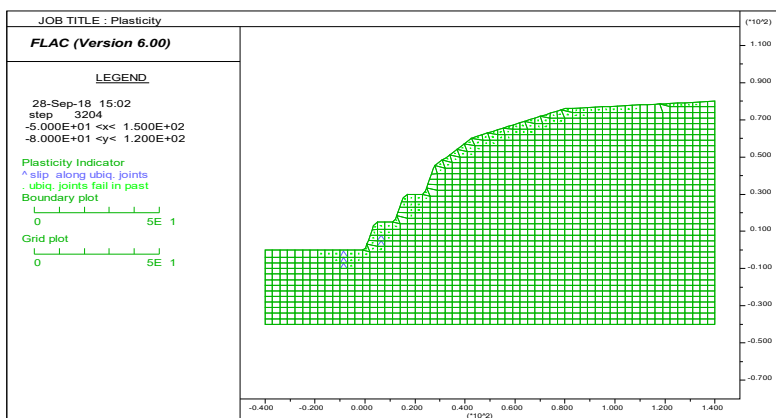
Συνήθως, για την αξιολόγηση της ευστάθειας βραχωδών πρανών σε ισότροπες βραχώμαζες χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες μέθοδοι οριακής ισορροπίας, όταν δεν υπάρχουν σαφώς καθορισμένα δομικά χαρακτηριστικά (επίπεδα αδυναμίας), που να αποτελούν επίπεδα προκαθορισμένης αστοχίας της βραχώμαζας. Όμως, σε ανισότροπες βραχώμαζες, η κλίση των ασυνεχειών σε συνδυασμό με την κλίση του πρανού μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του πρανού με ολίσθηση επάνω στα επίπεδα των ασυνεχειών. Στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται η προσομοίωση της επίδρασης της ανισοτροπίας της βραχώμαζας στην ευστάθεια πρανούς με παρουσία επιπέδων αδυναμίας μεγάλης εμμονής. Για την προσομοίωση των ασυνεχειών χρησιμοποιείται το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint, δίδοντας διάφορες κλίσεις στις ασυνέχειες.

Το πρανές που εξετάζεται περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες ύψους 15 μέτρων. Η επιφάνεια των βαθμίδων είναι κεκλιμένη με γωνία κλίσης 75° από την οριζόντια ενώ το άνω μέρος του πρανού έχει γωνία κλίσης 45° πάνω από την κορυφή της τρίτης βαθμίδας. Το *Σχήμα 242* απεικονίζει τη γεωμετρία του πρανού.

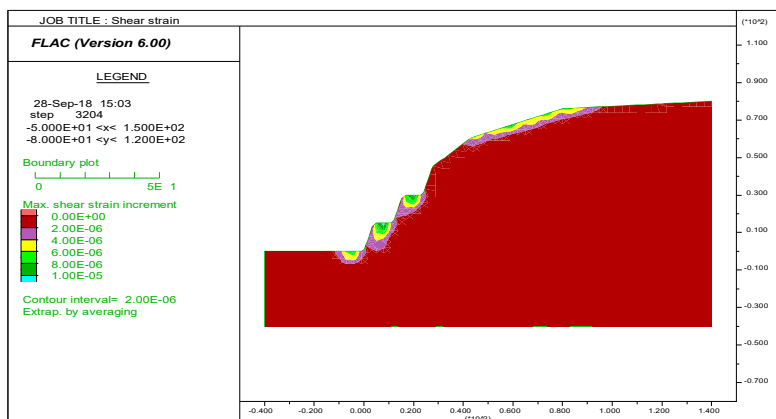
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για γωνίες κλίσης ασυνεχειών 0° , 10° , 30° , 45° ,

5.2 Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων

5.2.1 Γωνία κλίσης 0°

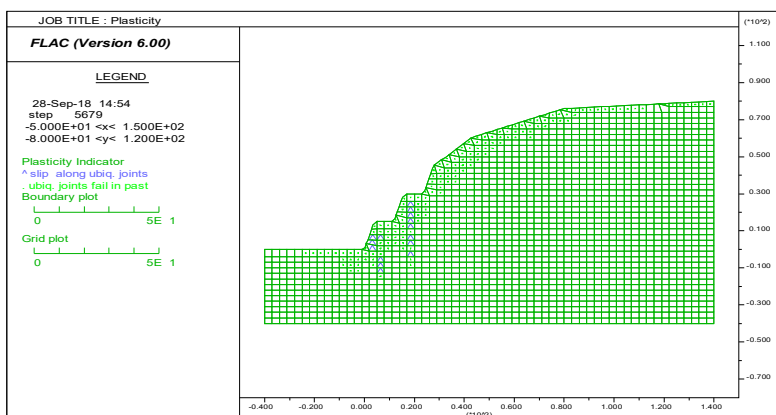


Σχήμα 242 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου.

