



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς
ανισότροπης διακλασμένης βραχομάζας

Μαρία Ευαγγελία Στόγια

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς
ανισότροπης διακλασμένης βραχομάζας

Μαρία Ευαγγελία Στόγια

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς
ανισότροπης διακλασμένης βραχομάζας

Μαρία Ευαγγελία Στόγια

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Νομικός

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 30/11/2020:

1) Π. Νομικός, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

2) Κ. Λουπασάκης, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

3) Ι. Ζευγώλης Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με θέμα «Αριθμητική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς ανισότροπης διακλασμένης βραχομάζας» εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Όλη η ερευνητική μελέτη πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του Ε.Μ.Π, υπό την επίβλεψη του κ. Π. Νομικού, Αν. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του ΕΜΠ. 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 επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στα μέλη του εργαστηρίου και ειδικά στο **κ.Γιώργο Παπαντωνόπουλο** μέλος ΕΔΙΠ για την άψογη συνεργασία και την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχε.

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 διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε ανισότροπη διακλασμένη βραχώμαζα με αριθμητικές προσομοιώσεις πεπερασμένων διαφορών με τον κώδικα FLAC 2D. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αναλυτική επίλυση προσδιορισμού της αντοχής της βραχώμαζας με ασυνέχειες, με βάση τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας, καθώς και με τις εμπειρικές εκτιμήσεις με βάση τη γεωτεχνική ταξινόμηση GSI και το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.

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 5 σειρές παραμετρικών αναλύσεων, όπου οι δύο πρώτες περιλάμβαναν βραχώμαζα με δυο οικογένειες ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους, η τρίτη μια οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών και οι υπόλοιπες δύο βραχώμαζα της κατηγορίας δομής «Blocky» του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI με τρεις διαφορετικές διευθύνσεις ασυνεχειών. Σε κάθε σειρά πραγματοποιήθηκαν 10 προσομοιώσεις της ίδιας βραχώμαζας 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 βραχώμαζας, καθώς και με την εκτίμηση της αντοχής με βάση το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown, επιβεβαιώνοντας ικανοποιητικά η μία μέθοδος την άλλη. Με το πέρας των εν λόγω προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον σειρά αριθμητικών αναλύσεων που περιελάμβανε εφαρμογή του μοντέλου στη σήραγγα Αγίας Κυριακής όπου μελετήθηκε η καταλληλότητα του μοντέλου να προσομοιώνει ανισότροπη διακλασμένη βραχώμαζα σε πραγματικά προβλήματα.

Abstract

In the present dissertation numerical explicit finite difference simulations were performed with the FLAC 2D code, where the effect of the discontinuity orientation was studied on an anisotropic jointed rock mass. The results of the simulations were compared with an analytical solution for determining the strength of the rock mass with discontinuities, based on the theory of the individual level of weakness, as well as with the empirical estimates based on the geotechnical classification GSI and the Hoek-Brown failure criterion. For the needs of the numerical simulations, two different models were used, namely the Mohr Coulomb model applied to the zones corresponding to the intact rock and the Ubiquitous Joint model respectively applied to the zones representing the discontinuities. Altogether 5 series of parametric analyzes were performed, the first two containing a rock mass with two sets of discontinuities perpendicular to each other, the third a set of non-persistent discontinuities and the other two rock masses of the "Blocky" structure category of the diagram of the GSI classification. In each series 10 simulations of the same rock mass with discontinuities of different orientation were performed. The strengths of the numerical material obtained in each series of numerical tests were compared with the analytical solutions for determining the strength of the rock mass, as well as with the estimation of the strength based on the empirical failure criterion Hoek-Brown, satisfactorily confirming one method to another. At the end of these simulations, an additional series of numerical analyzes was performed, which included the application of the model in the Agia Kyriaki tunnel, where the suitability of the model to simulate anisotropic jointed rock mass in real problems was studied.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα εικόνων.....	1
Περιεχόμενα πινάκων.....	7
Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	8
Στόχοι διπλωματικής εργασίας.....	8
1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	10
1.1 Γενικά για τη βραχομάζα.....	10
1.1.1 Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας.....	10
1.1.2 Ορισμοί.....	11
1.1.3 Συστήματα ταξινόμησης.....	12
1.2 Κατακερματισμένη βραχομάζα με ισότροπη συμπεριφορά.....	14
1.2.1 Γενικά.....	14
1.2.2 Αναλυτικές επιλύσεις.....	14
1.2.3 Κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.....	16
1.2.4 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.....	18
1.3 Σχολιασμός.....	19
1.3.1 Μειονεκτήματα των μεθοδολογιών.....	19
1.4 Κατακερματισμένη βραχομάζα με ανισότροπη συμπεριφορά.....	21
1.4.1 Καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb.....	22
1.4.2 Καταστατικό μοντέλο απανταχού ασυνεχειών (ubiquitous joints).....	23
2 Μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης – Ο κώδικας FLAC2D.....	28
2.1 Αριθμητικές μέθοδοι.....	28
2.2 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM).....	29
2.3 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών στο πρόγραμμα FLAC.....	31
2.3.1 Γενικά.....	31
2.3.2 Εξισώσεις κίνησης και ισορροπίας.....	33
2.3.3 Διατύπωση των καταστατικών εξισώσεων.....	34
2.3.4 Περιγραφή Μοντέλου Ubiquitous Joint.....	34
3 Αναλυτικός υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας.....	37
3.1 Θεωρία μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας.....	37
3.2 Εφαρμογή σε ρωγματωμένο δοκίμιο με δύο ασυνέχειες.....	42
3.3 Αντοχή δοκίμιου με μη εμμένουσες ασυνέχειες- 3 ^η Σειρά.....	42
3.4 Εμπειρικός υπολογισμός αντοχής διακλασμένης βραχομάζας.....	44
4 Αριθμητικός υπολογισμός αντοχής ανισότροπης βραχομάζας: προετοιμασία μοντέλων και αποτελέσματα.....	44
4.1 Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων.....	44
4.2 1 ^η Σειρά (UJ1-coarse) -Αραιός κάρναβος.....	46

4.2.1	Γωνία κλίσης 0° - 90°	47
4.2.2	Γωνία κλίσης 10° - 100°	48
4.2.3	Γωνία κλίσης 20° - 110°	49
4.2.4	Γωνία κλίσης 30° - 120°	50
4.2.5	Γωνία κλίσης 40° - 130°	51
4.2.6	Γωνία κλίσης 50° - 140°	52
4.2.7	Γωνία κλίσης 60° - 150°	53
4.2.8	Γωνία κλίσης 70° - 160°	53
4.2.9	Γωνία κλίσης 80° - 170°	54
4.2.10	Γωνία κλίσης 90° - 180°	55
4.3	2 ^η Σειρά (UJ1-fine)-Πυκνός κάνναβος.....	56
4.3.1	Γωνία κλίσης 0° - 90°	56
4.3.2	Γωνία κλίσης 10° - 100°	57
4.3.3	Γωνία κλίσης 20° - 110°	58
4.3.4	Γωνία κλίσης 30° - 120°	59
4.3.5	Γωνία κλίσης 40° - 130°	59
4.3.6	Γωνία κλίσης 50° - 140°	60
4.3.7	Γωνία κλίσης 60° - 150°	61
4.3.8	Γωνία κλίσης 70° - 160°	62
4.3.9	Γωνία κλίσης 80° - 170°	63
4.3.10	Γωνία κλίσης 90° - 180°	64
4.4	3 ^η Σειρά (UJ2-non-persistent).....	65
4.4.1	Γωνία κλίσης 0°	65
4.4.2	Γωνία κλίσης 10°	66
4.4.3	Γωνία κλίσης 20°	67
4.4.4	Γωνία κλίσης 30°	67
4.4.5	Γωνία κλίσης 40°	68
4.4.6	Γωνία κλίσης 45°	69
4.4.7	Γωνία κλίσης 50°	69
4.4.8	Γωνία κλίσης 60°	70
4.4.9	Γωνία κλίσης 70°	71
4.4.10	Γωνία κλίσης 80°	71
4.4.11	Γωνία κλίσης 90°	72
4.5	4 ^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse)- Αραιός κάνναβος.....	73
4.5.1	Γωνία κλίσης 0° - 90° - 45°	73
4.5.2	Γωνία κλίσης 10° - 100° - 55°	74
4.5.3	Γωνία κλίσης 20° - 110° - 65°	75
4.5.4	Γωνία κλίσης 30° - 120° - 75°	76

4.5.5	Γωνία κλίσης 40°-130°-85°	76
4.5.6	Γωνία κλίσης 50°-140°-95°	77
4.5.7	Γωνία κλίσης 60°-150°-115°	78
4.5.8	Γωνία κλίσης 70°-160°-125°	79
4.5.9	Γωνία κλίσης 80°-170°-125°	79
4.5.10	Γωνία κλίσης 90°-180°-135°	80
4.6	5 ^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse)-Πυκνός κάρναβος	81
4.6.1	UJ3-Blocky-coarse-Πλευρική 0.5 MPa	81
4.6.1.1	Γωνία κλίσης 0°-90°-45°	81
4.6.1.2	Γωνία κλίσης 10°-100°-55°	82
4.6.1.3	Γωνία κλίσης 20°-110°-65°	82
4.6.1.4	Γωνία κλίσης 30°-120°-75°	83
4.6.1.5	Γωνία κλίσης 40°-130°-85°	84
4.6.1.6	Γωνία κλίσης 50°-140°-95°	84
4.6.1.7	Γωνία κλίσης 60°-150°-105°	85
4.6.1.8	Γωνία κλίσης 70°-160°-115°	86
4.6.1.9	Γωνία κλίσης 80°-170°-125°	86
4.6.1.10	Γωνία κλίσης 90°-180°-135°	87
4.6.2	UJ3-Blocky-coarse-Πλευρική 2 MPa	88
4.6.2.1	Γωνία κλίσης 0°-90°-45°	88
4.6.2.2	Γωνία κλίσης 10°-100°-55°	88
4.6.2.3	Γωνία κλίσης 20°-110°-65°	89
4.6.2.4	Γωνία κλίσης 30°-120°-75°	90
4.6.2.5	Γωνία κλίσης 40°-130°-85°	90
4.6.2.6	Γωνία κλίσης 50°-140°-95°	91
4.6.2.7	Γωνία κλίσης 60°-150°-105°	92
4.6.2.8	Γωνία κλίσης 70°-160°-115°	92
4.6.2.9	Γωνία κλίσης 80°-170°-125°	93
4.6.2.10	Γωνία κλίσης 90°-180°-135°	94
4.6.3	UJ3-Blocky-coarse-Πλευρική 5 MPa	94
4.6.3.1	Γωνία κλίσης 0°-90°-45°	94
4.6.3.2	Γωνία κλίσης 10°-100°-55°	95
4.6.3.3	Γωνία κλίσης 20°-110°-65°	96
4.6.3.4	Γωνία κλίσης 30°-120°-75°	96
4.6.3.5	Γωνία κλίσης 40°-130°-85°	97
4.6.3.6	Γωνία κλίσης 50°-140°-95°	98
4.6.3.7	Γωνία κλίσης 60°-150°-105°	98
4.6.3.8	Γωνία κλίσης 70°-160°-115°	99
4.6.3.9	Γωνία κλίσης 80°-170°-125°	100

4.6.3.10	Γωνία κλίσης 90°-180°-135°	100
4.7	Συμπεράσματα αριθμητικών προσομοιώσεων	101
4.7.1	Προσομοίωση μη εμμενουσών ασυνεχειών (Non-persistent)	101
4.7.2	Προσομοίωση δύο οικογενειών ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους	103
4.7.3	Προσομοίωση διακλασμένης βραχομάζας	105
5	Μελέτη περίπτωσης: σήραγγα Αγίας Κυριακής στην Ε.Ο. Άρτας -Τρικάλων	106
5.1	Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων	106
5.1.1	Γενικά για τη σήραγγα	106
5.1.2	Αριθμητική προσομοίωση	108
5.1.2.1	Προσομοίωση με θεώρηση της βραχομάζας ως ισοδύναμο συνεχές μέσο	108
5.1.2.1.1	Ιδιότητες στο FLAC	109
5.1.2.1.2	Μεθοδολογία προσομοίωσης	109
5.1.2.2	Προσομοίωση με θεώρηση ανισότροπης βραχομάζας- UJ model	110
5.1.2.3	Προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας Blocky του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI 113	
5.2	Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων	115
5.2.1	Προσομοίωση με θεώρηση της βραχομάζας ως ισοδύναμο συνεχές μέσο	115
5.2.1.1.1	3η φάση προσομοίωσης	115
5.2.1.1.2	5η φάση προσομοίωσης	116
5.2.2	Προσομοίωση με θεώρηση ανισότροπης βραχομάζας- UJ model	118
5.2.2.1	Γωνία κλίσης 0°	118
5.2.2.1.1	3 ^η φάση προσομοίωσης	118
5.2.2.1.2	5 ^η φάση προσομοίωσης	120
5.2.2.2	Γωνία κλίσης 20°	121
5.2.2.2.1	3 ^η φάση προσομοίωσης	121
5.2.2.2.2	5 ^η φάση προσομοίωσης	123
5.2.2.3	Γωνία κλίσης 35°	125
5.2.2.3.1	3 ^η φάση προσομοίωσης	125
5.2.2.3.2	5 ^η φάση προσομοίωσης	126
5.2.2.4	Γωνία κλίσης 50°	128
5.2.2.4.1	3 ^η φάση προσομοίωσης	128
5.2.2.4.2	5 ^η φάση προσομοίωσης	129
5.2.2.5	Γωνία κλίσης 70°	131
5.2.2.5.1	3 ^η φάση προσομοίωσης	131
5.2.2.5.2	5 ^η φάση προσομοίωσης	132
5.2.2.6	Γωνία κλίσης 90°	134
5.2.2.6.1	3 ^η φάση προσομοίωσης	134
5.2.2.6.2	5 ^η φάση προσομοίωσης	135

5.2.3	Προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας <i>Blocky</i> του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής <i>GSI</i>	139
5.2.3.1	Γωνία κλίσης 0° - 90° - 45°	139
5.2.3.1.1	3 ^η φάση προσομοίωσης.....	139
5.2.3.1.2	5 ^η φάση προσομοίωσης.....	140
5.2.3.2	Γωνία κλίσης 20° - 110° - 65°	142
5.2.3.2.1	3 ^η φάση προσομοίωσης.....	142
5.2.3.2.2	5 ^η φάση προσομοίωσης.....	144
5.2.3.3	Γωνία κλίσης 35° - 125° - 80°	145
5.2.3.3.1	3 ^η φάση προσομοίωσης.....	145
5.2.3.3.2	5 ^η φάση προσομοίωσης.....	147
5.2.3.4	Γωνία κλίσης 50° - 140° - 95°	148
5.2.3.4.1	3 ^η φάση προσομοίωσης.....	148
5.2.3.4.2	5 ^η φάση προσομοίωσης.....	150
5.2.3.5	Γωνία κλίσης 70° - 160° - 115°	151
5.2.3.5.1	3 ^η φάση προσομοίωσης.....	151
5.2.3.5.2	5 ^η φάση προσομοίωσης.....	153
5.2.3.6	Γωνία κλίσης 90° - 180° - 135°	154
5.2.3.6.1	3 ^η φάση προσομοίωσης.....	154
5.2.3.6.2	5 ^η φάση προσομοίωσης.....	156
5.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	160
5.3.1	Προσομοίωση με θεώρηση της βραχομάζας ως ισοδύναμο συνεχές μέσο.....	160
5.3.2	Προσομοίωση σήραγγας με μία οικογένεια εμμενουσών ασυνεχειών	160
5.3.3	Προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας <i>Blocky</i>	162
6	Συμπεράσματα.....	163

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Εξεταζόμενοι παράμετροι σε κάθε σύστημα (modified after Edelbro, 2003)	12
Εικόνα 2. Ιστορική εξέλιξη εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας (modified after Edelbro, 2003).....	13
Εικόνα 3. Χάραξη περιβάλλουσας αστοχίας πετρώματος κατά Mohr. (Σοφιανός και Νομικός, 2008)	18
Εικόνα 4. Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση (από Hudson and Harrison, 1997)	21
Εικόνα 5. Δοκιμές σε τραχείες επιφάνειες ασυνεχειών (Patton, 1966).....	22
Εικόνα 6. Δυνατότητα εφαρμογής ανάλυσης με ubiquitous joint μοντέλο (Kazakidis & Diederichs, 1993)	24
Εικόνα 7. Στάδια αστοχίας σ'ένα UJRM μοντέλο (Sainsbury et al., 2008)	25
Εικόνα 8. Τρισδιάστατη SRM τεχνική για την αξιολόγηση απόκρισης βραχομάζας γύρω από μεγάλο όρυγμα. (Sainsbury et al., 2008).....	26
Εικόνα 9. Μηχανισμός αστοχίας του ορυχείου Palabora με την τεχνική SRM-UJRM (Sainsbury et al., 2008)	27
Εικόνα 10. Σχεδιασμός με μηχανικά μοντέλα βραχομηχανικής (Wittke, 2014)	27
Εικόνα 11. Η συνάρτηση $f(x)$ και τα σημεία k , $k-1$ και $k+1$	29
Εικόνα 12. Απλός κλίμακας πεπερασμένων διαφορών (Beatty and Byrne, 1999)	30
Εικόνα 13. Μοντέλο βραχομάζας γύρω από σήραγγα και διαχωρισμός της σε στοιχεία στο πρόγραμμα FLAC.	32
Εικόνα 14. Διάγραμμα ροής του κύκλου υπολογισμών που πραγματοποιείται στο FLAC.....	32
Εικόνα 15. Εφαρμογή δύναμης $F=F(t)$ σε μάζα m , που προκαλεί τη μονοδιάστατη κίνηση της μάζας....	33
Εικόνα 16. Παρουσία διεύθυνσης ασυνέχειας με κλίση θ σε υλικό Mohr – Coulomb στο αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων (x,y,x',y') (Li et al., 2003)	35
Εικόνα 17. Κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας στο λογισμικό FLAC.....	36
Εικόνα 18. (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)	38
Εικόνα 19. Μεταβολή του προσανατολισμού του εντατικού πεδίου (Νομικός 2015).	39
Εικόνα 20. Λόγος σ_1/σ_3 για να συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια συναρτήσει της γωνίας ω σύμφωνα με την εξίσωση 33.....	40
Εικόνα 21. Γραφική παράσταση αντοχής άρρηκτου πετρώματος σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την εξίσωση 39.....	40
Εικόνα 22. Γραφική παράσταση της μεταβολής της αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την Εξίσωση 34.	41
Εικόνα 23. Γραφική παράσταση της μεταβολής της τριαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με δύο κάθετες μεταξύ τους ασυνέχειες για πλευρική πίεση 5MPa.	42
Εικόνα 24. Γραφική παράσταση της μεταβολής της τριαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με μια οικογένεια μη εμμενουσών (μπλε) και συνεχών ασυνεχειών (πορτοκαλί) για πλευρική πίεση 5MPa	43
Εικόνα 25. Γεωμετρία αριθμητικού μοντέλου.	45
Εικόνα 26. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου	47
Εικόνα 27. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής- δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	47
Εικόνα 28. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου	48
Εικόνα 29. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής- δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο.....	48
Εικόνα 30. Διάγραμμα αξονικής τάσης συναρτήσει της βράχυνσης	49