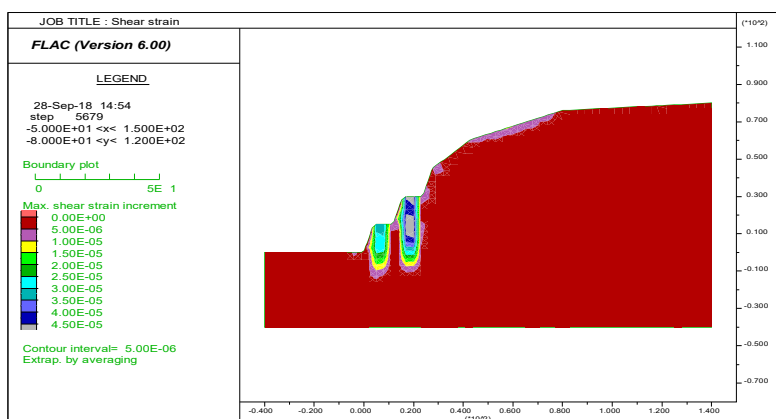


Σχήμα 243 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

5.2.2 Γωνία κλίσης 10°

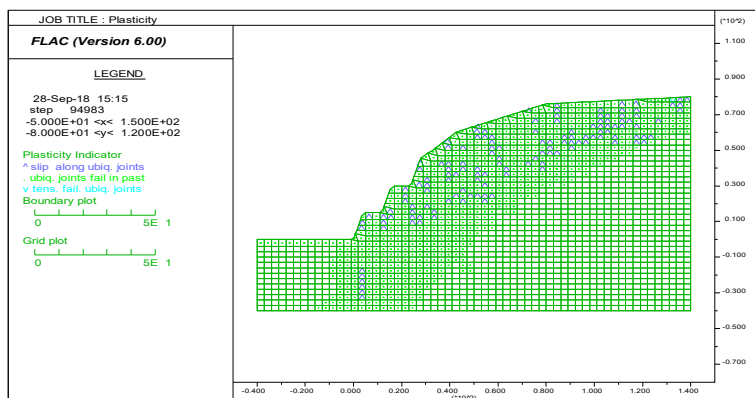


Σχήμα 244 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του πρανούς.

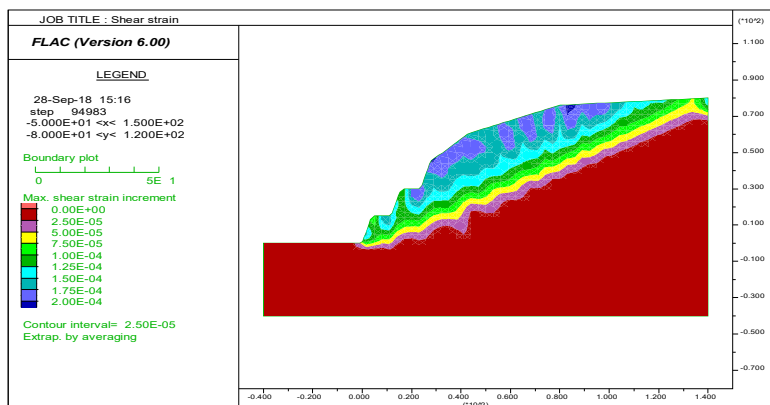


Σχήμα 245 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

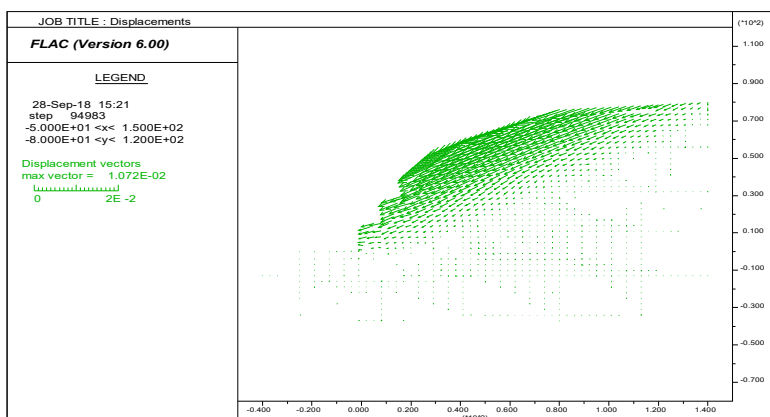
5.2.3 Γωνία κλίσης 30°



Σχήμα 246 Εικόνα της πλαστικοποίησης των ζωνών του πρανούς.