Εικόνα 31. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου	49
Εικόνα 32. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής- δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο	50
Εικόνα 33. Διάγραμμα αξονικής τάσης συναρτήσει της βράχυνσης	50
Εικόνα 34. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	50
Εικόνα 35. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	51
Εικόνα 36. Διάγραμμα αξονικής τάσης συναρτήσει της βράχυνσης	51
Εικόνα 37. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	51
Εικόνα 38. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	52
Εικόνα 39. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	52
Εικόνα 40. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	53
Εικόνα 41. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	53
Εικόνα 42. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	53
Εικόνα 43. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	54
Εικόνα 44. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	54
Εικόνα 45. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	55
Εικόνα 46. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	55
Εικόνα 47. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	56
Εικόνα 48. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	56
Εικόνα 49. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	57
Εικόνα 50. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	57
Εικόνα 51. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	57
Εικόνα 52. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	58
Εικόνα 53. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	58
Εικόνα 54. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	59
Εικόνα 55. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	59
Εικόνα 56. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	59
Εικόνα 57. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	60
Εικόνα 58. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	60
Εικόνα 59. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	61
Εικόνα 60. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	61
Εικόνα 61. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	62
Εικόνα 62. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	62
Εικόνα 63. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	63
Εικόνα 64. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	63
Εικόνα 65. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	64
Εικόνα 66. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	64
Εικόνα 67. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	64
Εικόνα 68. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	65
Εικόνα 69. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	66
Εικόνα 70. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	66
Εικόνα 71. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	66
Εικόνα 72. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	67
Εικόνα 73. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	67
Εικόνα 74. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	67
Εικόνα 75. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	68
Εικόνα 76. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	68
Εικόνα 77. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	68
Εικόνα 78. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	69
Εικόνα 79. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	69
Εικόνα 80. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	69

Εικόνα 133. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	89
Εικόνα 134. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	89
Εικόνα 135. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	90
Εικόνα 136. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	90
Εικόνα 137. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	90
Εικόνα 138. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	91
Εικόνα 139. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	91
Εικόνα 140. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	91
Εικόνα 141. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	92
Εικόνα 142. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	92
Εικόνα 143. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	92
Εικόνα 144. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	93
Εικόνα 145. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	93
Εικόνα 146. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	93
Εικόνα 147. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	94
Εικόνα 148. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	94
Εικόνα 149. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	94
Εικόνα 150. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	95
Εικόνα 151. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	95
Εικόνα 152. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	95
Εικόνα 153. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	96
Εικόνα 154. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	96
Εικόνα 155. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	96
Εικόνα 156. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	97
Εικόνα 157. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	97
Εικόνα 158. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	97
Εικόνα 159. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	98
Εικόνα 160. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	98
Εικόνα 161. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	98
Εικόνα 162. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	99
Εικόνα 163. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	99
Εικόνα 164. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	99
Εικόνα 165. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	100
Εικόνα 166. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	100
Εικόνα 167. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου	100
Εικόνα 168. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής	101
Εικόνα 169. Αντοχή αριθμητικού δοκιμίου με μία οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική επίλυση με τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας για $w=0.5$	101
Εικόνα 170. Μέτρηση του λόγου w από τη γεωμετρία των ζωνών του αριθμητικού μοντέλου	102
Εικόνα 171. Αντοχή αριθμητικού δοκιμίου με μία οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική επίλυση με τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας για $w=w_{FLAC}$	103
Εικόνα 172. Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων δύο κάθετων μεταξύ τους οικογενειών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική λύση για δύο κάθετες ασυνέχειες μεγάλης εμμόνης ($w=1.0$)	104
Εικόνα 173. Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων δύο κάθετων μεταξύ τους οικογενειών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική λύση για δύο κάθετες μη εμμένουσες ασυνέχειες ($w=0.5$)	105
Εικόνα 174. Μεταβολή της αντοχής των δοκιμίων διακλασμένης βραχομάζας κατηγορίας “BLOCKY” ως προς τη γωνία κλίσης της 1^{ns} οικογένειας ασυνεχειών	106
Εικόνα 175. Τυπική διατομή σήραγγας Αγίας Κυριακής	107
Εικόνα 176. Ισοδύναμες παραμέτροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb από το πρόγραμμα RocData	109
Εικόνα 177. Φωτογραφία στομίου Αγίας Κυριακής	111

Εικόνα 178. Τιμή GSI που επιλέχθηκε για την προσομοίωση.....	112
Εικόνα 179. Γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου Blocky-35°-125°-80°.....	114
Εικόνα 180. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	115
Εικόνα 181. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	115
Εικόνα 182. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	116
Εικόνα 183. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	116
Εικόνα 184. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	116
Εικόνα 185. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	117
Εικόνα 186. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	117
Εικόνα 187. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	118
Εικόνα 188. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	118
Εικόνα 189. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	119
Εικόνα 190. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	119
Εικόνα 191. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	120
Εικόνα 192. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	120
Εικόνα 193. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	120
Εικόνα 194. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	121
Εικόνα 195. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	121
Εικόνα 196. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	121
Εικόνα 197. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	122
Εικόνα 198. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	122
Εικόνα 199. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	123
Εικόνα 200. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	123
Εικόνα 201. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	123
Εικόνα 202. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	124
Εικόνα 203. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	124
Εικόνα 204. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	125
Εικόνα 205. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	125
Εικόνα 206. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	125
Εικόνα 207. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	126
Εικόνα 208. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	126
Εικόνα 209. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	126
Εικόνα 210. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	127
Εικόνα 211. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	127
Εικόνα 212. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	128
Εικόνα 213. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	128
Εικόνα 214. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	128
Εικόνα 215. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	129
Εικόνα 216. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	129
Εικόνα 217. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	129
Εικόνα 218. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	130
Εικόνα 219. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	130
Εικόνα 220. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	131
Εικόνα 221. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	131
Εικόνα 222. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	131
Εικόνα 223. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	132
Εικόνα 224. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	132
Εικόνα 225. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	132
Εικόνα 226. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	133
Εικόνα 227. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	133
Εικόνα 228. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας.....	134
Εικόνα 229. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	134

Εικόνα 282. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	156
Εικόνα 283. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχώμαζας.....	156
Εικόνα 284. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου.....	156
Εικόνα 285. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα	157
Εικόνα 286. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα	157
Εικόνα 287. Διάγραμμα πλαστικής ζώνης από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY	159
Εικόνα 288. Διάγραμμα αξονικής τάσης από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY.....	159
Εικόνα 289. Διάγραμμα μετατόπισης στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY	160
Εικόνα 290. Ασύμμετρη παραμόρφωση σε σήραγγα σε στρωσιγενή ασβεστόλιθο (Fortsakis et al. 2012)	161

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1. Τάσεις σε απειροστό στοιχείο σύμφωνα με την κλασική θεωρία ελαστικότητας και την θεωρία Cosserat (Χαλακατεβάκης,2010).	15
Πίνακας 2. Το σύστημα GSI (Marinos and Hoek, 2000).....	18
Πίνακας 3 Αντοχή διακλασμένης βραχώμαζας υπολογιζόμενη εμπειρικά	44
Πίνακας 4. Σηραγγολογικές κατηγορίες βραχομάζας (Ντουνιάς κ.α. 2006)	107
Πίνακας 5. Κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης (Ντουνιάς κ.α. 2006)	108
Πίνακας 6. Ταξινόμηση βραχομάζας στη σήραγγα προσομοίωσης.....	111
Πίνακας 7. Παράμετροι αντοχής απομένουσας βραχομάζας	112
Πίνακας 8. Συνδυασμοί κλίσεων ασυνεχειών που μελετήθηκαν	114
Πίνακας 9. Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	118
Πίνακας 10. Πλαστική ζώνη από την προσομοίωση μοντέλου UJ	136
Πίνακας 11. Αξονική τάση από την προσομοίωση μοντέλου UJ.....	137
Πίνακας 12. Μετατόπιση στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου UJ	137
Πίνακας 13. Πλαστική ζώνη από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY	158
Πίνακας 14. Αξονική τάση από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY	158
Πίνακας 15. Μετατόπιση στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY	158

Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της ανισοτροπίας της αντοχής διακλασμένης 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 ή σηράγγων. Η επίδραση της ανισοτροπίας της βραχομάζας στην αντοχή της μελετάται αρχικά αναλυτικά, με τη χρήση της θεωρίας του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας, και στη συνέχεια αριθμητικά με προσομοίωση. Για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του προγράμματος αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων διαφορών FLAC της Itasca SA για ανάλυση της συμπεριφοράς γεωτεχνικών κατασκευών σε γεωλικά. Στον κώδικα FLAC η ανισοτροπία προσομοιώθηκε με τη χρήση του μοντέλου Ubiquitous joint για τη προσομοίωση της παρουσίας των ασυνεχειών με εναλλαγές της γεωμετρίας τους.

Στόχοι διπλωματικής εργασίας

Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- Η κατανόηση της επίδρασης των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας.
- Η διερεύνηση της δυνατότητας του καταστατικού μοντέλου Ubiquitous joint να προσομοιώσει την ανισοτροπία της διακλασμένης βραχομάζας.
- Η ανάλυση της ευστάθειας σήραγγας σε βραχομάζα με διάφορα συστήματα ασυνεχειών με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και χρήση του κώδικα FLAC2D και προσομοίωση των ασυνεχειών με το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint.

1 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Γενικά για τη βραχομάζα

1.1.1 Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας

Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη νέων αναλυτικών τεχνικών για την αντικατάσταση της χρήσης εμπειρικών συστημάτων εκτίμησης της αντοχής της βραχομάζας για την καλύτερη αξιολόγηση των ιδιοτήτων της διακλασμένης βραχομάζας και την προσομοίωση της συμπεριφοράς της. Αυτές οι προσπάθειες οφείλονται στην ανάγκη για νέα εργαλεία μοντελοποίησης ικανά να προσομοιώσουν τους τύπους συμπεριφοράς που συναντώνται στο πλαίσιο των επιφανειακών ορυγμάτων και της διάνοιξης υπογείων έργων.

Καθώς αυξάνεται η κλίμακα της εκσκαφής, οι απλές δομικά ελεγχόμενες αστοχίες, όπως η επίπεδη διατμητική αστοχία και η αστοχία σφήνας, θεωρούνται λιγότερο επικρατούσες και αναπτύσσονται πιο πολύπλοκες δομικά ελεγχόμενες αστοχίες. Ως εκ τούτου, κατά το σχεδιασμό μεγάλων ορυχείων, όπως του Diavik, Palabora, Chuquicamata ή Bingham Canyon, πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά η αστοχία. Κατά συνέπεια, οι επιλεγμένες τεχνικές μοντελοποίησης πρέπει να είναι σε θέση να συλλάβουν σωστά το ρόλο της δομής της βραχομάζας σε σχέση με την προοδευτική μείωση της αντοχής και την κινηματική επίδραση στην πιθανή αστοχία του πρανούς.

Επιπλέον, η διεύθυνση των ασυνεχειών έχει σημαντική επίδραση στην εξέλιξη και το ρυθμό εκμετάλλευσης ενός ορυχείου και επομένως έχει σημαντικό αντίκτυπο στο σχεδιασμό του και στην κερδοφορία του. Ένα καλό παράδειγμα για τη σημασία της δομής της βραχομάζας παρέχεται από το υπαίθριο ορυχείο Palabora. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών και οι αλληλεπιδράσεις τάσεων μεταξύ του υπόγειου και του υπερκείμενου ανοιχτού ορύγματος προκάλεσαν την απόκλιση προς και πίσω από το βόρειο τοίχωμα του ορύγματος οδηγώντας στην αστοχία του. Αυτό το περιστατικό έθεσε σε κίνδυνο την ασφάλεια των υποδομών ζωτικής σημασίας που βρίσκονται πίσω από την κορυφή των πλαγιών και είχε ως αποτέλεσμα την αραίωση του αποθέματος μεταλλεύματος. (Sainsbury et al., 2008)

Τα συμβατικά μοντέλα συνεχούς μέσου που βασίζονται σε ιδιότητες βραχομάζας που προέρχονται από εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης περιορίζονται στην αναπαραγωγή μιας τέτοιας συμπεριφοράς, τουλάχιστον σε σχέση με τους κινηματικούς ελέγχους που εισάγονται από τον τεκτονισμό της βραχομάζας (ασυνέχεις, ρήγματα, κ.ά). Αυτό θέτει υπό αμφισβήτηση την καταλληλότητά τους όπου οι ασυνέχειες αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία πιθανής αστοχίας. Από την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι συνεχούς μέσου είναι πιο εύκολο να ρυθμιστούν και να εκτελεστούν γρηγορότερα (δηλαδή, είναι πιο αποδοτικές υπολογιστικά), επιτρέποντας επομένως τη μοντελοποίηση πολλαπλών σεναρίων αρκετά γρήγορα. Οι μέθοδοι μη συνεχούς μέσου που μοντελοποιούν ρητά τη συμπεριφορά των ασυνεχειών, αντιθέτως, έχουν τη δυνατότητα να συλλάβουν με ακρίβεια το αποτέλεσμα της δομής της βραχομάζας, αλλά χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να εγκατασταθούν και είναι πιο απαιτητικές υπολογιστικά. (Lavoie, 2011)

1.1.2 Ορισμοί

Κατά την ISRM, πέτρωμα (rock) καλείται οποιοδήποτε φυσικά σχηματισμένο σύνολο ορυκτής ύλης, που απαντάται σε μεγάλη μάζα ή σε θραύσματα (Νομικός, 2015). Μάζα του πετρώματος ή βραχομάζα (rock mass) καλείται το πέτρωμα στη φυσική του θέση (in situ), συμπεριλαμβανομένων των ασυνεχειών του. Άρρηκτο πέτρωμα (intact rock) καλείται το πέτρωμα της βραχομάζας, που τυπικά αντιπροσωπεύεται από ένα τεμάχιο πυρήνα μίας δειγματοληπτικής γεώτρησης, απαλλαγμένο από τις μακροσκοπικές δομικές ασυνέχειες της βραχομάζας. Τα ορυκτά που αντιπροσωπεύουν τη βασική δομή του συνήθως λαμβάνουν τη μορφή κρυστάλλων, αλλά μπορεί να υπάρχουν επίσης ως άμορφα συσσωματώματα μορίων όπως το διοξείδιο του πυριτίου.

Κατά την περιγραφή της δομής του άρρηκτου πετρώματος, ο όρος «υφή» χρησιμοποιείται για την περιγραφή της εμφάνισης, του σχήματος, του μεγέθους και της κατανομής μεγέθους των επιμέρους κόκκων και των αδρανών σωματιδίων ορυκτών. Για το χαρακτηρισμό του μεγέθους των κόκκων, όπως και στη μηχανική του εδάφους, το πέτρωμα περιγράφεται από τους όρους λεπτόκοκκο, μεσόκοκκο και χονδρόκοκκο. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων, όπως η παραμόρφωση, η αντοχή και η διαπερατότητα, αυτά τα χαρακτηριστικά, ωστόσο, είναι λιγότερο σημαντικά. Ο χωρικός προσανατολισμός των κόκκων περιγράφεται από τη δομή τους. Αυτός ο όρος καλύπτει επίσης ατέλειες όπως πόρους, ρωγμές, εγκλείσματα και όρια κόκκων. Τα ιζηματογενή και πυριγενή πετρώματα συχνά εμφανίζουν τυχαία δομή κόκκων. Τέτοιες δομές χαρακτηρίζονται από στατιστικά ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων.

Ο όρος «ασυνέχεια» στη βραχομηχανική χρησιμοποιείται για όλα τα επίπεδα αδυναμίας κατά τα οποία διακόπτεται η συνέχεια του άρρηκτου πετρώματος. Μια ταξινόμηση ασυνέχειας μπορεί να βασίζεται στο μέγεθος της διατμητικής μετατόπισης που υπέστησαν οι επιφάνειές της. Μια άλλη ταξινόμηση των ασυνεχειών σε σχέση με την έκτασή τους εισήχθη από τον Müller (1963). Οι ασυνέχειες σχηματίζονται με διάφορες διεργασίες όπως με ρωγμάτωση αρχικά επιπέδων ενοποιημένων ιζημάτων λόγω συρρίκνωσης κατά την ξήρανση και με τεκτονικές διεργασίες. Επίσης ασυνέχειες που οφείλονται σε εφελκυστικές τάσεις, ξεκινούν σε πυριγενείς βράχους λόγω συρρίκνωσης λόγω της ψύξης του μάγματος. Μια «κύρια ασυνέχεια» είναι ένα επίμονο επίπεδο ασυνέχειας σε μεγάλη έκταση. (Wittke, 2014)

- 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.
- 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.

- 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 εμμονή και αποτελούν επιφάνειες μειωμένης διατμητικής αντοχής σε σχέση με το άρρηκτο πέτρωμα. (Καλλέργης και Κούκης, 1985)

1.1.3 Συστήματα ταξινόμησης

Parameters	Classification system										
	RQD	RSR	Q	MRMR	RMS	MBR	SMR	RAC	GSI	N	Rmi
Block size	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x
Block building joint orientations	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x
Number of joint sets	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x	x
Joint length	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x
Joint spacing	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Joint strength	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rock type	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
State of stress	-	-	-	x	x	-	x	-	-	-	-
Groundwater condition	-	x	x	x	x	x	x	x	-	x	-
Strength of the intact rock	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Blast damage	-	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-

Εικόνα 1. Εξεταζόμενοι παράμετροι σε κάθε σύστημα (modified after Edlbro, 2003)

Πολλά συστήματα ταξινόμησης προσφέρουν ταχεία αξιολόγηση της αντοχής της βραχώμαζας που μπορεί να σχετίζεται άμεσα με την ευστάθεια ή το σχεδιασμό της υποστήριξης (Lorig, 2007). Τα συστήματα ταξινόμησης βασίζονται σε παραμέτρους που συνήθως σταθμίζονται για τις ασυνέχειες και τις ιδιότητές τους, για παράδειγμα τον αριθμό των συνόλων ασυνεχειών, την ανθεκτικότητα και την τραχύτητά τους, την εξαλλοίωση, το υλικό πλήρωσης και των υπόγειων υδάτων, και μερικές φορές επίσης την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος και το μέγεθος των τάσεων (Edelbro, 2003). Οι κυριότερες αδυναμίες αυτών των συστημάτων περιλαμβάνουν την απλοποίηση των συνθηκών και των χαρακτηριστικών της βραχώμαζας σε έναν μόνο αριθμό, αγνοούν την επίδραση της κλίμακας (Lorig, 2007), δεν μπορούν να περιγράψουν την ανισοτροπία και την εξαρτώμενη από το χρόνο συμπεριφορά και δεν λαμβάνουν υπόψιν την αλληλεπίδραση των μέσων υποστήριξης. (Riedmüller et al., 1999)

Name of Classification	Author and First version	Country of origin	Applications	Remarks
Rock Load Theory	Terzaghi, 1946	USA	Tunnels with steel support	Unsuitable for modern tunneling
Stand-Up Time	Lauffer, 1958	Austria	Tunneling	Conservative
New Austrian Tunneling Method (NATM)	Rabecewicz, 1964/65	Austria	Tunneling in incompetent (overstressed) ground	Utilized in squeezing ground conditions
Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al., 1966	USA	Core logging, tunneling	Sensitive to orientation effects
Rock Classification for Rock Mechanical Purposes	Patching and Coates, 1968	Canada	For input in rock mechanics	
Unified Classification of Soils and Rocks	Deere et al., 1969	USA	Based on particles and blocks for communication	
Rock Structure Rating (RSR)	Wickham et al., 1972	USA	Tunnels with steel support	Not useful with steel fibre shotcrete
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1974	South Africa	Tunnels, mines, foundations etc.	Unpublished base case records
Q-System	Barton et al., 1974	Norway	Tunnels, large chambers	
Mining RMR (MRMR)	Laubscher, 1977	South Africa	Mining	
Typological classification	Matula and Holzer, 1978		For use in communication	
Unified Rock Classification System (URCS)	Williamson, 1980	USA	For use in communication	
Basic Geotechnical Description (BGD)	ISRM, 1981		For general use	
Rock Mass Strength (RMS)	Stille et al., 1982	Sweden		Modified RMR
Modified Basic RMR (MBR)	Cummings et al., 1982		Mining	
Simplified Rock Mass Rating (SRMR)	Brook and Dharmaratne, 1985		Mines and tunnels	Modified RMR and MRMR
Slope Mass Rating (SMR)	Romana, 1985	Spain	Slopes	
Slope Rock Mass Rating	Robertson, 1988		Slopes	Modified RMR
Ramamurthy/Arora Classification (RAC)	Ramamurthy and Arora, 1993	India	For intact and jointed rock	Modified Deere and Miller approach
Geological Strength Index (GSI)	Hoek et al., 1995	Canada	Mines and tunnels	
Rock Mass Number (N) and Rock Condition Rating (RCR)	Goel et al., 1996	India		Stress-free Q
Rock Mass index (RMi)	Palmström, 1995	Norway	Rock engineering, communication, characterization	
Chinese SRMR (CSMR)	Chen, 1995	China	Slopes	
Modified Rock Mass Classification (M-RMR)	Unal, 1996			
Index of Rock Mass Basic Quality (BQ)	Lin, 1998			
<p>Notes: i) RSR was a forerunner to the RMR system, though they both give numerical ratings to the input parameters and summarize them to a total value connected to the suggested support ii) The Unified Rock Classification System (URCS) is associated to Casagrandes classification system for soils in 1948</p>				

Εικόνα 2. Ιστορική εξέλιξη εμπειρικών συστημάτων ταξινόμησης της βραχομάζας (modified after Edelbro, 2003)

1.2 Κατακερματισμένη βραχομάζα με ισότροπη συμπεριφορά

1.2.1 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.

1.2.2 Αναλυτικές επιλύσεις

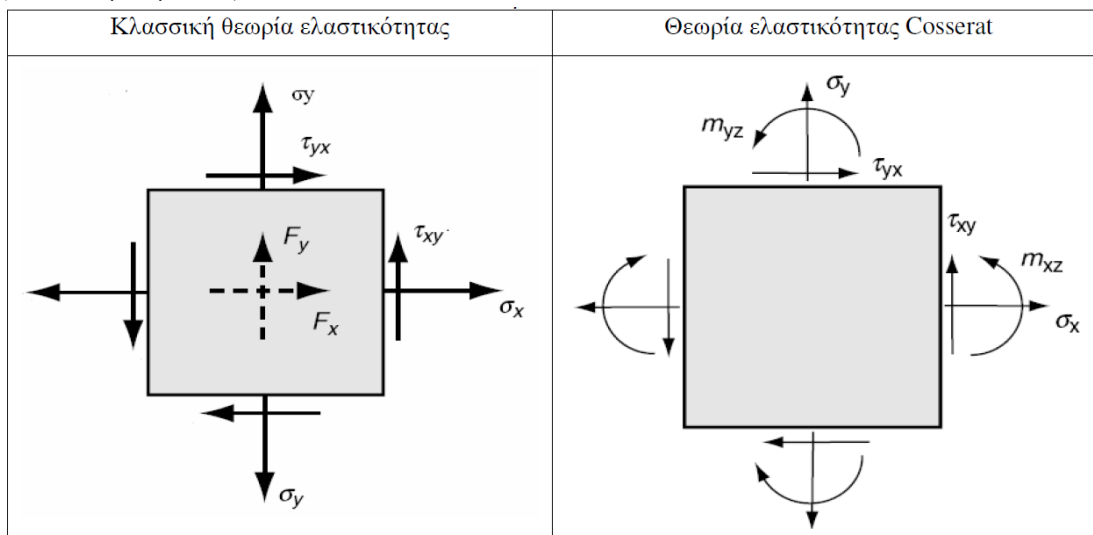
Οι αναλυτικές επιλύσεις στηρίζονται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού με εξισώσεις της μηχανικής του συνεχούς μέσου, οι οποίες στη συνέχεια επιλύονται λαμβάνοντας

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 θεώρησή 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 1**. Επομένως, ο ταυνοστής 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 1. Τάσεις σε απειροστό στοιχείο σύμφωνα με την κλασσική θεωρία ελαστικότητας και την θεωρία Cosserat (Χαλακατεβάκης, 2010).



1.2.3 Κριτήριο αστοχίας 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:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + \sigma_c^2)^{0.5}$$

Εξίσωση 1

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 δοκιμίων για διάφορες τιμές πλευρικής πίεσης. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της βραχομάζας υπολογίζεται από την **Εξίσωση 1** θέτοντας $\sigma_3=0$. Έτσι προκύπτει:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{s} \quad \text{Εξίσωση 2}$$

Η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό υπολογίζεται από την **Εξίσωση 1** θέτοντας $\sigma_1=0$. Η σχέση που προκύπτει είναι:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad \text{Εξίσωση 3}$$

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:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^\alpha \quad \text{Εξίσωση 3}$$

όπου

$$m_b / m_i = \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad \text{Εξίσωση 5}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad \text{Εξίσωση 6}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad \text{Εξίσωση 7}$$

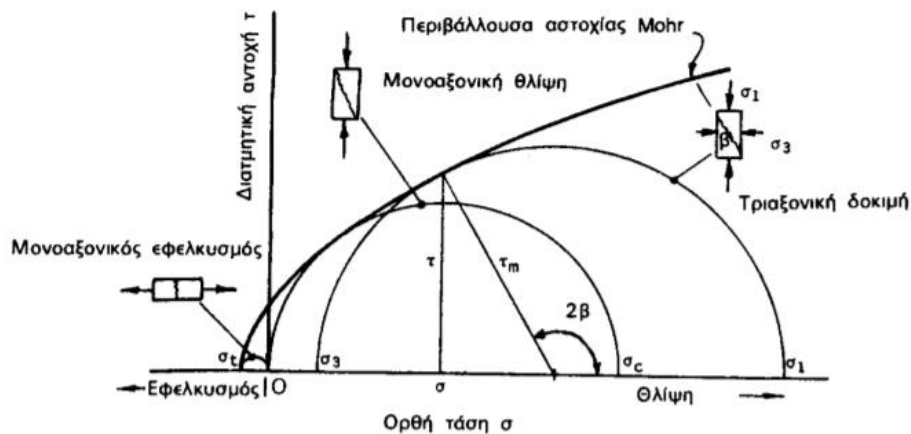
Οι τιμές των σ_{ci} και m_i υπολογίζονται από εργαστηριακές δοκιμές ή σε προκαταρκτικό στάδιο εκτιμώνται από τους πίνακες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Το **D** είναι ένας συντελεστής διατάραξης της βραχομάζας με τον οποίο προσομοιώνεται η διατάραξη της περιβάλλουσας βραχομάζας από την 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 2. Το σύστημα GSI (Marinos and Hoek, 2000)

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΤΜΑΤΟΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζονται στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφανειακών 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 ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρῶτο εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιακτινότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχομάζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ				
	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσφραγισμένες επιφάνειες	ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσφραγισμένες και εδαφοειδείς επιφάνειες	ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μερικές αποσφραγισμένες και εδαφοειδείς επιφάνειες	ΠΟΛΥ ΠΟΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσφραγισμένες με ομαλή περιέλιξη ή υπό τη μορφή με γωνιώδη βραχομάζα	ΠΟΛΥ ΠΟΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσφραγισμένες με μεγάλο αριθμό ολισθητικών επιφανειών
ΔΟΜΗ	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
INTACT OR MASSIVE - Άρηκτα βραχώδη τεμάχια ή αστρωτός βράχος με λίγες ασυνεχείες σε μεγάλη απόσταση	90			N/A	N/A
BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλειδώμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεταγμένες οικογένειες ασυνεχειών	80	70			
VERY BLOCKY - Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών		60	50		
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεταγμένες οικογένειες ασυνεχειών. Εμφάνιση στρώσης ή σχιστότητας			40	30	
DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα με πτυχωτό αλληλοκλειδώμα και με ταυτοχρονή παρουσία γωνιακών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων				20	
LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατηρημένη ασθενής βραχομάζα. Η σχιστότητα επηρεάζει έντονα οποιαδήποτε άλλες οικογένειες ασυνεχειών εμπόδιζοντας την δημιουργία γωνιακών τεμαχίων	N/A	N/A			10

1.2.4 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Είναι το απλούστερο που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση της αστοχίας των γεωυλικών. Θεωρεί ότι η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση τ σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο ενός σώματος ξεπεράσει τη διατμητική αντοχή, που είναι γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης σ_n στο επίπεδο αυτό.



Εικόνα 3. Χάραξη περιβάλλουσας αστοχίας πετρώματος κατά Mohr. (Σοφιανός και Νομικός, 2008)

$$\tau = c + \sigma_n * \tan\psi \quad \text{Εξίσωση 4}$$

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 * \tan\psi \quad \text{Εξίσωση 5}$$

Όπου σ_1 η μέγιστη, σ_3 η ελάχιστη κύρια τάση, ψ η κλίση και σ_c η τεταγμένη επί την αρχή στο επίπεδο σ_1 - σ_3 .

1.3 Σχολιασμός

Η κυριότερη αναλυτική μεθοδολογία για την εκτίμηση της ανισότροπης αντοχής της κερματισμένης βραχομάζας είναι αυτή του μεμονωμένου 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 καθορίζεται 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 μεμονωμένου 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 εμμονή των ασυνεχειών. Ασυνέχειες με μικρή εμμονή δημιουργούν «γέφυρες» άρρηκτου πετρώματος οι οποίες συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της αντοχής. Αντίθετα, βραχομάζα που περιέχει ασυνέχειες μεγάλης εμμονής παρουσιάζει μικρότερη διατμητική αντοχή. Το GSI ωστόσο δεν λαμβάνει υπόψη του άμεσα την εμμονή 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 μελλοντικά, αριθμητικές επιλύσεις θα είναι να θέση να βαθμονομήσουν, αν όχι να αντικαταστήσουν εντελώς, εργαλεία όπως το GSI και το κριτήριο Hoek – Brown.

1.3.1 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 ισοδύναμη 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 μή 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.

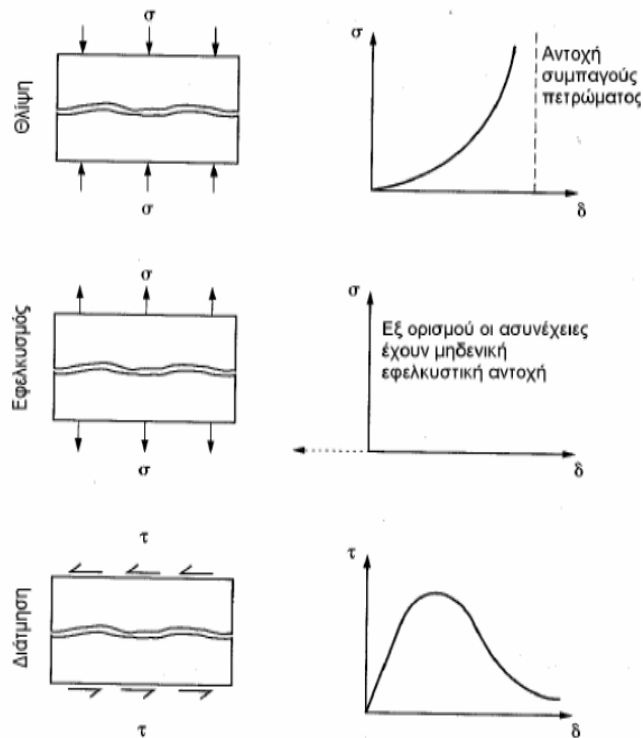
Σύμφωνα επίσης με την θεωρία του ενός επιπέδου αδυναμίας, η αστοχία ενός κερματισμένου πετρώματος εκδηλώνεται με δυο διακριτούς τρόπους, διατμητική ολίσθηση κατά μήκος των επιφανειών των ασυνεχειών ή θραύση του άρρηκτου πετρώματος. Σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί από διάφορους ερευνητές σε φυσικά ομοιώματα 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. 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. 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.

1.4 Κατακερματισμένη 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 στην **Εικόνα 4**. 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.



Εικόνα 4. Συμπεριφορά ασυνέχειας σε θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση (από Hudson and Harrison, 1997)

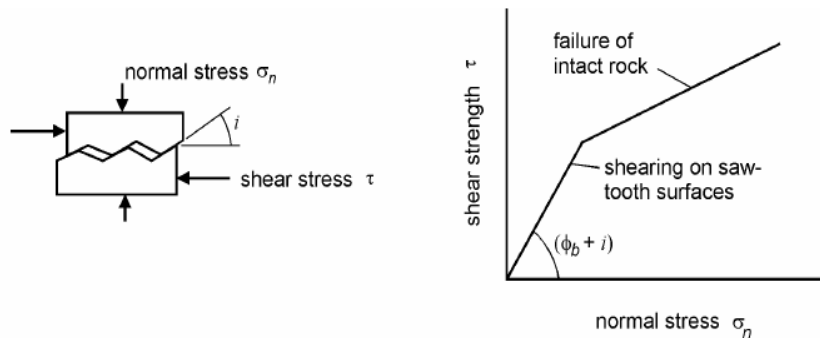
Σε μια λεία επιφάνεια η διατμητική αντοχή μπορεί να εκφραστεί από μια γραμμική περιβάλλουσα Mohr – Coulomb της μορφής:

$$\tau = \sigma \times \tan \phi \quad \text{Εξίσωση 6}$$

όπου ϕ η γωνία τριβής. Ωστόσο, πολύ σπάνια στη φύση συναντώνται τέτοιες λείες επιφάνειες. O Patton (1966) πραγματοποίησε πειράματα σε δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια ήταν τραχεία, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5**. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας εκφράζεται καλύτερα με το διγραμμικό κριτήριο.

$$\tau = \sigma \times \tan(\phi + i) \quad \text{Εξίσωση 7}$$

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



Εικόνα 5. 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). Πραγματοποιώντας δοκιμές σε φυσικές ασυνέχειες, πρότεινε ότι η εξίσωση του Patton μπορεί να γραφτεί ως εξής:

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

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 του κριτηρίου του Barton 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.

1.4.1 Καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb

Τα καταστατικά μοντέλα περιγράφουν, από την άποψη των φαινομενολογικών νόμων, τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης ενός υλικού ως προς τη συμπεριφορά μέσα σε ένα συνεχές μέσο. Μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: ελαστικά, πλαστικά και χρονικά εξαρτώμενα. Τα βασικά καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην εργασία μας είναι τα μοντέλα ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς Mohr-Coulomb και ubiquitous joint. Τα πλαστικά μοντέλα, σε αντίθεση με τα ελαστικά μοντέλα, περιλαμβάνουν κάποιο βαθμό μόνιμης παραμόρφωσης (αστοχία) ως συνέπεια της μη γραμμικότητας των σχέσεων τάσης -παραμόρφωσης (Itasca Consulting Group, 2008c). Έχουν επίσης τη δυνατότητα να αναπτύξουν εντοπισμό των ζωνών διάτμησης από την αρχή της διαρροής. Το τελευταίο είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό κατά τη μοντελοποίηση της βραχομάζας.

Το καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb περιγράφει την πλαστική διαρροή των γεωυλικών σε διάτμηση σύμφωνα με το γνωστό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Η αντοχή από το Mohr-Coulomb περιγράφεται μέσω της συνοχής και γωνίας τριβής, με την τελευταία να είναι μια γραμμική συνάρτηση της ορθής τάσης. Συνήθως προτιμάται για υλικά με αντοχή σε θλίψη που υπερβαίνει κατά πολύ την αντοχή σε εφελκυσμό, όπως σε πετρώματα, εδάφη ή σκυρόδεμα. Είναι ένα από τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη γεωτεχνική μηχανική. Μόλις ένα στοιχείο φθάσει στην κατάσταση διαρροής, πρέπει να υποστηριχθούν περαιτέρω αυξήσεις της τάσης από γειτονικά στοιχεία, τα οποία με τη σειρά τους μπορεί να διαρρεύσουν, προκαλώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση που οδηγεί σε μεγάλες παραμορφώσεις. Επειδή η αναπαράσταση είναι συνεχούς μέσου, η καταστροφική αστοχία δεν είναι σαφής (δηλαδή το πλέγμα δεν διαχωρίζεται) αλλά πρέπει να ερμηνευθεί χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό δεικτών πλαστικότητας, μετατοπίσεων και ταχύτητας κόμβων-σημείων πλέγματος. (*Itasca Consulting Group Inc., 2008c*).

Το MC έχει κάποιους περιορισμούς που επιλύονται με το UJ:

- Το τέλεια ελαστοπλαστικό μοντέλο μπορεί να υπερεκτιμήσει την αντοχή της βραχομάζας ειδικά σε υψηλές τάσεις.
- Παρέχει περιορισμένο εύρος ένδειξης διατμητικών μηχανισμών αστοχίας.
- Δεν παρέχει όρια στις τάσεις που μπορούν να προσδιορίσουν πιθανή συσχέτιση της συμπεριφοράς της βραχομάζας με το χρόνο.

1.4.2 Καταστατικό μοντέλο απανταχού ασυνεχειών (*ubiquitous joints*)

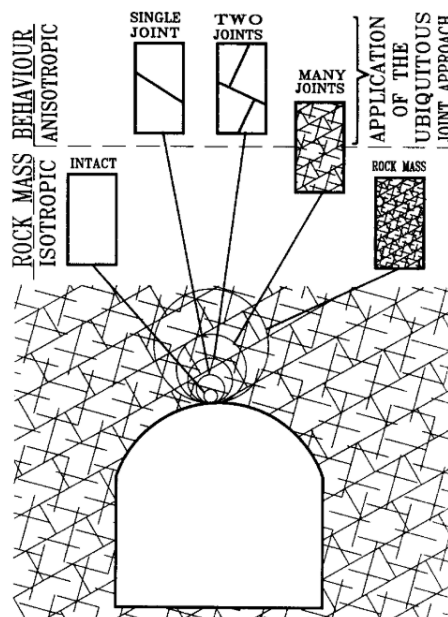
Η μηχανική συμπεριφορά αυτών των ασυνεχειών, η διατμητική παραμόρφωση καθώς και η χωρική διαμόρφωση τους, θα πρέπει να εμπλέκονται στα καταστατικά μοντέλα που έχουν καθοριστεί για την βραχώμαζα με ασυνέχειες (*jointed rock mass*). Πειραματικές έρευνες, συμπεριλαμβανομένων *in situ* δοκιμών και εργαστηριακών δοκιμών, αποκάλυψαν ότι η παρουσία ασυνεχειών μειώνει τη αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του πετρώματος. Οι βαθμοί αυτών των μειώσεων διέπονται από παράγοντες όπως ο τρόπος διαμόρφωσης της ασυνέχειας και οι μηχανικές ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος και των ασυνεχειών. Από έρευνες προκύπτει ότι ενδέχεται να προκύψουν διάφοροι τρόποι αστοχίας ανάλογα με τη διαμόρφωση της ασυνέχειας και τα εφαρμοζόμενα φορτία. Οι διαφορετικοί τρόποι αστοχίας έχουν άμεση επίδραση στις μακροσκοπικές μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων.

Η παρουσία ασυνεχειών επιβάλλει ανισοτροπία στη βραχώμαζα, η κατεύθυνση της οποίας σχετίζεται άμεσα με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών. Εμπειρικοί συσχετισμοί με βάση τα αποτελέσματα πειραμάτων ή αριθμητικών αναλύσεων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη γενίκευση των δεικτών που αξιολογούν την ανισοτροπία της αντοχής και της παραμόρφωσης. Αυτά τα μοντέλα εισάγουν ασυνέχειες στο αρχικά ισότροπο άρρηκτο πέτρωμα. Μαθηματικά μοντέλα και αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης. Υπολογιστικές προσεγγίσεις βασισμένες στη μηχανική συνεχούς μέσου, στις οποίες η επίδραση των ασυνεχειών εξετάζεται μέσω της έννοιας των διακριτών στοιχείων έχουν προταθεί. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να εκτιμήσουν περαιτέρω την ανισοτροπική αντοχή και την παραμόρφωση βραχώμαζας έως ότου το φορτίο φθάσει στην μέγιστη αντοχή. Άλλες προσομοιώσεις χρησιμοποιούν κώδικα ροής σωματιδίων (*particle flow code*) και μπορεί επίσης να προσομοιώνουν διάφορους τρόπους αστοχίας και τη συμπεριφορά μετά τη κορυφαία αντοχή.