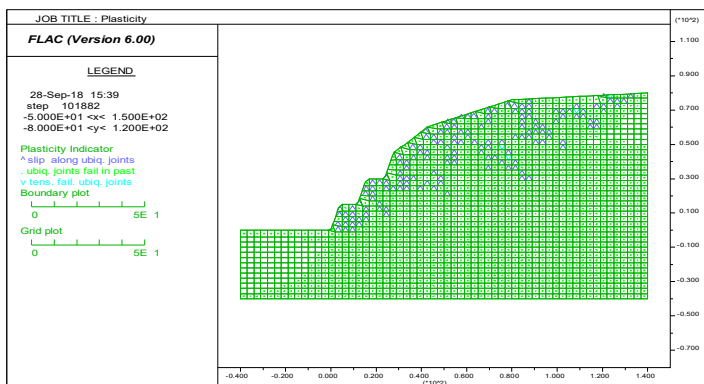


Σχήμα 247 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

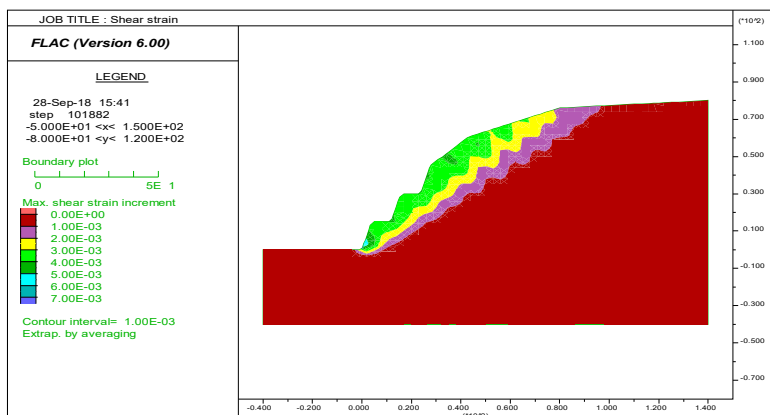


Σχήμα 248 Εικόνα μετακινήσεων.

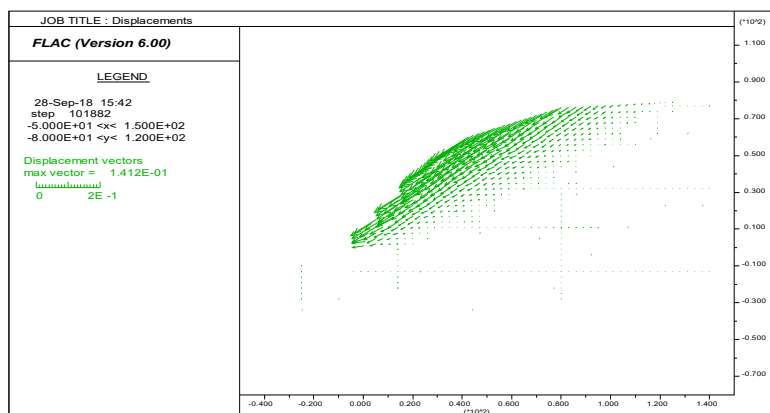
5.2.4 Γωνία κλίσης 45°



Σχήμα 249 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.