Ωστόσο, οι μικροσκοπικές μηχανικές παράμετροι που απαιτούνται για τον κώδικα, π.χ. η αντοχή και η δυσκαμψία των δεσμών μεταξύ των σωματιδίων, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν από συμβατικές δοκιμές. Εκτός αυτού, ο αριθμός των σωματιδίων και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτούνται αυξάνονται σημαντικά με το μέγεθος του πεδίου ανάλυσης. (Wang & Huang, 2009)

Η κατανόηση της συμπεριφοράς της διακλασμένης βραχώμαζας παραμένει βασικό ζήτημα για τη βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού των υπόγειων εκσκαφών. Κατά την ανάλυση διαδοχικών σταδίων εκσκαφής σε υπόγειο περιβάλλον, είναι σημαντικό να μελετήσουμε την περίπλοκη κατευθυντική φύση των προκαλούμενων αλλαγών των τάσεων και τη χωρική μεταβολή τόσο του μεγέθους όσο και του προσανατολισμού τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε βραχώμαζες με διακριτά επίπεδα αδυναμίας. Αλλαγές στο τοπικό μέγεθος τάσεων και στον προσανατολισμό επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά ολίσθησης των ασυνεχειών. Ακόμα κι αν το σχετικό μέγεθος των τάσεων παραμένει αμετάβλητο, μια περιστροφή του ταυστή της τάσης μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση κατά μήκος μιας ασυνέχειας ή επιπέδου αδυναμίας.

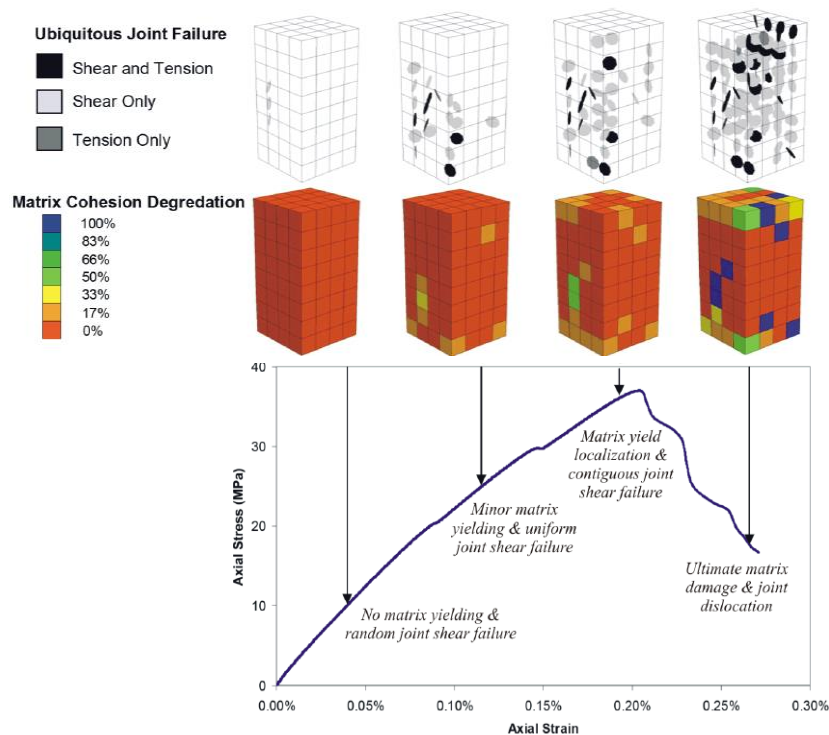
Είναι γενικά αποδεκτό ότι η ύπαρξη επιπέδων αδυναμίας δεν θα πρέπει να επηρεάζει αισθητά τις ελαστικές ιδιότητες μιας βραχώμαζας υπό μέτρια έως υψηλή πίεση. Επομένως, η γραμμική ελαστική μοντελοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των αντιπροσωπευτικών τάσεων πριν από την έναρξη της αστοχίας. Οι ασυνέχειες δεν επιδρούν έως ότου η τάση διάτμησης που ενεργεί πάνω τους υπερβαίνει την αντοχή. Η κατεύθυνση της κίνησης κατά την έναρξη της διάτμησης θα πρέπει να συμπίπτει με την κατεύθυνση της μέγιστης τάσης διάτμησης στο επίπεδο ολίσθησης αμέσως πριν από την υπέρβαση της αντοχής. Πέρα από αυτό το σημείο, η γραμμική ελαστική ανάλυση δεν μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τη διάδοση της αστοχίας. Ωστόσο, οι Hoek και Brown δηλώνουν ότι υπάρχει μια λογική συσχέτιση μεταξύ της ζώνης υπερφόρτισης του πετρώματος που προβλέπεται από την ελαστική θεωρία και τις απαιτήσεις ευστάθειας και στήριξης των υπόγειων εκσκαφών. Επίσης, οι Kaiser et al. έχουν δείξει με σύγκριση ελαστικών και πλαστικών αναλύσεων, ότι οι πιθανές ζώνες ολίσθησης είναι σχεδόν πανομοιότυπες με τις ζώνες διάτμησης, αρκεί η έκταση αυτών των ζωνών να περιορίζεται σε ζώνες που εκτείνονται σε βάθος μικρότερο από 10-20 % του μεγέθους του ανοίγματος.



Εικόνα 6. Δυνατότητα εφαρμογής ανάλυσης με ubiquitous joint μοντέλο (Kazakidis & Diederichs, 1993)

Το μοντέλο Ubiquitous joint δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση μεγάλων δομών όπως ρήγματα. Η συμπεριφορά τους μελετάται με διακριτά στοιχεία ή με συνδυασμό και των δύο τύπων μοντέλου. Οι συσχετίσεις μεταξύ της σεισμικότητας που προκαλείται από την εξόρυξη και της ελαστικής μοντελοποίησης μέσω των ubiquitous joints περιορίζονται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει σχέση μεταξύ της σεισμικότητας και της διατμητικής αστοχίας. Ένα προτεινόμενο εύρος εφαρμοσιμότητας της προσέγγισης από τους Hoek και Brown, φαίνεται στην Εικόνα 6. Οι ακριβείς περιορισμοί της προσέγγισης θα πρέπει να αξιολογούνται για διαφορετικά προβλήματα βραχομηχανικής πριν εφαρμοστεί η μέθοδος για το σχεδιασμό.

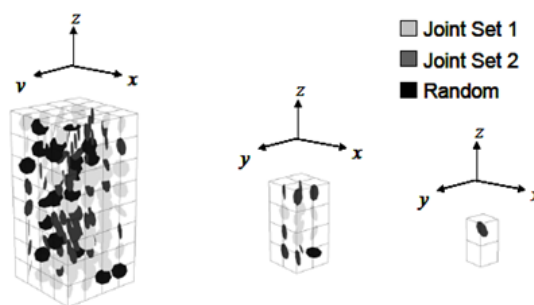
Μερικές από τις πιο απαιτητικές πτυχές του σχεδιασμού σε βραχώμαζα μέτριας έως πυκνής πυκνότητας ασυνεχειών σχετίζονται με την επίδραση της δομής της βραχομάζας στη μηχανική της συμπεριφορά. Συγκεκριμένη διεύθυνση ασυνεχειών μπορεί να προκαλέσει μια σημαντική ανισοτροπία στην παραμορφωσιμότητα, στην αντοχή και στην ψαθυρότητα. Επιπλέον, η πυκνότητα των ασυνεχειών και η εμμοχή πρέπει να ληφθούν υπόψη σε σχέση με το μέγεθος του προβλήματος, καθώς οι ιδιότητες της βραχομάζας μπορούν να εμφανίζουν σημαντική εξάρτηση από την κλίμακα. Η τεχνική της συνθετικής βραχομάζας (Synthetic Rock Mass, SRM) παρέχει ένα μέσο για μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών βραχομάζας κλίμακας από 10 έως 100 μέτρα.



Εικόνα 7. Στάδια αστοχίας σ'ένα UJRM μοντέλο (Sainsbury et al., 2008)

Οι Sainsbury et al. (2008) ανέπτυξαν ένα μοντέλο SRM-Ubiquitous Joint Rock Mass (UJRM) για να εξηγήσουν την αντοχή της βραχομάζας και την ανισοτροπία σε μοντέλα συνεχούς μέσου FLAC3D μεγάλης κλίμακας. Η μέθοδος τους διαφέρει από εκείνη των Pierce et al. (2007) και Mas Ivars et al. (2008) δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιεί κάποιον κώδικα διακριτών στοιχείων, όπως το PFC3D, αλλά ένα κώδικα προσομοίωσης συνεχούς μέσου, το FLAC3D, και απανταχού ασυνέχειες για να εκτιμήσει τις ιδιότητες της βραχομάζας από προσομοιώσεις μικρότερων

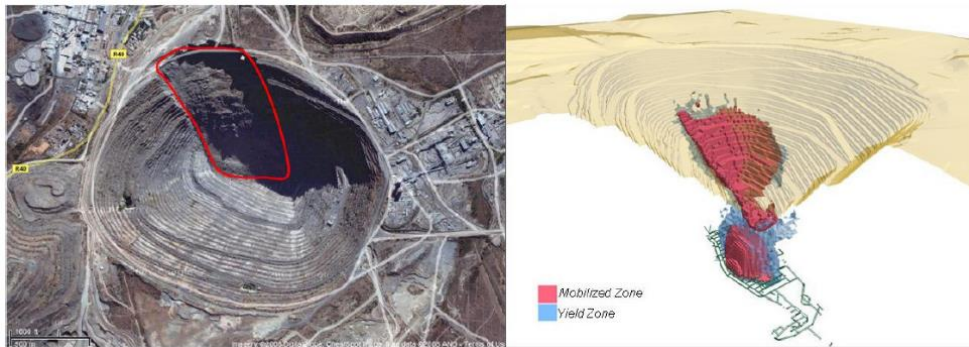
δοκιμαστικών δειγμάτων μοντέλου Εικόνα 8. Οι ιδιότητες ασυνεχειών UJRM εκχωρούνται σε κάθε ζώνη του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Clark (2006), δηλ. οι ασυνέχειες και η διεύθυνσή τους καθορίζονται σε κάθε ζώνη σύμφωνα με προκαθορισμένες αναλογίες από δεδομένα στερεογραφικών δικτύων. Εφάρμοσαν τη μέθοδο SRM-UJRM σε μια πραγματική περίπτωση μελέτης, για την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας στο ορυχείο Palabora στη Νότια Αφρική, για την επικύρωση της μεθόδου τους. Μετά τη βαθμονόμηση με το δείγμα SRM, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου (Young) μειώθηκε κατά 50 έως 70% από τις αρχικές ιδιότητες του άρρηκτου, η τριβή του άρρηκτου, η συνοχή και η εφελκυστική αντοχή μειώθηκαν στο 80% των εργαστηριακών τιμών UCS, η συνοχή της ασυνέχειας θεωρήθηκε μεταξύ 0,1 και 1% της συνοχής του άρρηκτου, οι γωνίες τριβής των ασυνεχειών ρυθμίστηκαν για κάθε λιθολογία σύμφωνα με τη δοκιμή SRM και η αντοχή εφελκυσμού των ασυνεχειών ρυθμίστηκε στο μηδέν. (Sainsbury et al., 2008)



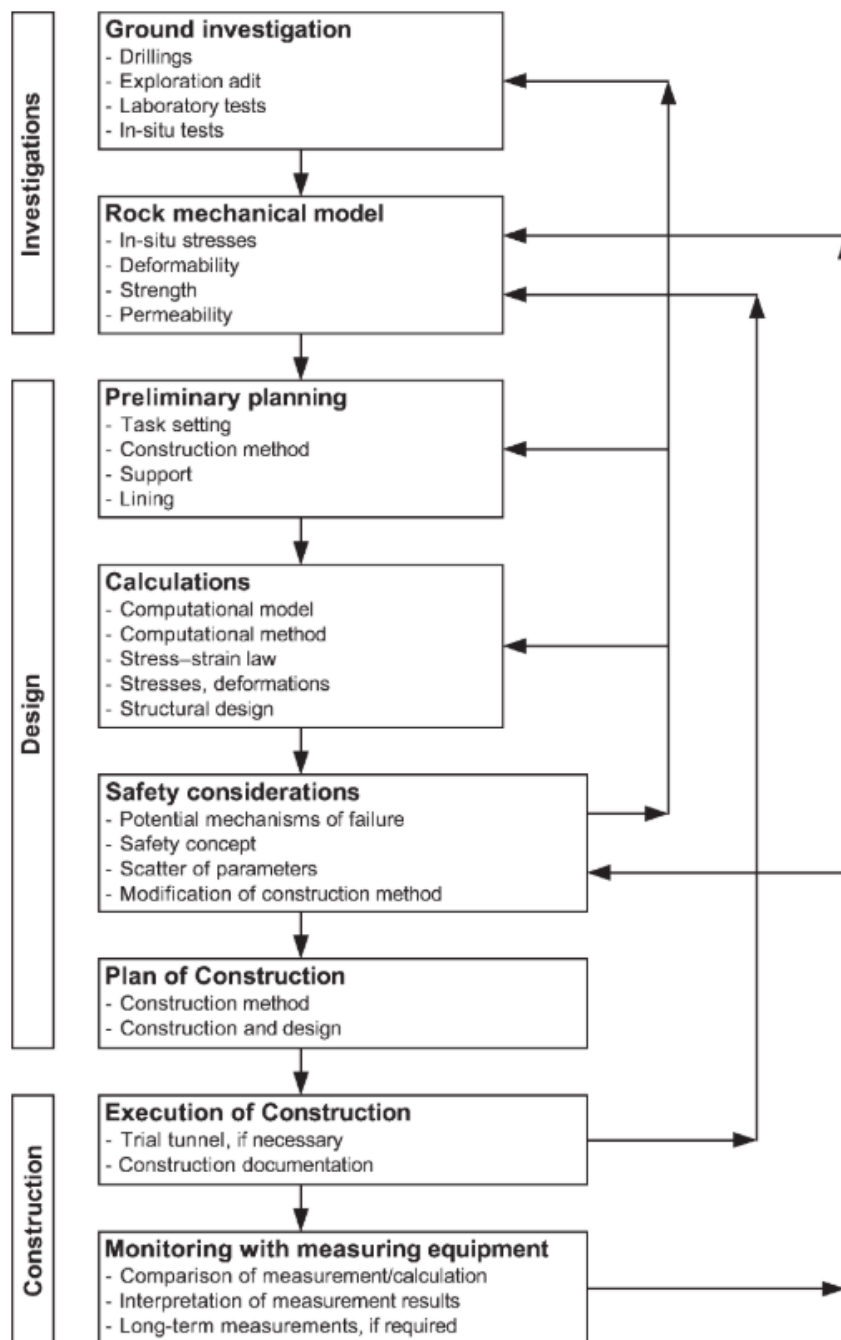
Εικόνα 8. Τρισδιάστατη SRM τεχνική για την αξιολόγηση απόκρισης βραχομάζας γύρω από μεγάλο όρυγμα. (Sainsbury et al., 2008)

Η μέθοδος SRM-UJRM εκτελεί προσομοιώσεις που συνάδουν περισσότερο με τη συμπεριφορά μιας πραγματικής βραχομάζας από εκείνες που παράγονται χρησιμοποιώντας εμπειρικά κριτήρια που εφαρμόζονται μέσω των καταστατικών νόμων του ελαστο-πλαστικού μέσου. Η ικανότητά της να λαμβάνει υπόψιν την κλίμακα και να απεικονίζει την ανισοτροπία και ετερογένεια βραχομάζας τονίζει τις δυνατότητές της. Ανάμεσα στους περιορισμούς περιλαμβάνονται η περιορισμένη εμπειρία στη χρήση του μοντέλου, ο περισσότερος χρόνος, η χρήση περισσότερων από ενός κωδικών λογισμικού και η απώλεια σύνδεσης μεταξύ του τελικού μοντέλου και των δεδομένων πεδίου και εργαστηρίου. Το τελευταίο υπονοεί ότι κάθε φορά που αποκτώνται νέα δεδομένα, το μοντέλο SRM πρέπει να εκτελείται εκ νέου εκτός από το μοντέλο FLAC3D και το πιο σημαντικό, η βαθμονόμηση του μοντέλου FLAC καθίσταται πιο δύσκολη, επειδή οι ακριβείς παράγοντες που επηρεάζουν τη μείωση ιδιοτήτων διαφορετικής αντοχής είναι άγνωστες. Τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στο μοντέλο SRM είναι υπολογιζόμενες φυσικές ιδιότητες, ωστόσο, τα δεδομένα που βγαίνουν είναι το αποτέλεσμα ενός άνισου συνδυασμού των ιδιοτήτων εισαγωγής.

Οι Li et al. εφάρμοσαν το μοντέλο ubiquitous joint στο ορυχείο Shouda στην Οκαγιάμα της Ιαπωνίας. Η προσομοίωση με χρήση πεπερασμένων διαφορών του κώδικα FLAC είναι ιδανική για μοντελοποίηση γεωμηχανικών προβλημάτων που αποτελούνται από διάφορα στάδια όπως διαδοχική εκσκαφή και υποστήριξη. Μπορεί να δείξει μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις καθώς επίσης μη γραμμική συμπεριφορά υλικού. Μελετώντας την κατανομή των τάσεων, τις μετατοπίσεις και τον συντελεστή ασφαλείας, αξιολόγησαν την ευστάθεια της εκσκαφής και παρουσίασαν προτάσεις για τη διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης. Συζήτησαν περαιτέρω τη μεθοδολογία της μεθόδου αριθμητικής μοντελοποίησης.



Εικόνα 9. Μηχανισμός αστοχίας του ορυχείου Palabora με την τεχνική SRM-UJRM (Sainsbury et al., 2008)



Εικόνα 10. Σχεδιασμός με μηχανικά μοντέλα βραχομηχανικής (Wittke, 2014)

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

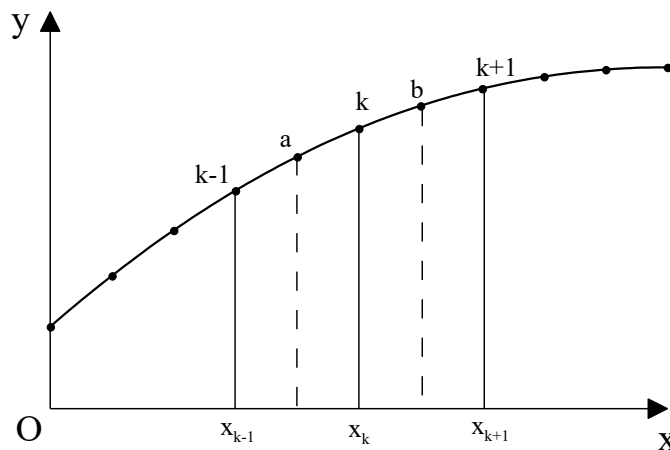
2.2 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM)

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 εκφραστεί 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 10

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



Εικόνα 11. 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 εκφρασθεί ως εξής:

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

Εξίσωση 11

Γεωμετρικά η **Εξίσωση 11** 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 **Εξίσωση 11** 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 11** όμως είναι και:

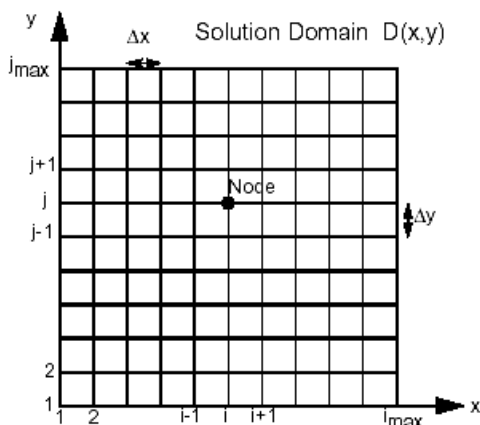
$$\left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_b} = \frac{f_{k+1} - f_k}{B} \quad \text{και} \quad \left(\frac{df}{dx}\right)_{x=x_a} = \frac{f_k - f_{k-1}}{B}$$

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 12

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 κάναβο. Η παρακάτω **Εικόνα 12** απεικονίζει έναν απλό κάναβο 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.



Εικόνα 12. Απλός κάναβος 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.

2.3 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών στο πρόγραμμα FLAC

2.3.1 Γενικά

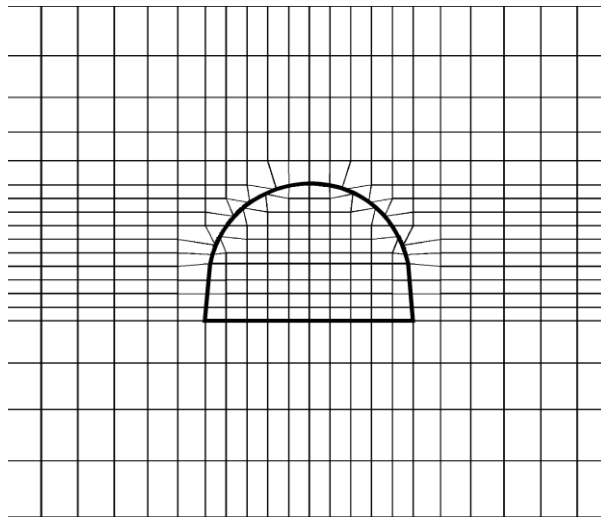
Το FLAC 6.0 είναι ένα διδιάστατο πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη συμπεριφορά διάφορων δομών, όπως εδάφη, πετρώματα ή και άλλων σχηματισμών, οι οποίοι παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά, όταν αυτές ξεπεράσουν τα όρια αντοχής τους. Τα υλικά αυτά προσομοιώνονται από στοιχεία (elements), ή ζώνες (zones), οι οποίες στο σύνολό τους αποτελούν έναν κানাβο (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 καναβου, 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 διδιάστατων γεωτεχνικών προβλημάτων, η επιφάνεια του προβλήματος χωρίζεται σε στοιχεία του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους (τετράπλευρα ή τρίγωνα) γνωστής γεωμετρίας και ιδιοτήτων, δημιουργώντας έτσι ένα κানাβο, 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 οποίο έχει επιλεγεί επειδή υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις ότι αντιπροσωπεύει καλύτερα από οποιοδήποτε άλλο την συμπεριφορά του υλικού, όταν τούτο καταπονείται.

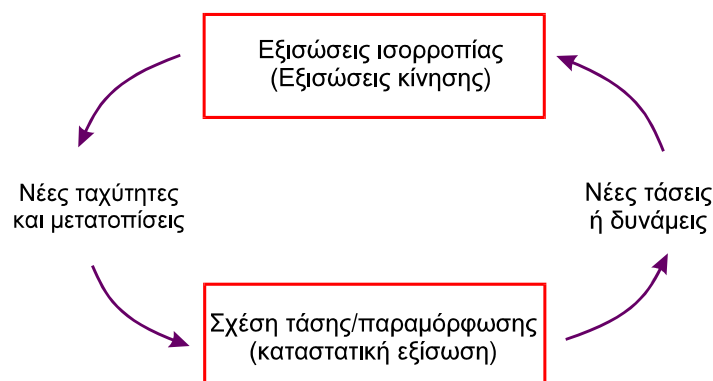
Κατά τη επιλογή αυτή λαμβάνεται υπόψη ο χαρακτηρισμός του υλικού από πλευράς συμπεριφοράς (γραμμικώς ελαστικό, ελαστοπλαστικό κτλ.) και ανισοτροπίας και επιλέγεται εκείνο το κριτήριο αστοχίας (Mohr-Coulomb κτλ.) που περιγράφει καλύτερα την οριακή εντατική

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. Στην **Εικόνα 13** δείχνεται ο τρόπος διαχωρισμού μίας βραχόμαζας, που περιβάλλει την διατομή σήραγγας, στην περίπτωση εφαρμογής του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC.



Εικόνα 13. 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 στην **Εικόνα 14**. Κατά τη διαδικασία της **Εικόνα 14**, 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 μεταβολής 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 κανάβου του προσομοιώματος.



Εικόνα 14. Διάγραμμα ροής του κύκλου υπολογισμών που πραγματοποιείται στο FLAC.

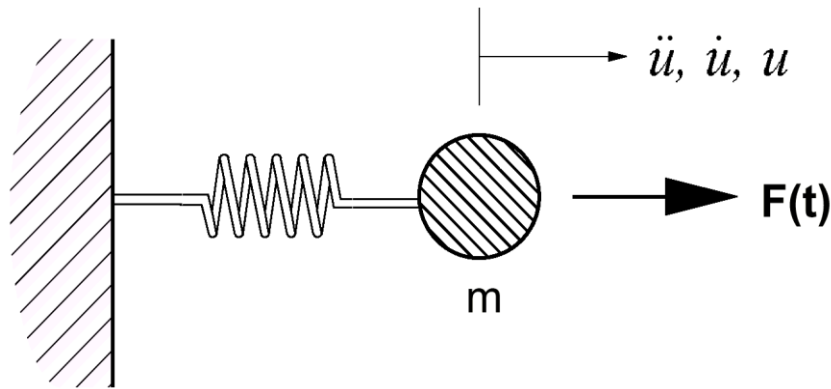
2.3.2 Εξισώσεις κίνησης και ισορροπίας

Το FLAC χρησιμοποιεί για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος, στατικού ή δυναμικού, την εξίσωση της κίνησης, η οποία στην απλούστερη μορφή της γράφεται **Εικόνα 14**:

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

Εξίσωση 13

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



Εικόνα 15. Εφαρμογή δύναμης $F=F(t)$ σε μάζα m , που προκαλεί τη μονοδιάστατη κίνηση της μάζας.

Προκειμένου για ένα συνεχές μέσο η **Εξίσωση 13** γενικεύεται ως εξής:

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

Εξίσωση 14

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 13** και στις επόμενες ο δείκτης i υποδηλώνει συνιστώσα σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων. Με τη χρησιμοποίηση των **Εξίσωση 13** και **Εξίσωση 14** εξασφαλίζεται η αριθμητική ευστάθεια της επίλυσης του προβλήματος ακόμη και σε περιπτώσεις μηχανικής αστάθειας του φυσικού προβλήματος (π.χ. αιφνίδια αστοχία ενός στύλου).

2.3.3 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 η **Εικόνα 13** από τέσσερις κόμβους (ή αλλιώς δικτυοσημεία) σχηματίζοντας τελικά ένα κανάβο 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 15** ο οποίος περιγράφει την παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Εξίσωση 15}$$

όπου:

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

\dot{u}_i οι συνιστώσες της ταχύτητας

Οι καταστατικοί νόμοι είναι της μορφής **Εξίσωση 16**:

$$\sigma_{ij} := M(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, \kappa) \quad \text{Εξίσωση 16}$$

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 17** και αφορά την περίπτωση ενός ισότροπου ελαστικού υλικού:

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + \left\{ \delta_{ij} \left(K - \frac{2}{3} G \right) \dot{\epsilon}_{kk} + 2G \dot{\epsilon}_{ij} \right\} \Delta t \quad \text{Εξίσωση 17}$$

όπου:

δ_{ij} = το δέλτα του Kronecker

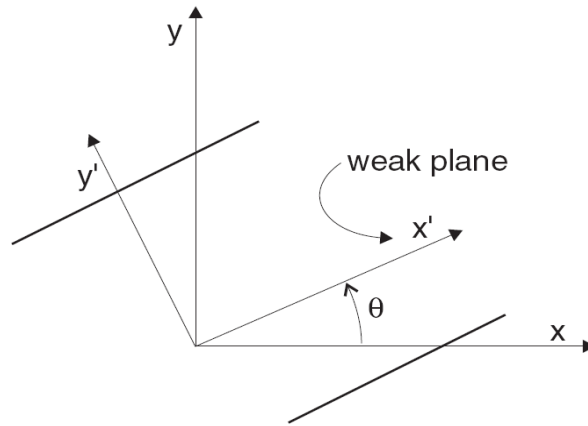
Δt = χρονικό βήμα

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

Οι ρυθμοί μεταβολής των παραμορφώσεων σε κάθε σημείο του κανάβου υπολογίζονται από τη **Εξίσωση 15**. Οι τάσεις σε κάθε ζώνη προκύπτουν από τη σχέση **Εξίσωση 16**.

2.3.4 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.



Εικόνα 16. Παρουσία διεύθυνσης ασυνέχειας με κλίση θ σε υλικό Mohr – Coulomb στο αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων (x,y,x',y') (Li et al., 2003)

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

Εξίσωση 18

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

Εξίσωση 19

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

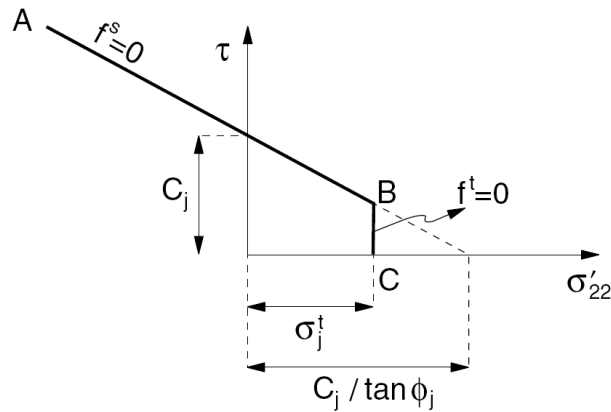
Εξίσωση 20

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

Εξίσωση 21

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. 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. (Li et al., 2003)



Εικόνα 17. 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:

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

Εξίσωση 22

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 23

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

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

Εξίσωση 24

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 άξονα 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

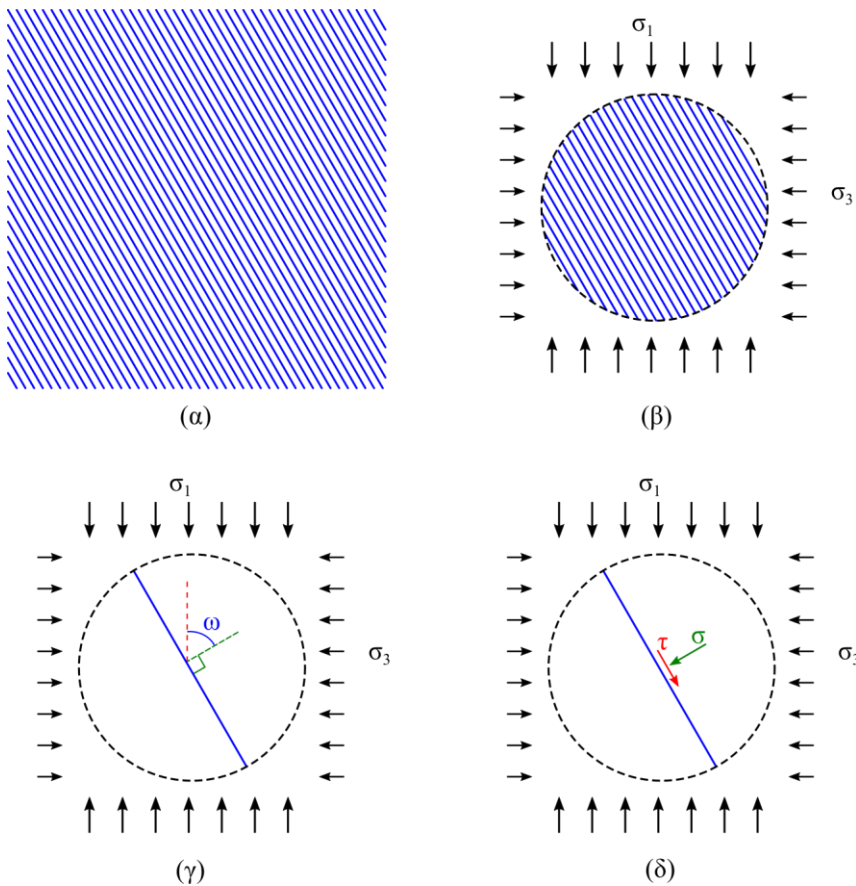
3.1 Θεωρία μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας

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.

Στην **Εικόνα 18(α)** φαίνεται βραχομάζα με ένα σύνολο ασυνεχειών μεγάλης εμμορφής, ενώ στο **Εικόνα 18(β)** φαίνεται τμήμα της βραχομάζας που φορτίζεται με κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 . Στην **Εικόνα 18(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 **Εικόνα 18(δ)** που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\omega \quad \text{Εξίσωση 25}$$

$$|\tau| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\omega \quad \text{Εξίσωση 26}$$



Εικόνα 18. (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 στην **Εικόνα 19**, η μέγιστη κύρια τάση, που απαιτείται για να συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια, μπορεί να υπολογιστεί την ορθή και διατμητική τάση από τις **Εξίσωση 25** και **Εξίσωση 26** στο κριτήριο διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb. Ύστερα από πράξεις προκύπτει:

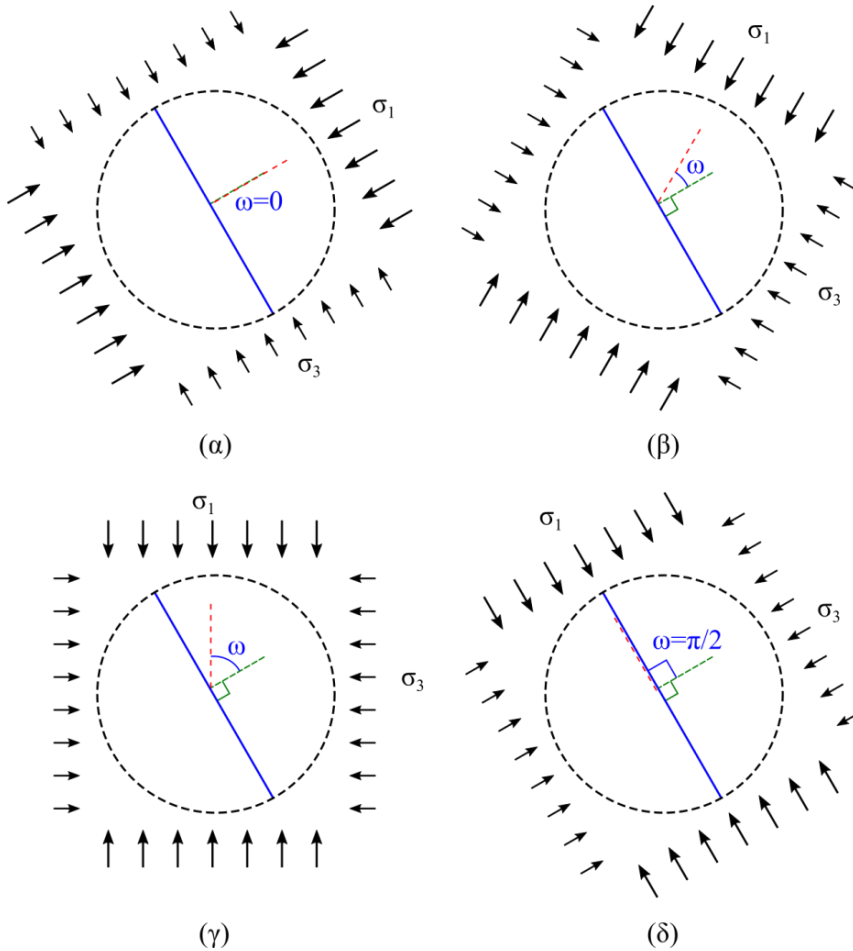
Εξίσωση 27

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

$\csc(\cdot)=1/\sin(\cdot)$ είναι η συντέμνουσα και $\cot(\cdot)=1/\tan(\cdot)$ η συνεφαπτομένη. Η **Εξίσωση 27** 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 27 για $\omega=\pi/4+\varphi_j/2$:

Εξίσωση 28

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



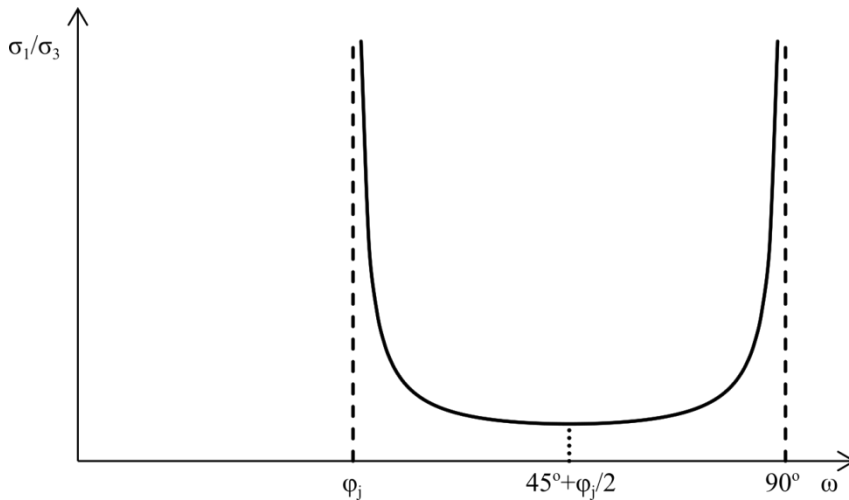
Εικόνα 19. Μεταβολή του προσανατολισμού του εντατικού πεδίου (Νομικός 2015).

Η **Εξίσωση 27** σχεδιάζεται στην **Εικόνα 20**, 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 29

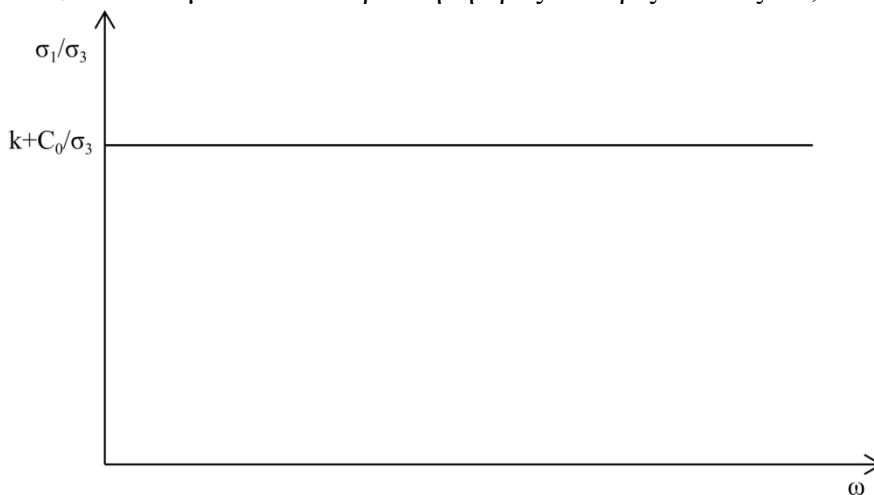
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = k + C_0/\sigma_3 \geq 0 , \quad \sigma_3 > 0$$

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



Εικόνα 20. Λόγος σ_1/σ_3 για να συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια συναρτήσει της γωνίας ω σύμφωνα με την εξίσωση 33.

Η Εξίσωση 29 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 στην **Εικόνα 21**.



Εικόνα 21. Γραφική παράσταση αντοχής άρρηκτου πετρώματος σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την εξίσωση 39.

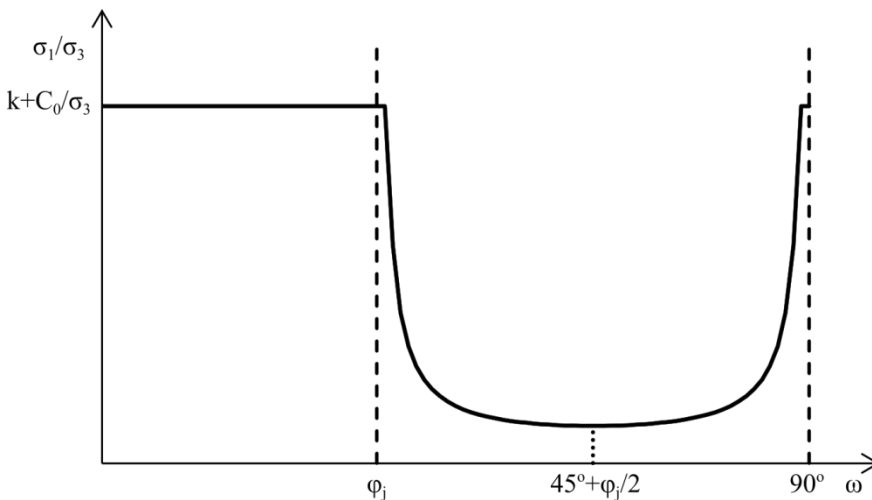
Η αντοχή του τμήματος της βραχομάζας με μία ασυνέχεια για κάθε γωνία ω μπορεί να προκύψει ως η ελάχιστη τιμή μεταξύ αντοχής της ασυνέχειας και της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος:
Εξίσωση 30

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

Η γραφική παράσταση της Εξίσωση 30 σχεδιάζεται στην **Εικόνα 22** 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 στην **Εικόνα 22** 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 την **Εικόνα 22** ισχύει και για το τμήμα της βραχομάζας στην **Εικόνα 18(β)**.