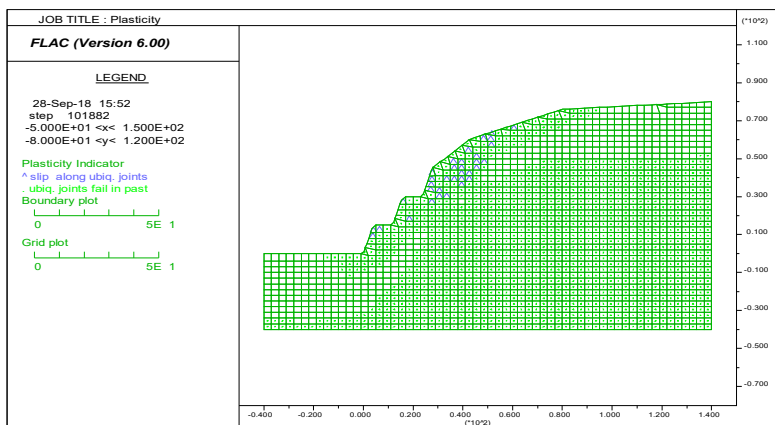


Σχήμα 250 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

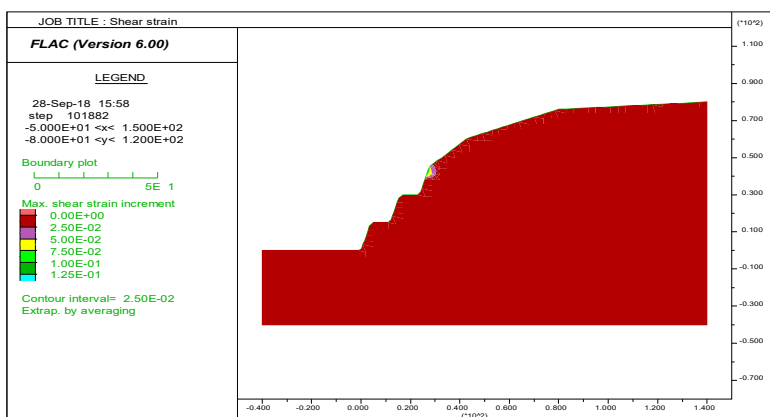


Σχήμα 251 Εικόνα μετακινήσεων

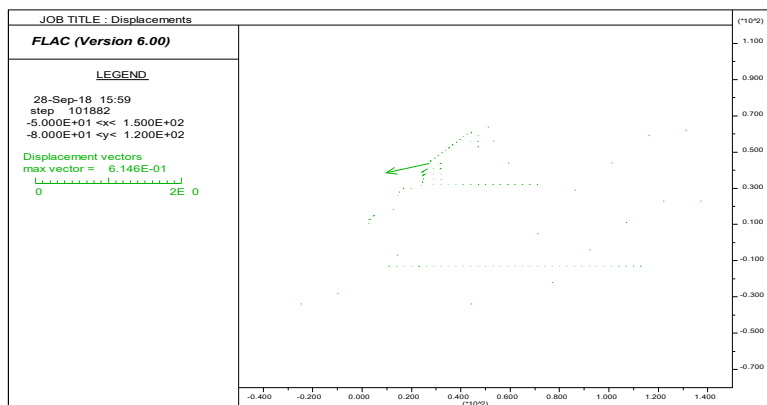
5.2.5 Γωνία κλίσης 65°



Σχήμα 252 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.

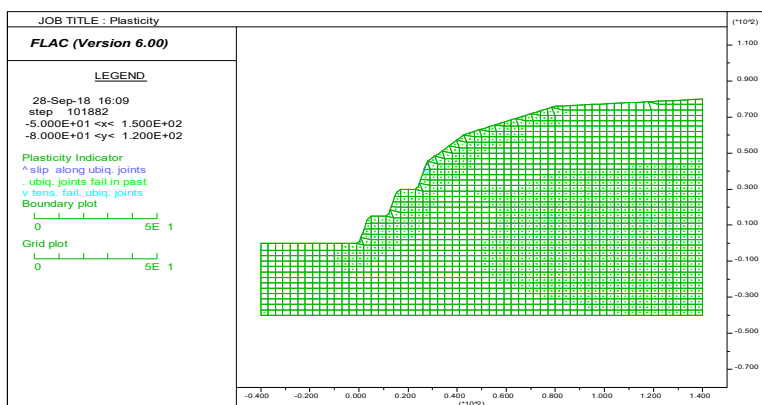


Σχήμα 253 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

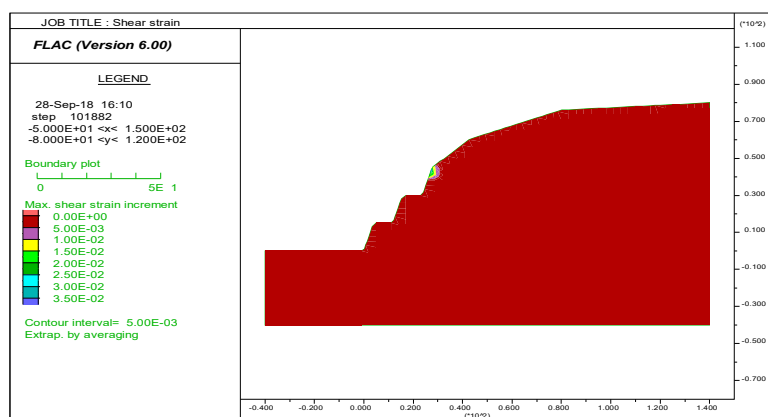


Σχήμα 254 Εικόνα μετακινήσεων

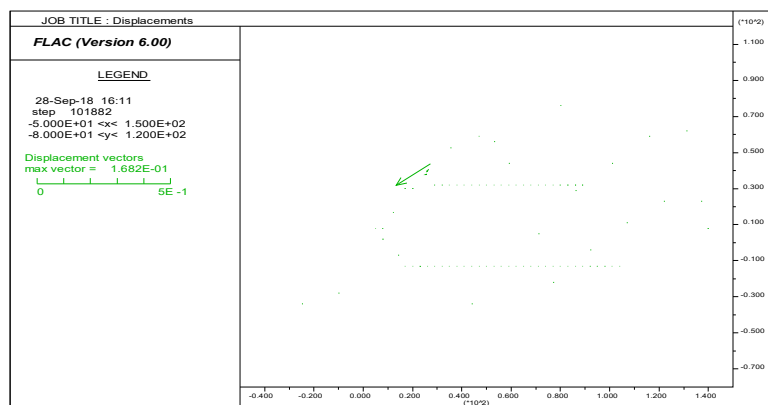
5.2.6 Γωνία κλίσης 75°



Σχήμα 255 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.