Εικόνα 22. Γραφική παράσταση της μεταβολής της αντοχής τμήματος βραχομάζας με μία ασυνέχεια σε διάγραμμα αξόνων $\sigma_1/\sigma_3-\omega$ σύμφωνα με την Εξίσωση 30.

Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η αντοχή βραχομάζας που περιέχει περισσότερα από ένα σύνολα ασυνεχειών, όπου η αντοχή του τμήματος της βραχομάζας προκύπτει ως η ελάχιστη τιμή μεταξύ της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και της αντοχής των ασυνεχειών κάθε συνόλου. Για δύο σύνολα ασυνεχειών η σχέση που δίνει την αντοχή θα είναι (Νομικός 2015):

Εξίσωση 31

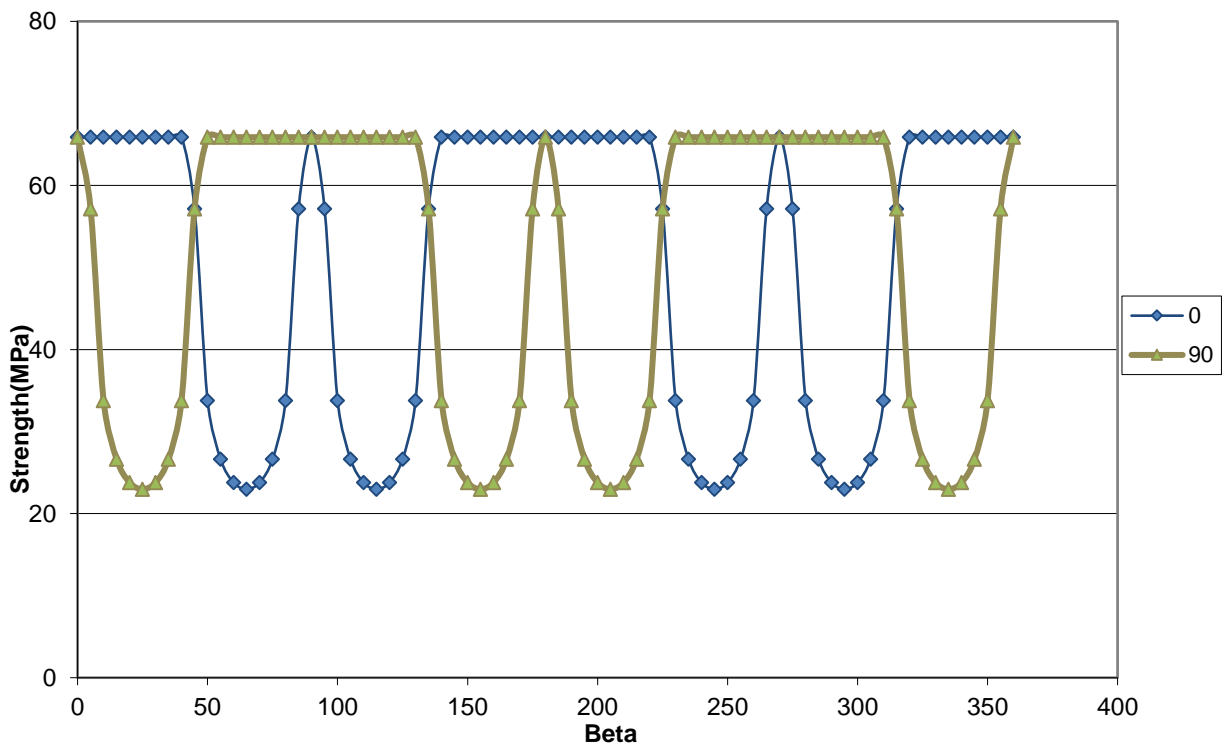
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{2|\csc 2\omega_1|}{\cot \varphi_{j1} - |\cot \omega_1|} \geq 0 \\ 1 + \frac{2|\csc 2(\omega_1 - \alpha_{12})|}{\cot \varphi_{j2} - |\cot(\omega_1 - \alpha_{12})|} \geq 0 \\ k + \frac{C_0}{\sigma_3} \geq 0 \end{array} \right. , \quad \sigma_3 > 0$$

ω_1 είναι η γωνία που σχηματίζει η κάθετος στην ασυνέχεια του συνόλου 1 με τη διεύθυνση της σ_1 και α_{12} η γωνία μεταξύ των συνόλων 1 και 2.

3.2 Εφαρμογή σε ρωγματωμένο δοκίμιο με δύο ασυνέχειες

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 ακολουθούν επίσης το γραμμικό κριτήριο Coulomb με γωνία τριβής $\phi_j=30^\circ$ και μηδενική συνοχή ($c_j=0$). Με εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει στην **Εικόνα 23** η μονοαξονική αντοχή ενός δοκιμίου της βραχομάζας με δυο ασυνέχειες κάθετες μεταξύ τους συναρτήσει της γωνίας κλίσης της πρώτης ασυνέχειας. Για την πρώτη ασυνέχεια μεμονωμένα, η αντοχή περιγράφεται στο διάστημα γωνίας κλίσης $0^\circ-90^\circ$ από μία σκαφοειδή καμπύλη για γωνίες κλίσεις της ασυνέχειας μεγαλύτερες της γωνίας τριβής με ελάχιστη τιμή τη γωνία των $45+\phi/2=60^\circ$. Με την παρουσία των δύο ασυνεχειών, παρατηρείται ότι η αντοχή του ρωγματωμένου δοκιμίου αυξάνεται και μειώνεται συναρτήσει της γωνίας κλίσης των ασυνεχειών, δεικνύοντας έντονα ανισότροπη συμπεριφορά. Με το μπλε χρώμα απεικονίζεται η 1^η ασυνέχεια και με το ανοιχτόχρωμο η 2^η, η οποία είναι κάθετη στη πρώτη.

Αναλυτικός υπολογισμός



Εικόνα 23. Γραφική παράσταση της μεταβολής της τριαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με δύο κάθετες μεταξύ τους ασυνέχειες για πλευρική πίεση 5MPa.

3.3 Αντοχή δοκιμίου με μη εμμένουσες ασυνέχειες- 3^η Σειρά

Κατά τους Harrison & Hudson (2000), η συνοχή στο επίπεδο της μη-επίμονης ασυνέχειας μπορεί να υπολογιστεί από τον σταθμισμένο μέσο όρο της συνοχής του πετρώματος και της ίδιας της ασυνέχειας:

Εξίσωση 32

$$S_{av} = wS_j + (1 - w)S_0$$

S_{av} είναι η σταθμισμένη συνοχή και S_j η συνοχή της ίδιας της ασυνέχειας. w είναι ο λόγος του συνολικού μήκους του ίχνους των τμημάτων της ασυνέχειας προς το συνολικό μήκος του επιπέδου διάτμησης (**Εικόνα 170**). Οι Halakatevakis & Sofianos (2010) χρησιμοποίησαν την παραπάνω μεθοδολογία για να υπολογίσουν αναλυτικά την αντοχή τμήματος βραχομάζας με δύο σύνολα ασυνεχειών με εμμονή 100% ($w=1$) και 50% ($w=0.5$) αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αναλυτικών επιλύσεων με αριθμητικές προσομοιώσεις του ίδιου προβλήματος, εντόπισαν μικρές μόνο διαφορές στην υπολογιζόμενη αντοχή. Εκτός και εάν είναι επουλωμένες, η συνοχή των ασυνεχειών συνήθως είναι μηδέν (π.χ. Barton 2013) ή πρακτικά αμελητέα σε σχέση με τη συνοχή του άρρηκτου πετρώματος. Θεωρώντας $S_j=0$, η παραπάνω σχέση γράφεται ως:

Εξίσωση 33

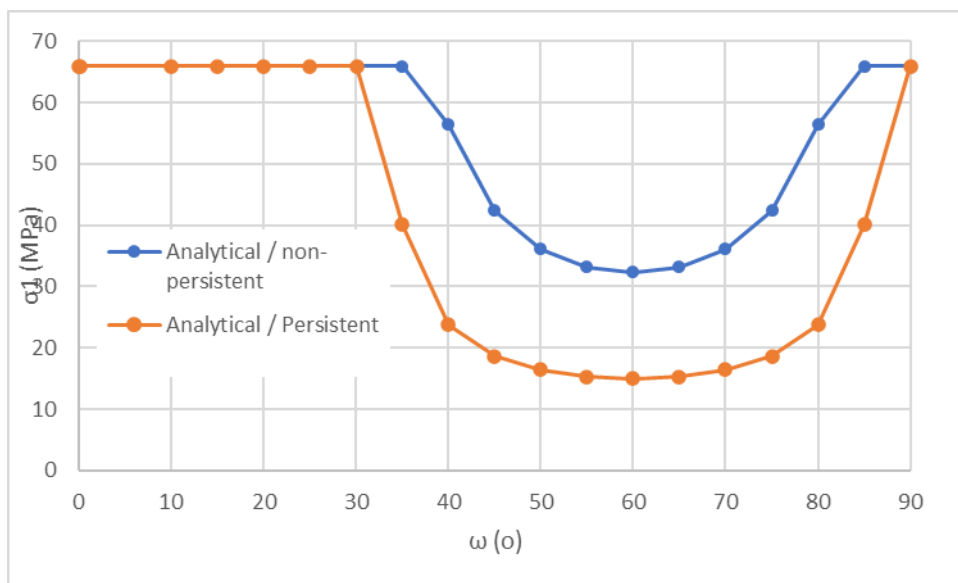
$$S_{av} = (1 - w)S_0$$

Η αντοχή του ρωγατωμένου δοκιμίου με μία μη εμμένουσα ασυνέχεια γίνεται:

Εξίσωση 34

$$\sigma_1/\sigma_3 = 1 + \frac{2(S_{av}/\sigma_3 + \tan \varphi_j)}{(1 - |\cot \omega| \cdot \tan \varphi_j) \cdot |\sin 2\omega|}$$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις για $w=0.5$, $\sigma_3=5\text{MPa}$, $\varphi_j=30$, $S_j=0$ και μέσω των παραπάνω σχέσεων, προέκυψε η αναλυτική λύση μη εμμενουσών ασυνεχειών στο επόμενο διάγραμμα. Για σύγκριση, στο ίδιο διάγραμμα δίνεται και η αντοχή του δοκιμίου για εμμένουσα ασυνέχεια ($w=0$)



Εικόνα 24. Γραφική παράσταση της μεταβολής της τριαξονικής αντοχής τμήματος βραχομάζας με μια οικογένεια μη εμμενουσών (μπλε) και συνεχών ασυνεχειών (πορτοκαλί) για πλευρική πίεση 5MPa

Παρατηρούμε ότι για γωνίες κλίσης ασυνεχειών μεγαλύτερες της γωνίας τριβής η αντοχή βραχομάζας με σύστημα μη εμμενουσών ασυνεχειών είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνης με συνεχείς ασυνέχειες. Για γωνία κλίσης μικρότερης του φ_j δεν παρατηρείται αλλαγή.

3.4 Εμπειρικός υπολογισμός αντοχής διακλασμένης βραχομάζας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο εμπειρικός υπολογισμός της αντοχής της βραχομάζας πραγματοποιείται με ταξινόμηση της βραχομάζας, σύμφωνα με κάποιο από τα γεωτεχνικά συστήματα ταξινόμησης, και εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής σύμφωνα με κάποιο από τα εμπειρικά κριτήρια αστοχίας της βραχομάζας.

Σαν παράδειγμα υπολογισμού, το οποίο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, υπολογίζεται η αντοχή βραχομάζας με δομή “Blocky” και κατάσταση ασυνεχειών “Fair” στο διάγραμμα της ταξινόμησης GSI. Ο συνδυασμός αυτός δίνει μία μέση τιμή του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI=55.

Λαμβάνοντας αντοχή άρρηκτου πετρώματος $\sigma_{ci}=42,9\text{MPa}$, σταθερά $m_i=10$, GSI=55, προκύπτει $m_b=2.005$, $s=6.74\text{E-}03$, $a=0.504$, και η αντοχή της βραχομάζας υπολογίζεται σύμφωνα με το κριτήριο Hoek-Brown συναρτήσει της πλευρικής τάσης σ_3 από τη σχέση:

Εξίσωση 35

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

Για πλευρικές πιέσεις 0, 5 και 10 MPa η αντοχή της βραχομάζας υπολογίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3 Αντοχή διακλασμένης βραχομάζας υπολογιζόμενη εμπειρικά

s3 (MPa)	s1 (MPa)
0.5	7.8
2	15.5
5	25.9

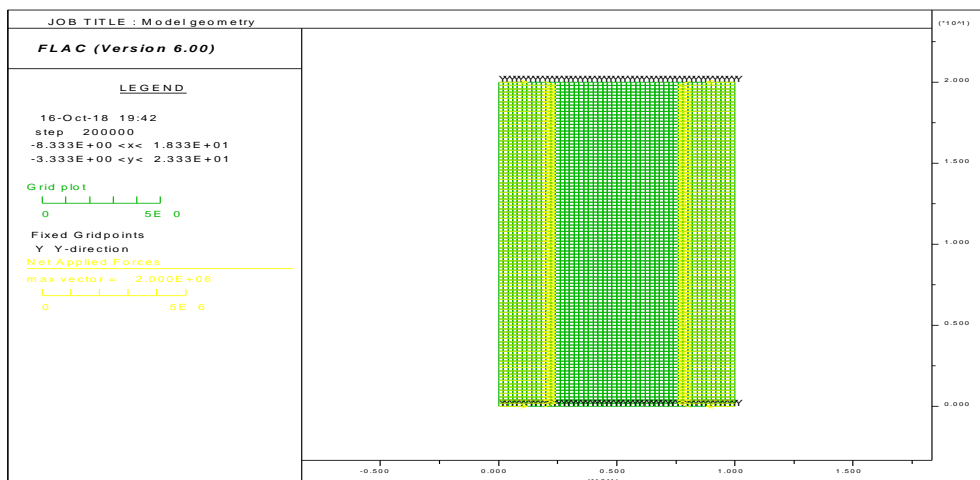
4 Αριθμητικός υπολογισμός αντοχής ανισότροπης βραχομάζας: προετοιμασία μοντέλων και αποτελέσματα

4.1 Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων

Για τον αριθμητικό υπολογισμό της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας χρησιμοποιήθηκε ο διδιάστατος κώδικας FLAC2D και το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint όπως προαναφέρθηκε. Η γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου δίνεται στην **Εικόνα 25**. Ο κάναβος 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. Στο κάτω όριο του μοντέλου δεσμεύεται η κατακόρυφη μετατόπιση 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. Είναι αδύνατο να αναπαρασταθεί η πλήρης χωρική έκταση της βραχομάζας σε οποιαδήποτε αριθμητική προσομοίωση, πρέπει να προστεθούν τεχνητά όρια εκτός από τα όρια της μηχανικής (π.χ. όρια εκσκαφής) και την επιφάνεια του εδάφους (εάν υπάρχει). Τα μηχανικά τεχνητά όρια στο FLAC μπορούν να αντιστοιχιστούν είτε ως προδιαγεγραμμένη μετατόπιση (ταχύτητα) είτε ως τάση.

Τα όρια μετατόπισης δεν μπορούν να ελεγχθούν απευθείας στο FLAC και, στην πραγματικότητα, δεν συμμετέχουν στη διαδικασία υπολογισμού (Itasca Consulting Group Inc., 2008a). Για να δημιουργηθεί ένα όριο μετατόπισης, στα σημεία πλέγματος απλώς εκχωρείται μια τιμή ταχύτητας για έναν ορισμένο αριθμό χρονικών βημάτων. Αυτός ο αριθμός μπορεί να είναι θετικός, αρνητικός ή μηδέν. Μόλις το μοντέλο ξεκινήσει να επιλύεται, η αρχική ταχύτητα διατηρείται ανεξάρτητα από τις δυνάμεις που ενεργούν στα σημεία πλέγματος. Για να δημιουργηθεί ένα όριο καθορισμένης τάσης στο FLAC, δυνάμεις μπορούν να εφαρμοστούν σε ολόκληρο το όριο ή σε τμήμα του. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις μπορεί να μεταβληθούν σε οποιοδήποτε σημείο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. (after Itasca Consulting Group, 2008a)



Εικόνα 25. Γεωμετρία αριθμητικού μοντέλου.

Συνολικά προετοιμάστηκαν και επιλύθηκαν οι παρακάτω σειρές αριθμητικών μοντέλων:

- 1^η Σειρά (UJ1-coarse): προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας με δύο οικογένειες ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους. Το αριθμητικό μοντέλο έχει αραιό κάναβο ζωνών πεπερασμένων διαφορών. Σε όλες τις ζώνες του αριθμητικού μοντέλου καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιλύονται δέκα (10) μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών (από 0° έως 90° για την 1^η οικογένεια ασυνεχειών) και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη θεωρητική λύση με βάση το συνδυασμό μεμονωμένων επιπέδων αδυναμίας.

- 2^η Σειρά (UJ1-fine): Ομοίως με προηγούμενη σειρά σε πυκνό κάρναβο για τη διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας του κάρναβου στην τιμή της υπολογιζόμενης αριθμητικά αντοχής.
- 3^η Σειρά (UJ2-non-persistent): προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας με μία οικογένεια μη εμμενουσών (non-persistent) ασυνεχειών. Στις ζώνες του αριθμητικού μοντέλου ανατίθεται εναλλάξ το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint, με ασυνέχεια συγκεκριμένης γωνίας κλίσης, με το καταστατικό μοντέλο ισότροπου πετρώματος Mohr-Coulomb. Διερευνάται έτσι η δυνατότητα του αριθμητικού μοντέλου να προσομοιώσει την επίδραση της παρουσίας γεφυρών άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των ασυνεχειών. Επιλύονται δέκα (10) αριθμητικά μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις μη εμμενουσών ασυνεχειών (από 0° έως 90°) και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη θεωρητική λύση μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας με παρουσία γεφυρών άρρηκτου πετρώματος.
- 4^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse): προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας της κατηγορίας Blocky του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Η βραχομάζα έχει τρεις οικογένειες ασυνεχειών, εκ των οποίων οι δύο είναι κάθετες μεταξύ τους. Η τρίτη οικογένεια ασυνεχειών, η οποία στην σχετική περιγραφή της δομής βραχομάζας κατά την ταξινόμηση GSI θεωρείται ότι έχει παράταξη παράλληλη με το επίπεδο, μεταφέρεται στην αριθμητική προσομοίωση στο επίπεδο με ενδιάμεση των άλλων δύο οικογενειών ασυνεχειών κλίση. Σε όλες τις ζώνες τις ζώνες του μοντέλου ανατίθεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επιλύονται δέκα (10) αριθμητικά μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών (από 0° έως 90° για την 1η οικογένεια ασυνεχειών) και η αντοχή του αριθμητικού μοντέλου συγκρίνεται με την αντοχή που προκύπτει από το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.
- 5^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse):): Ομοίως με προηγούμενη σειρά σε πυκνό κάρναβο για τη διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας του κάρναβου στην τιμή της υπολογιζόμενης αριθμητικά αντοχής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων με παρουσία ασυνεχειών.