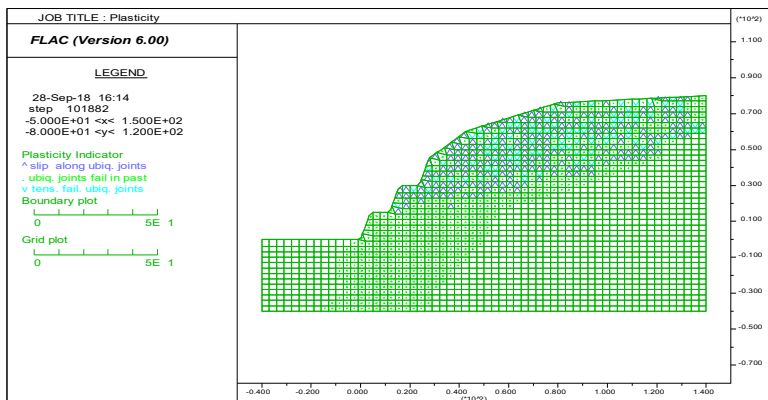


Σχήμα 256 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.

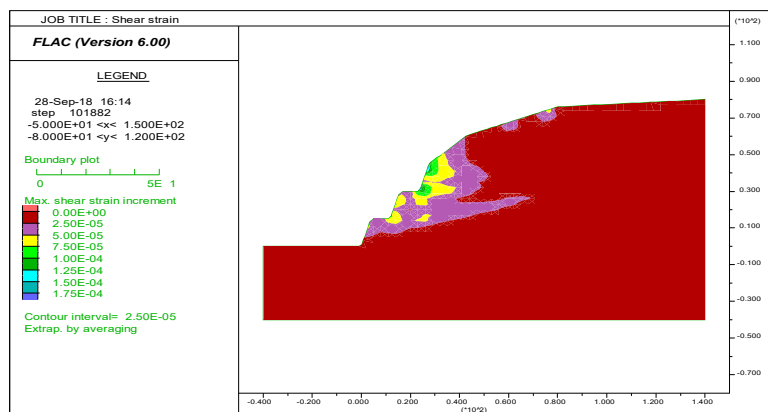


Σχήμα 257 Εικόνα μετακινήσεων

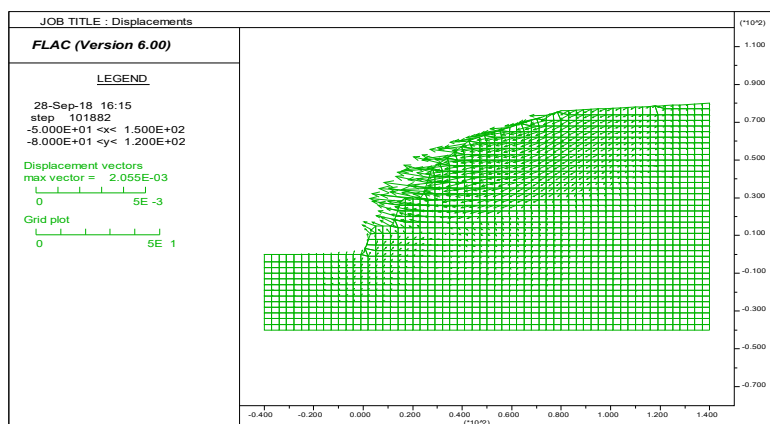
5.2.7 Γωνία κλίσης 90°



Σχήμα 258 Εικόνα πλαστικοποίησης πρανούς.



Σχήμα 259 Εικόνα της τρέχουσας αύξησης της διατμητικής τροπής, η οποία δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.



Σχήμα 260 Εικόνα μετακινήσεων

5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται ότι για μικρές γωνίες κλίσης των ασυνεχειών ($<30^\circ$) παρατηρείται περιορισμένη τοπική ολίσθηση στις ασυνέχειες κυρίως πλησίον της επιφάνειας του πρανούς, λόγω του προσανατολισμού της εφαπτομενικής τάσης παράλληλα προς την ελεύθερη επιφάνεια. Εντούτοις, τόσο η διατμητική τροπή όσο και οι πολύ μικρές μετατοπίσεις των κόμβων του μοντέλου δείχνουν ότι το πρανές είναι συνολικά ευσταθές.

Καθώς η γωνία κλίσης των ασυνεχειών αυξάνεται, και για γωνίες κλίσης 30° , 45° και 65° η έκταση της διατμητικής ολίσθησης των ασυνεχειών καταλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος του πρανούς. Ειδικότερα για γωνίες κλίσης 30° και 45° διαμορφώνεται μέτωπο διαρροής που δίνει την εικόνα μεγάλης κλίμακας ολίσθησης σε γωνίες κλίσης ίδιες με τις γωνίες κλίσεις των ασυνεχειών. Σε αυτές τις γωνίες το πρανές είναι μάλλον ασταθές καθώς και οι τιμές των μετατοπίσεων είναι αυξημένες (14 cm για κλίση 45°). Η κατάσταση σε γωνία κλίσης ασυνεχειών 30° δείχνει ως μία οριακή κατάσταση ισορροπίας, καθώς η γωνία κλίσης ισούται με τη γωνία τριβής των ασυνεχειών.