4.2 1^η Σειρά (UJ1-coarse) -Αραιός κάρναβος

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°

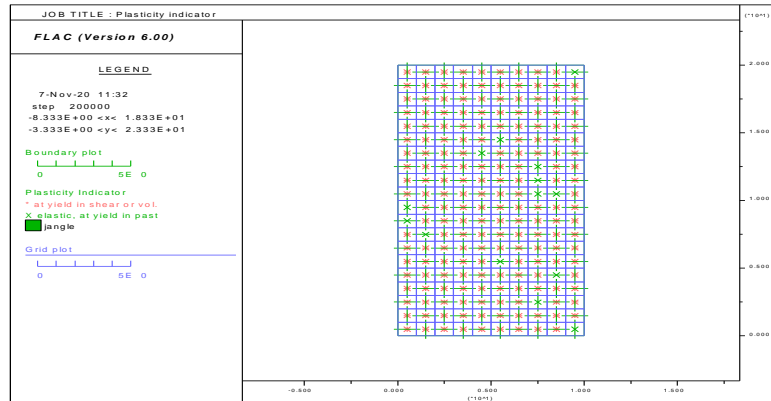
Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

Εφελκυστική αντοχή (tension)=4.2 x10⁶ Pa

Ιδιότητες ασυνεχειών:

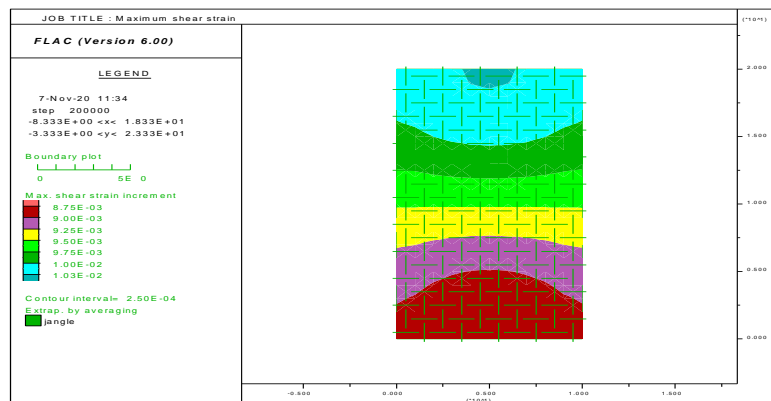
Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°
 Συνοχή (jcohesion)=10MPa
 Γωνία τριβής (jfriction)=40.0°
 Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0
 Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

4.2.1 Γωνία κλίσης 0° -90°



Εικόνα 26. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου

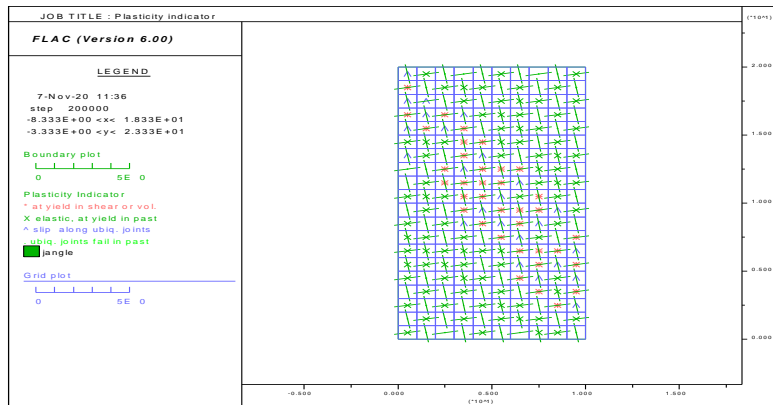
Έχει διαρρέψει το άρρηκτο πέτρωμα σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Αντίθετα οι ασυνέχειες δεν έχουν ολισθήσει. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η γωνία κλίσης τους είναι 0° και 90°.



Εικόνα 27. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής- δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο

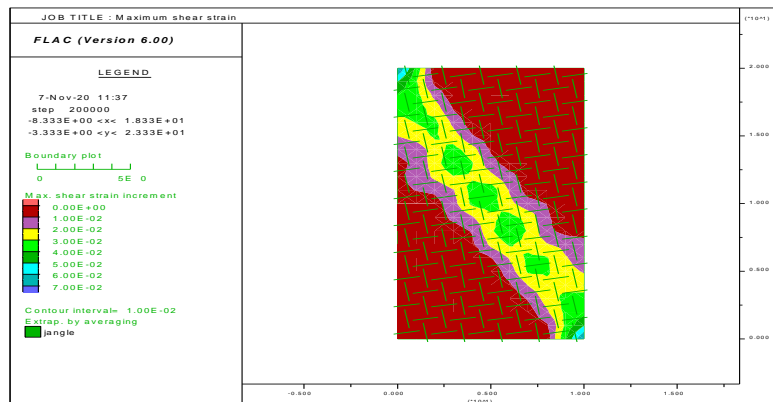
Η αύξηση αυτή είναι παρόμοια σε όλες τις ζώνες, που πρακτικά σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής και το μοντέλο συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά.

4.2.2 Γωνία κλίσης 10⁰-100⁰



Εικόνα 28. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου

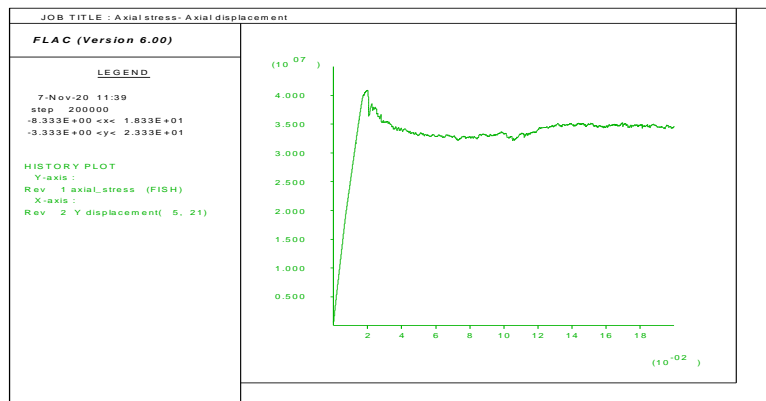
Όλες οι ζώνες έχουν διαρρεύσει στη διεύθυνση των ασυνεχειών είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο ^) είτε σε (σύμβολο .). Επίσης, σε ορισμένες ζώνες του μοντέλου έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα σε προηγούμενους υπολογιστικούς κύκλους (σύμβολο x). Από την εικόνα της διαρροής συνάγεται το συμπέρασμα ότι το υπόψη μοντέλο αστοχεί με συνδυασμό διαρροής άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών, όμως η συνεισφορά του άρρηκτου πετρώματος είναι μειωμένη σε σχέση με τα προσεχή μοντέλα. Παρατηρείται μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας προς τη διεύθυνση ασυνέχειας με γωνία κλίσης 10⁰.



Εικόνα 29. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής- δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο

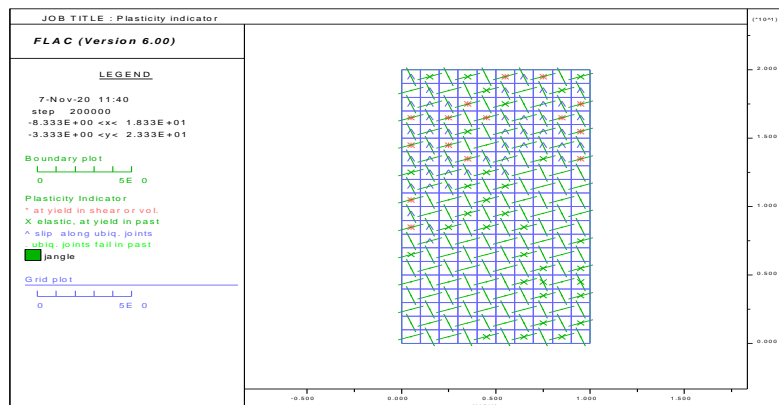
Το μέτωπο της διαρροής, σύμφωνα με την τρέχουσα αύξηση της μέγιστης διατμητικής τροπής, σχηματίζεται σχεδόν κάθετα προς τις ασυνέχειες με γωνία κλίσης 10⁰, που επιβεβαιώνει τη συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στην αστοχία.

4.2.3 Γωνία κλίσης 20°-110°



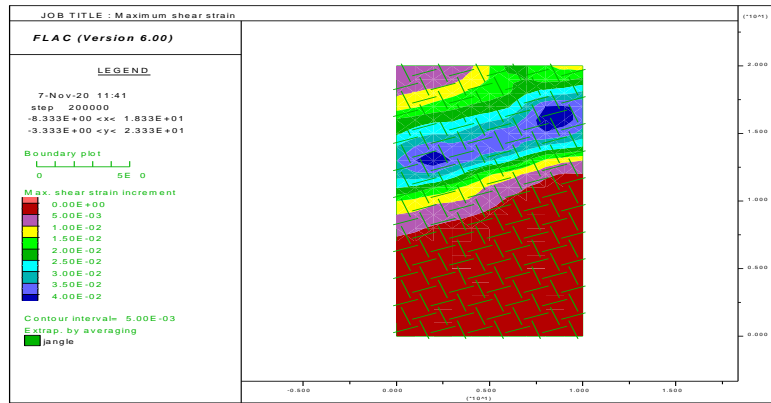
Εικόνα 30. Διάγραμμα αξονικής τάσης συναρτήσει της βράχυνσης

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.



Εικόνα 31. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου. Με τις πράσινες γραμμές δείχνεται η παρουσία ασυνεχειών ubiquitous joint στις ζώνες του μοντέλου

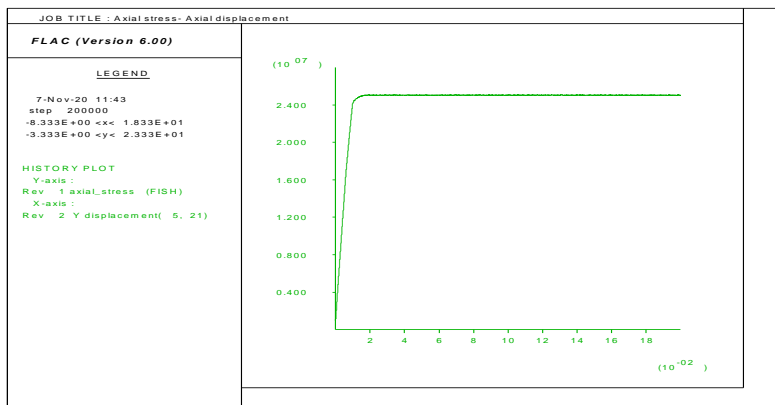
Παρατηρείται συνδυασμένη αστοχία άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών. Όλες οι ζώνες έχουν διαρρεύσει στη διεύθυνση των ασυνεχειών είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο ^) είτε σε προηγούμενο υπολογιστικό κύκλο (σύμβολο .). Επίσης, σε ορισμένες ζώνες του μοντέλου με ασυνέχεια διεύθυνσης 20° έχει διαρρεύσει το άρρηκτο πέτρωμα (*) είτε 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 προσεχή μοντέλα. Παρατηρείται μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας προς τη διεύθυνση ασυνέχειας με γωνία κλίσης 20°.



Εικόνα 32. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής- δείχνει τη θέση του μετώπου διαρροής (yield front) κατά τον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο

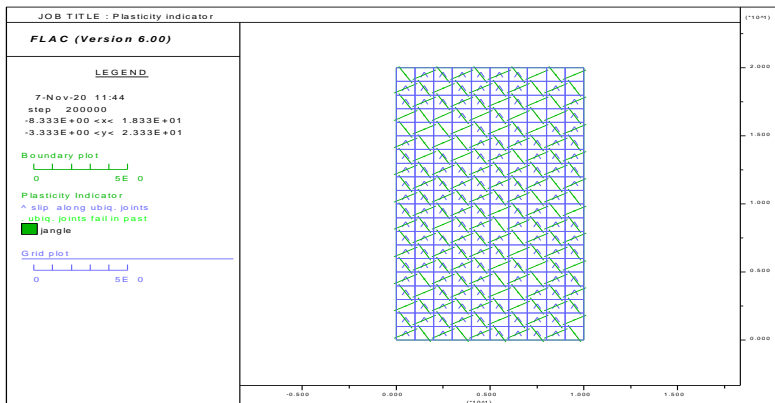
Σχηματίζεται ένα μέτωπο διαρροής κατά μήκος της ασυνέχειας με γωνία κλίσης 20° στο πάνω μέρος του δοκιμίου.

4.2.4 Γωνία κλίσης 30° - 120°



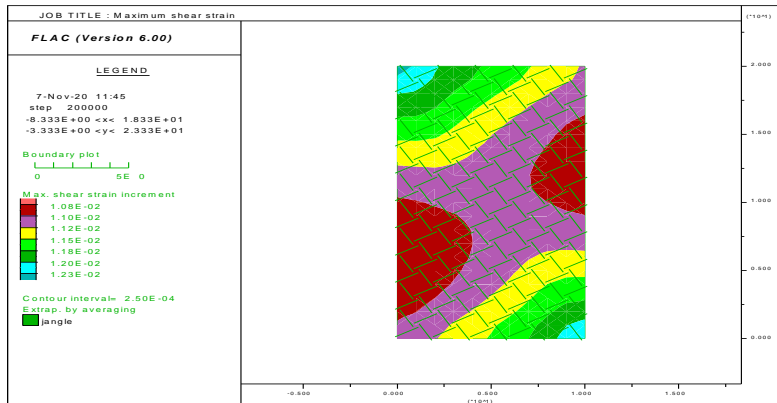
Εικόνα 33. Διάγραμμα αξονικής τάσης συναρτήσει της βράχυνσης

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



Εικόνα 34. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

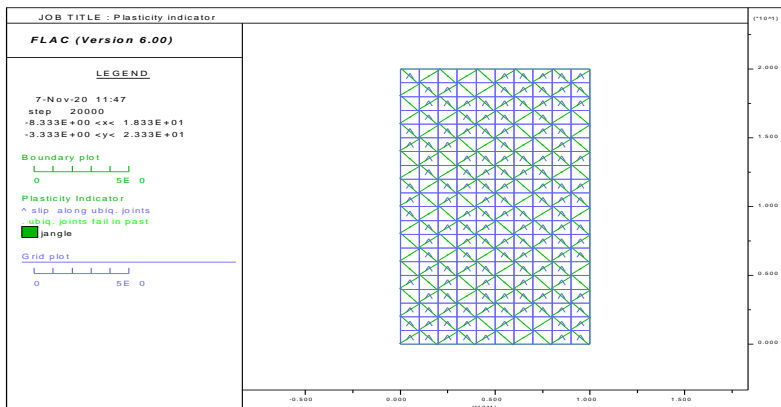
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή.



Εικόνα 35. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

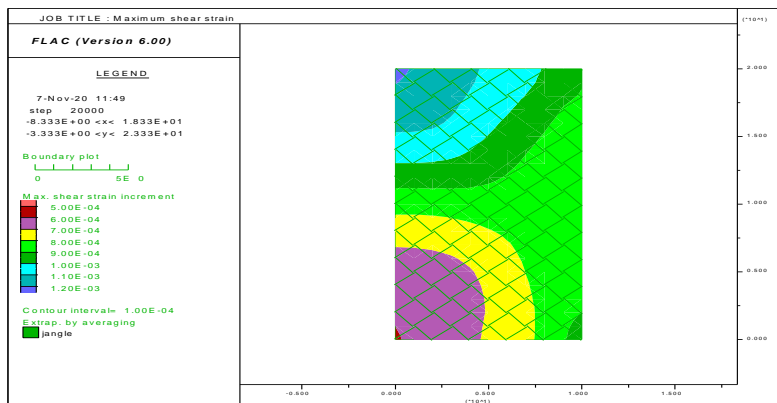
Δεν δημιουργείται κάποιο μέτωπο διαρροής.

4.2.5 Γωνία κλίσης 40°-130°



Εικόνα 36. Διάγραμμα αζονικής τάσης συναρτήσει της βράχυνσης

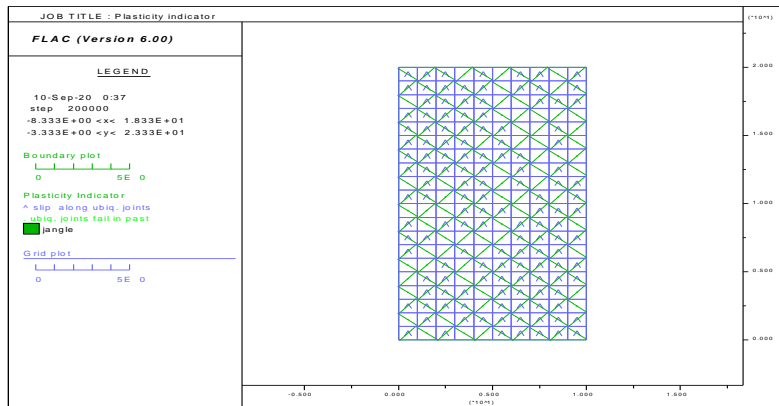
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή.



Εικόνα 37. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

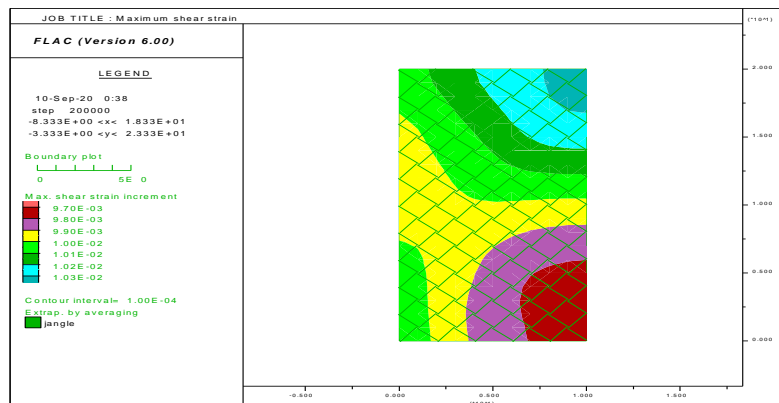
Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές αύξησης της διατμητικής τροπής, που σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται μέτωπο διαρροής.

4.2.6 Γωνία κλίσης 50°-140°



Εικόνα 38. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

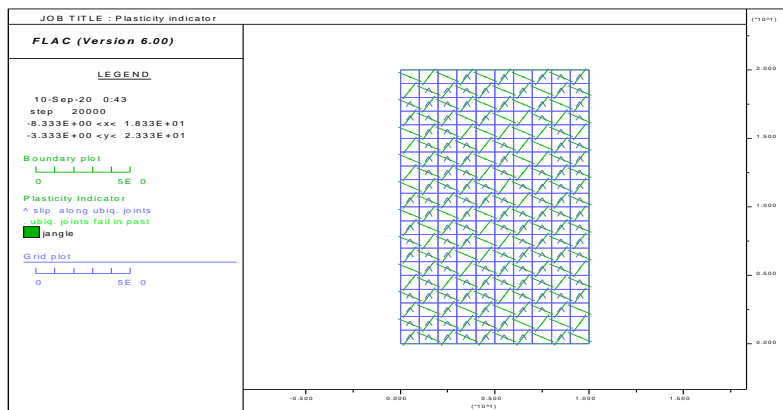
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή. Σ' αυτόν τον κύκλο ολισθαίνουν κυρίως οι ασυνέχειες με κλίση 50°.



Εικόνα 39. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

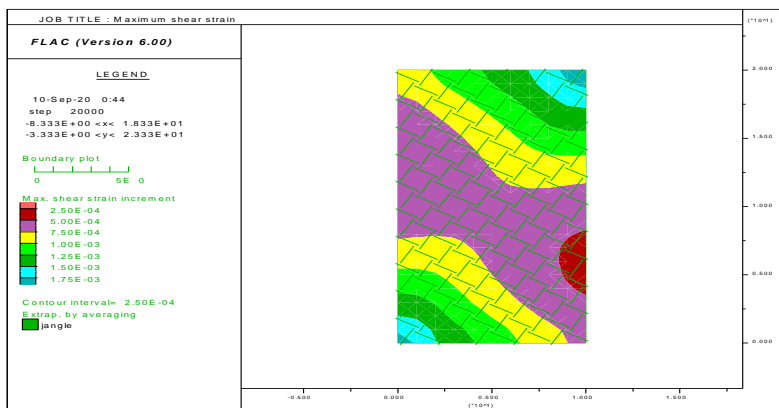
Παρατηρούνται παρόμοιες τιμές αύξησης της διατμητικής τροπής, που σημαίνει ότι δεν αναπτύσσεται μέτωπο διαρροής.