Για γωνίες κλίσης 65° (που πλησιάζει τη γωνία κλίσης των βαθμίδων) και 75° (που είναι μεγαλύτερη από τη γωνία κλίσης των βαθμίδων) παρατηρείται μεν εκτεταμένη ολίσθηση των ασυνεχειών, όμως δεν δημιουργείται μέτωπο διαρροής που να δείχνει κάποια συστηματική αστοχία. Κανονικά για γωνία κλίσης 75° θα περιμέναμε ο μηχανισμός να πλησιάζει προς τοπική αστάθεια με ανατροπή. Αν και στη γωνία αυτή παρατηρείται τοπικά

μία υψηλή συγκέντρωση διατμητικών τροπών σε θέση όπου και η μετατόπιση είναι μεγάλη, το μοντέλο δεν είναι σε θέση να δείξει ξεκάθαρα την εικόνα της ανατροπής (τοπικά). Γενικά πάντως, το πρηνές μπορεί να θεωρηθεί ευσταθές.

Τέλος, για γωνία κλίσης ασυνεχειών 90° εμφανίζονται και εφελκυστικές αστοχίες των ασυνεχειών εκτός από τις διατμητικές. Οι εφελκυστικές αστοχίες και το διαμορφούμενο μέτωπο διαρροής σε συνδυασμό με τα διανύσματα των μετατοπίσεων συνάδουν περισσότερο με μία τάση προς ανατροπή στρώσεων, η οποία θα ήταν και ο επικρατέστερος μηχανισμός αστοχίας. Εντούτοις, και πάλι η εικόνα δεν δίνει ξεκάθαρα μηχανισμό ανατροπής.

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους. Αναλυτικά η αντοχή υπολογίζεται με βάση τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας.

Για τον αριθμητικό υπολογισμό της αντοχής χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC2D. Μελετήθηκε ένα θεωρητικό δοκίμιο βραχομάζας διαστάσεων 10x20m, δίνοντας συγκεκριμένες ιδιότητες στο άρρηκτο πέτρωμα και προσομοιώνοντας τα επίπεδα των ασυνεχειών με το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint, με διάφορους συνδυασμούς. Στη συνέχεια μελετήθηκε η συμπεριφορά του μοντέλου και συγκεκριμένα οι μετακινήσεις, το όριο διαρροής, η αντοχή κλπ. Συγκεκριμένα προετοιμάστηκαν οι παρακάτω σειρές αριθμητικών μοντέλων:

- **1^η σειρά:** επίλυση με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb, χωρίς πλευρική πίεση. Προετοιμάστηκε για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του κώδικα.
- **2^η σειρά:** επίλυση με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb, με πλευρική πίεση ίση με 10 MPa. Προετοιμάστηκε για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του κώδικα.
- **3^η σειρά:** Σειρά UJ1-με πλευρική πίεση, όπου σε όλες οι ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η σειρά αυτή προετοιμάστηκε με αραιό κάρναβο για σύγκριση με τη θεωρητική λύση.
- **4^η σειρά:** Σειρά UJ1-χωρίς πλευρική πίεση, όπου σε όλες οι ζώνες καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η σειρά αυτή προετοιμάστηκε με αραιό κάρναβο για σύγκριση με τη θεωρητική λύση.
- **5^η σειρά:** Ijoint-distance 0.1, όπου σε αυτά τα μοντέλα προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας.
- **6^η σειρά:** Ijoint-distance 0.2, όπου σε αυτά τα μοντέλα προσομοιώνεται μία διακριτή ασυνέχεια που δημιουργείται από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.2 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας.
- **7^η σειρά:** Ijoint-distance 0.1-ίδιες ιδιότητες. Η σειρά αυτή είναι παρόμοια με την 5^η σειρά, με τη διαφορά ότι στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ οι παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος τίθενται ίδιες με τις παραμέτρους αντοχής της ασυνέχειας.

- **8^η σειρά:** Joint-distance 0.2-ίδιες ιδιότητες. Η σειρά αυτή είναι παρόμοια με την 6^η σειρά, με τη διαφορά ότι στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ οι παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος τίθενται ίδιες με τις παραμέτρους αντοχής της ασυνέχειας.

Από την **προσομοίωση** προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Οι **δύο πρώτες** σειρές αφορούσαν επίλυση με καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb, χωρίς (1^η σειρά) και με πλευρική πίεση (2^η σειρά). Από τη σύγκριση της αντοχής του αριθμητικού δοκιμίου με τη θεωρητική αντοχή ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία του κώδικα, η οποία και επιβεβαιώθηκε.
- Από την **3^η σειρά** (UJ1-με πλευρική πίεση), παρατηρήθηκε ότι για γωνίες κλίσεις των ασυνεχειών 0°, 10°, 20°, 30°, 70°, 80° και 90° γραμμική αύξηση της τάσης καθώς αυξάνεται η βράχυνση του δοκιμίου. Επιπλέον, για γωνίες κλίσης ασυνεχειών 40° και 50° παρατηρήθηκαν αυξομειώσεις της φέρουσας ικανότητας που παραπέμπουν σε συμπεριφορά “stick-slip”. Για γωνίες 0° – 30° και 90° η αστοχία εμφανίζεται με διαρροή άρρηκτου πετρώματος, ενώ για γωνίες 40° και 50° παρατηρήθηκε διαρροή τόσο των ασυνεχειών, καθώς η κλίση είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής των ασυνεχειών, όσο και άρρηκτου που δεν ήταν αναμενόμενη με βάση την επικρατούσα αντίληψη. Συνεπώς, συνάγεται το συμπέρασμα ότι, με τη χρήση του μοντέλου UJ εμφανίζεται μία μεταβατική ζώνη, στην οποία συμμετέχει και το άρρηκτο πέτρωμα στην αντοχή της βραχομάζας. Όμως για γωνίες κλίσης 60° ως 80° παρατηρήθηκε μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, που συμφωνεί με τη θεωρία. Αναφορικά με την αντοχή των αριθμητικών δοκιμίων παρατηρείται μία πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ αριθμητικής και αναλυτικής λύσης.
- Από την **4^η σειρά** (UJ1-χωρίς πλευρική πίεση), παρατηρήθηκαν παρόμοιοι μηχανισμοί με την 3^η σειρά, με τη διαφορά ότι η απουσία πλευρικής πίεσης επέτρεπε επιπλέον το άνοιγμα κάθετα προς τις ασυνέχειες, όπου η γεωμετρία το επέτρεπε. Συγκεκριμένα, για γωνίες 0° – 20°, 90° παρατηρείται αστοχία με διαρροή άρρηκτου πετρώματος. Για γωνία 30°, παρατηρείται τόσο ολίσθηση των ασυνεχειών, καθώς η κλίση είναι ίση με τη γωνία τριβής, όσο και διαρροή του άρρηκτου. Συνεπώς, συνάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει μία μεταβατική ζώνη στις 30°, στην οποία συμμετέχει και το άρρηκτο πέτρωμα στην αντοχή της βραχομάζας. Για γωνίες 40°

- 80° παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, που συμφωνεί με τη θεωρία. Η σύγκριση μεταξύ της αντοχής που υπολογίζεται αναλυτικά και αριθμητικά έδειξε επίσης πολύ καλή συσχέτιση.
- Στην **5^η σειρά** αριθμητικών μοντέλων (1joint-distance 0.1), έγινε προσπάθεια προσομοίωσης μίας διακριτής ασυνέχειας από τον καθορισμό καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint στις ζώνες που το κεντροειδές τους βρίσκεται σε απόσταση 0.1 m εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου επιπέδου της ασυνέχειας. Στα μοντέλα αυτά, για γωνίες κλίσης έως και 40° παρατηρήθηκε αστοχία με διαρροή του άρρηκτου πετρώματος, ενώ η παρουσία της ασυνέχειας είχε επίδραση στις περιοχές όπου συνέβαινε η αστοχία του άρρηκτου πετρώματος. Για μεγαλύτερες γωνίες κλίσεις, από 50° έως 80°, προέκυψε ότι η αστοχία εκδηλώνεται σε διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη φόρτιση που δέχονται αυτές οι ζώνες λόγω της γεωμετρίας των ζωνών με UJ, καθώς σταματάνε σε περιοχή που θεωρείται άρρηκτο πέτρωμα. Καθώς η διατεμνόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια. Κατά την υπό κλίση διάδοση παρασέρνει γειτονικές ζώνες οι οποίες αστοχούν σε εφελκυσμό. Για γωνία κλίσης 90° αστοχεί πάλι μόνο το άρρηκτο πέτρωμα. Η εμπλοκή του άρρηκτου πετρώματος στη διαδικασία αστοχίας σε γωνίες που θεωρητικά ολισθαίνει η ασυνέχεια οδηγεί σε αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά για αυτές τις γωνίες.
 - Στην **6^η σειρά** αριθμητικών μοντέλων (1joint-distance 0.2), προέκυψαν παρόμοια συμπεράσματα με την 5^η σειρά.
 - Στην **7^η και 8^η σειρά** επιχειρήθηκε να βελτιωθεί η αριθμητική επίλυση δίδοντας στις ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ παράμετροι αντοχής του άρρηκτου πετρώματος ίδιες με τις παραμέτρους αντοχής της ασυνέχειας. Και στις αυτές σειρές, οι μηχανισμοί αστοχίας είναι παρόμοιοι με τις σειρές 5 και 6. Τα αριθμητικά αποτελέ-

σματα για την αντοχή είναι πιο κοντά στη θεωρητική λύση, όμως για γωνίες μικρές κλίσης της ασυνέχειας η αντοχή του ανισότροπου δοκιμίου προκύπτει μειωμένη σε σχέση με την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος καθώς έχουμε παρεμβάλλει μία ζώνη με ασθενές υλικό στο μοντέλο.

- Τέλος, εφαρμόστηκε το μοντέλο UJ για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός βραχώδους πρανούς. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται ότι για μικρές γωνίες κλίσης των ασυνεχειών ($<30^\circ$) παρατηρείται περιορισμένη τοπική ολίσθηση στις ασυνέχειες κυρίως πλησίον της επιφάνειας του πρανούς, λόγω του προσανατολισμού της εφαπτομενικής τάσης παράλληλα προς την ελεύθερη επιφάνεια. Καθώς η γωνία κλίσης των ασυνεχειών αυξάνεται, και για γωνίες κλίσης 30° , 45° και 65° η έκταση της διατμητικής ολίσθησης των ασυνεχειών καταλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος του πρανούς. Ειδικότερα για γωνίες κλίσης 30° και 45° διαμορφώνεται μέτωπο διαρροής που δίνει την εικόνα μεγάλης κλίμακας ολίσθησης σε γωνίες κλίσης ίδιες με τις γωνίες κλίσεις των ασυνεχειών. Σε αυτές τις γωνίες το πρανός είναι μάλλον ασταθές. Για γωνίες κλίσης 65° (που πλησιάζει τη γωνία κλίσης των βαθμίδων) και 75° (που είναι μεγαλύτερη από τη γωνία κλίσης των βαθμίδων) παρατηρείται μεν εκτεταμένη ολίσθηση των ασυνεχειών, όμως δεν δημιουργείται μέτωπο διαρροής που να δείχνει κάποια συστηματική αστοχία. Τέλος, για γωνία κλίσης ασυνεχειών 90° εμφανίζονται και εφελκυστικές αστοχίες των ασυνεχειών εκτός από τις διατμητικές. Οι εφελκυστικές αστοχίες και το διαμορφούμενο μέτωπο διαρροής σε συνδυασμό με τα διανύσματα των μετατοπίσεων συνάδουν περισσότερο με μία τάση προς ανατροπή στρώσεων, η οποία θα ήταν και ο επικρατέστερος μηχανισμός αστοχίας. Εντούτοις, η προσομοίωση δεν δίνει ξεκάθαρα μηχανισμό ανατροπής.
- Συμπερασματικά, το μοντέλο UJ μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο για την προσομοίωση της ανισότροπης βραχομάζας, όταν η ανισοτροπία προκαλείται από πυκνά επίπεδα ασυνεχειών ή γενικά επίπεδα αδυναμίας. Αντίθετα, η αποτελεσματικότητα του μειώνεται όταν πρόκειται για προσομοίωση μεμονωμένων επιπέδων ασυνεχειών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μαρίνος Β., Γεωτεχνικές ταξινομήσεις βραχομάζας και υπολογισμός παραμέτρων αντοχής, Πανεπιστημιακές διαλέξεις ΑΠΘ (από την ιστοσελίδα: <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg881e/assets/geologikes-meletes-3o-mathima-site.pdf>)
2. Τσουτρέλης Χ.Ε., Γκίκας Ν.Γ., Νομικός Π.Π. (1999) Σύγκριση αριθμητικών μεθόδων κατά τη μελέτη της ευστάθειας σήραγγας μεγάλης διατομής, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, V, τεύχ.1-2, σελ. 53-67. (προσπελάσθηκε on line από την ιστοσελίδα: http://library.tee.gr/digital/techr/1999/techr_1999_v_1_2_53.pdf).
3. Α. Σοφιανός, Π. Νομικός (2008). “*Προχωρημένη Μηχανική των Πετρωμάτων*”, Σημειώσεις διαλέξεων, ΕΜΠ – ΔΠΜΣ ΣΚΥΕ
4. Χαλακατεβάκης Ν. (2010), *Αναλυτικός υπολογισμός κερματισμένης βραχομάζας*”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ.
5. Wittke W. (2014), “*Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model*”, John Wiley & Sons (Publ).
6. 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.
7. Τομπουλίδου Σ. (2015). Επίδραση της ανισοτροπίας και της κλίμακας στην ευστάθεια βραχωδών πρανών, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ-ΣΚΥΕ, ΕΜΠ.
8. Παπαγεωργάκης Ι., Κουμαντάκης Ι. (1984), Τεχνική Πετρογραφία, Αθήνα, 1984.
9. Καλλέργης Γ., Κούκης Γ. (1985), Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις: Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα 1985.
10. Hudson, J.A., Harrison, J.P. (1997). *Engineering Rock Mechanics – An Introduction to the Principles*. Pergamon.
11. (Σακελλαρίου, 2001).
12. Itasca S.A. (2009). UDEC: Universal Distinct Elements Code, User’s Manual. Minneapolis, Minnesota 2009.

13. Itasca S.A. (2008). FLAC2D: Fast Lagrangian Analysis of Continua, User's Manual. Minneapolis, Minnesota 2008.
14. Beaty, M.H & Byrne, P.M (1999c). A synthesized approach for modeling liquefaction and displacements. In C. Detournay & R. Hart (Eds), *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (pp.339-347). Rotterdam: Balkema