4.2.7 Γωνία κλίσης 60°-150°



Εικόνα 40. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

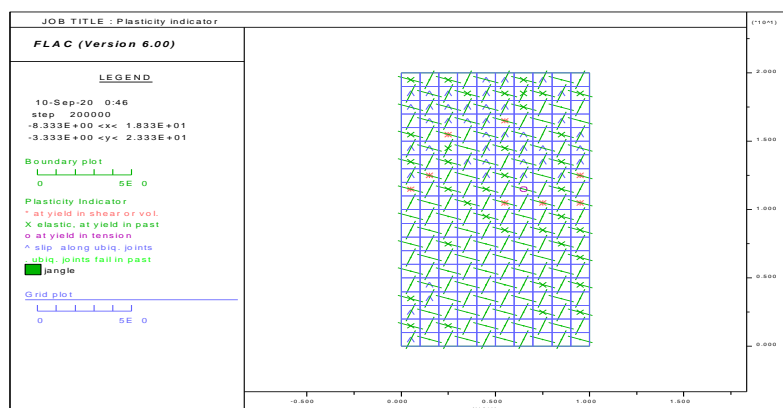
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, χωρίς συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στη διαρροή. Σ' αυτόν τον κύκλο παρατηρείται ολίσθηση στις περισσότερες ζώνες κυρίως σ' εκείνες με ασυνέχεια κλίσης 60°.



Εικόνα 41. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Δεν δημιουργείται κάποιο μέτωπο διαρροής.

4.2.8 Γωνία κλίσης 70°-160°

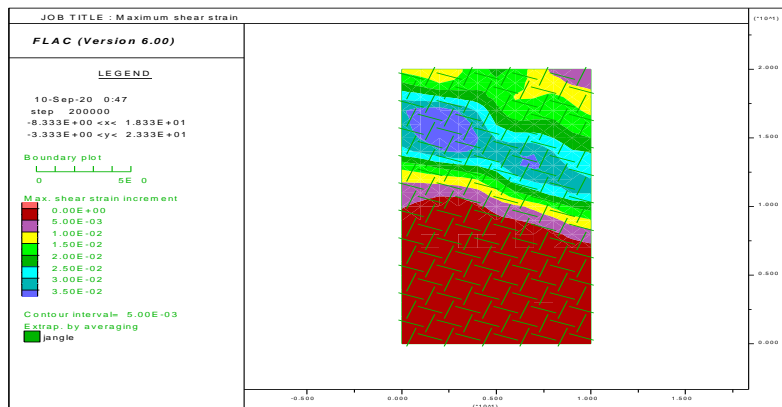


Εικόνα 42. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Παρατηρείται ολίσθηση στις ασυνέχειες, είτε στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο, είτε σε προηγούμενους, κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 70° . Το άρρηκτο πετρώμα διαρρέει σ' αυτόν τον κύκλο στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 160° .

Παρατηρείται εφελκυσμός στο κέντρο του μοντέλου. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση και μία σε εφελκυσμό. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC 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.

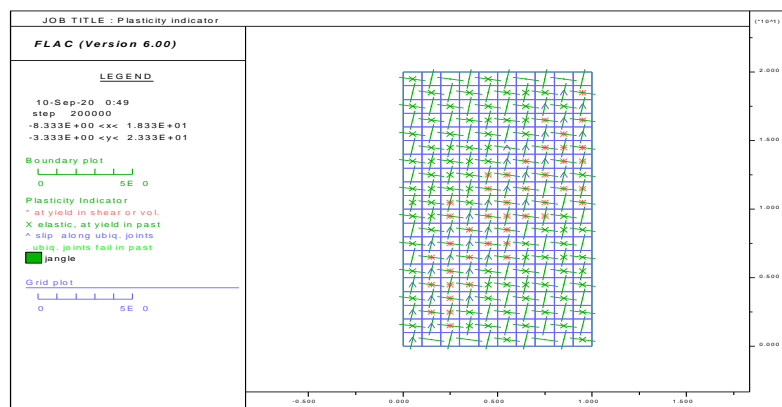
Επιπλέον, λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου και των συνοριακών συνθηκών, εμφανίζονται περιοχές διαρροής στην πάνω πλευρά και στην κάτω αριστερή γωνία του μοντέλου.



Εικόνα 43. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

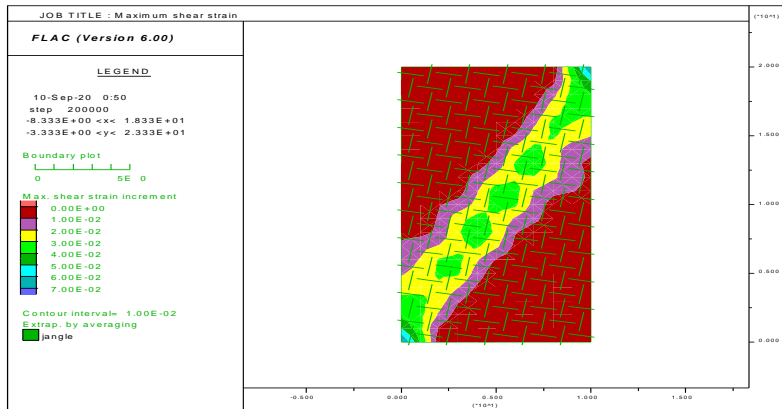
Το μέτωπο της διαρροής, σύμφωνα με την τρέχουσα αύξηση της μέγιστης διατμητικής τροπής, σχηματίζεται σχεδόν κάθετα προς τις ασυνέχειες κλίσης 70° , που επιβεβαιώνει τη συμμετοχή του άρρηκτου πετρώματος στην αστοχία.

4.2.9 Γωνία κλίσης 80° - 170°



Εικόνα 44. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

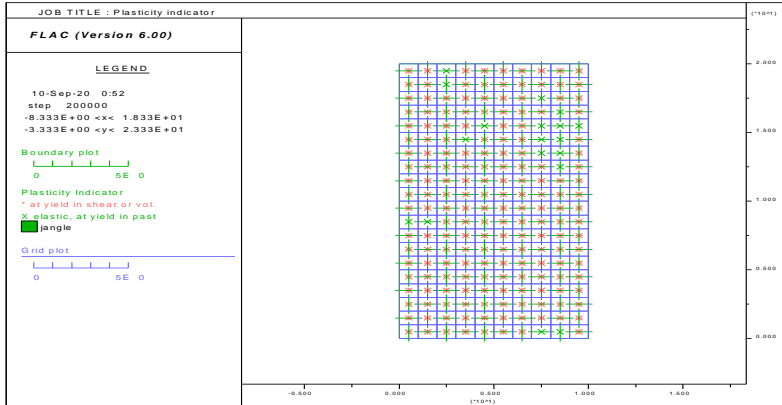
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται κυρίως με διαρροή του άρρηκτου πετρώματος στις περισσότερες ζώνες του μοντέλου. Παρατηρείται επίσης ολίσθηση στις ασυνέχειες στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 80° . Το άρρηκτο πετρώμα διαρρέει σ' αυτόν τον κύκλο στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 170° στο κέντρο και στην άνω δεξιά και κάτω αριστερά γωνία, λόγω συνοριακών συνθηκών και γεωμετρίας που ορίζουν την φόρτιση.



Εικόνα 45. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

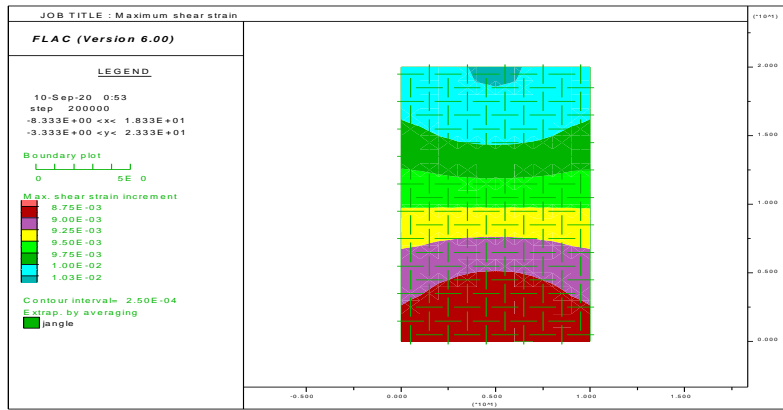
Σχηματίζεται μέτωπο διαρροής κάθετο στην ασυνέχεια με γωνία κλίσης 170° .

4.2.10 Γωνία κλίσης 90° - 180°



Εικόνα 46. Πλαστικοποίηση των ζωνών 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 90° και 0° .

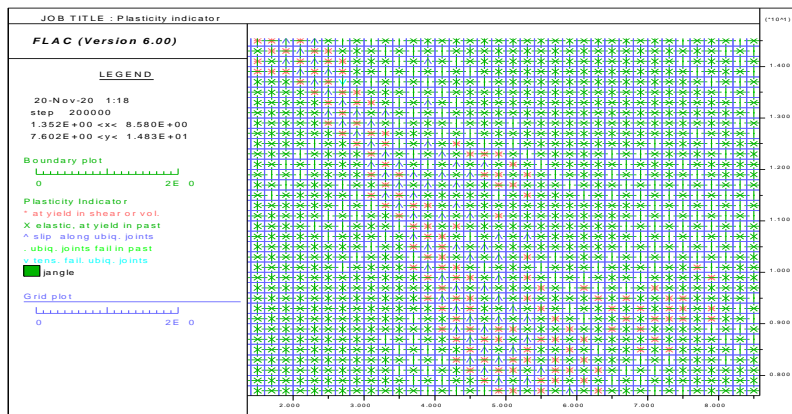


Εικόνα 47. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Δεν παρατηρείται μέτωπο διαρροής.

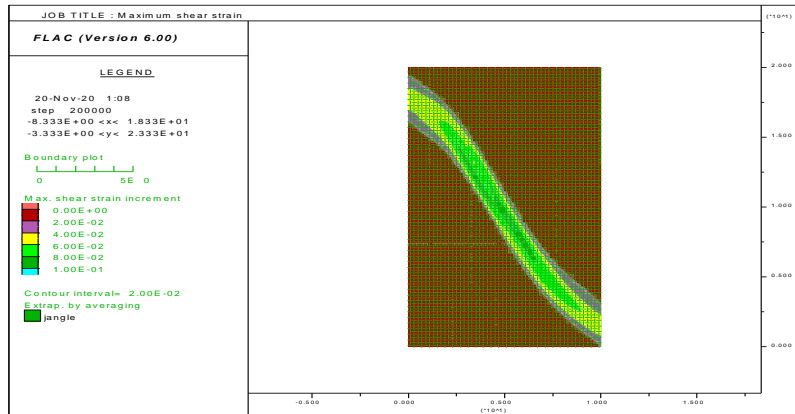
4.3 2^η Σειρά (UJ1-fine)-Πυκνός κάρναβος

4.3.1 Γωνία κλίσης 0°-90°



Εικόνα 48. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

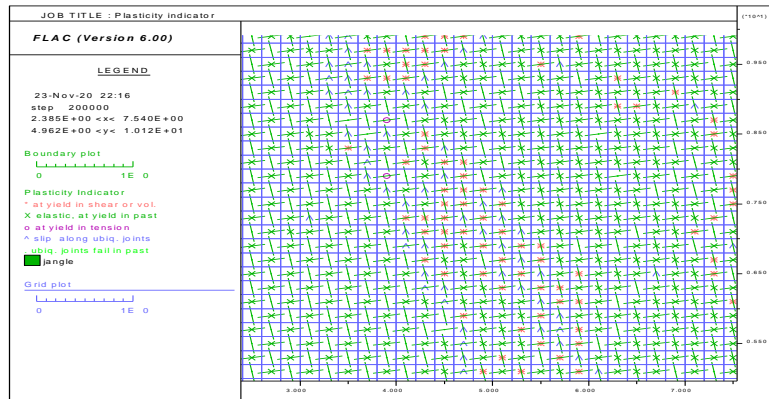
Από την εξέταση της κατάστασης της πλαστικοποίησης των ζωνών του μοντέλου προκύπτει ότι η αστοχία εκδηλώνεται κυρίως με διαρροή του άρρηκτου πετρώματος στις περισσότερες ζώνες του μοντέλου. Παρατηρείται επίσης ολίσθηση στις ασυνέχειες στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 0° και ειδικά στο κέντρο του δοκιμίου.



Εικόνα 49. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

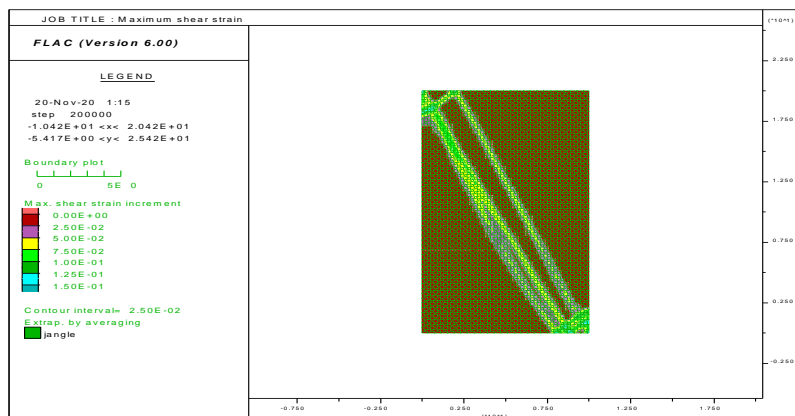
Παρατηρείται μέτωπο διαρροής που σχηματίζει γωνία περίπου 65° που συμπίπτει με το θεωρητικό επίπεδο του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο $MC(45+\phi/2)$.

4.3.2 Γωνία κλίσης 10° - 100°



Εικόνα 50. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

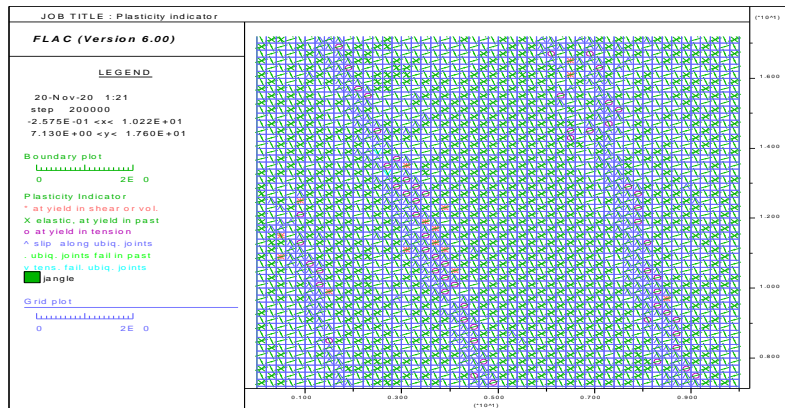
Παρατηρείται συνδυασμένη αστοχία άρρηκτου πετρώματος και ασυνεχειών. Στις περισσότερες ζώνες έχει διαρρεύσει το άρρηκτο. Σε λίγες ζώνες κυρίως στο κεντρικό κάτω τμήμα του δοκιμίου το άρρηκτο πέτρωμα αστόχησε εφελκυστικά. Ολίσθησαν κυρίως οι ασυνέχειες κλίσης 10° . Παρατηρείται μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας προς τη διεύθυνση ασυνέχειας με κλίση 100° .



Εικόνα 51. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

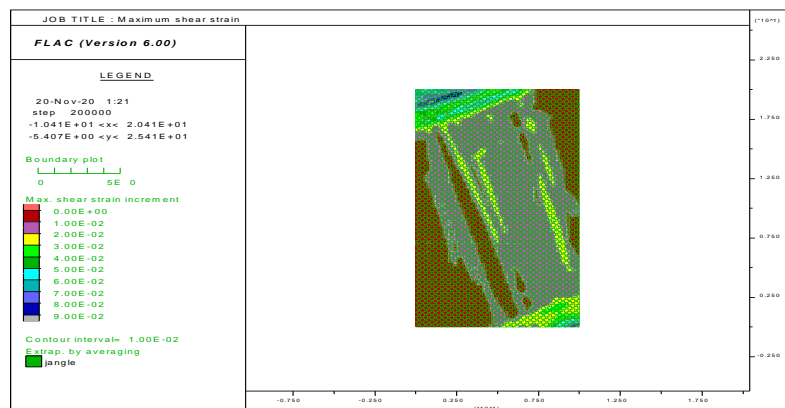
Παρατηρείται μέτωπο διαρροής που σχηματίζει γωνία περίπου 65° που συμπίπτει με το θεωρητικό επίπεδο του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο $MC(45+\phi/2)$.

4.3.3 Γωνία κλίσης 20° - 110°



Εικόνα 52. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

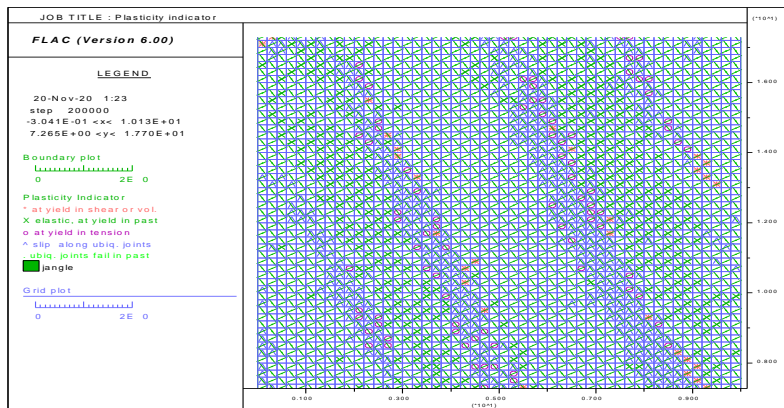
Στις περισσότερες ζώνες έχουν ολισθήσει οι ασυνέχειες. Σε λίγες μόνο ζώνες διέρρευσε το άρρηκτο πέτρωμα. Παρατηρείται έντονη εφελκυστική αστοχία κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 20° .



Εικόνα 53. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

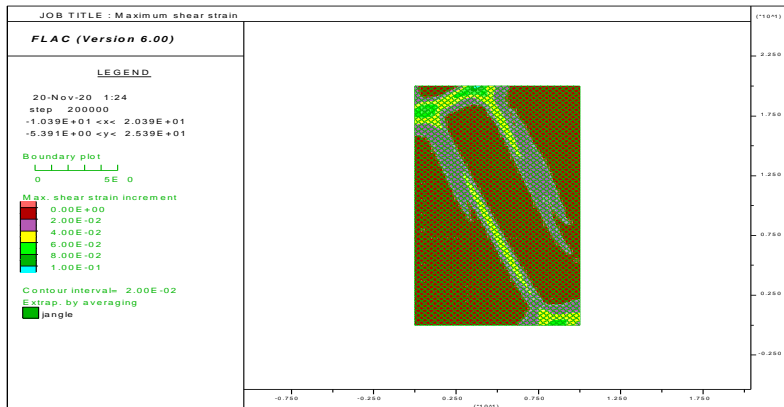
Παρατηρείται μέτωπο διαρροής που σχηματίζει γωνία περίπου 65° που συμπίπτει με το θεωρητικό επίπεδο του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο $MC(45+\phi/2)$.

4.3.4 Γωνία κλίσης 30°-120°



Εικόνα 54. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

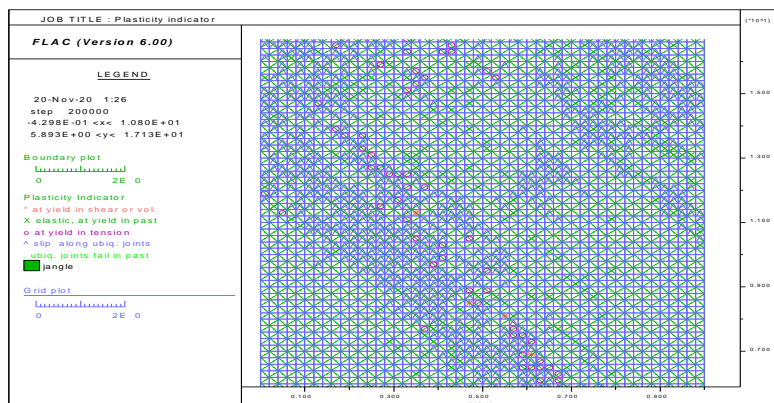
Στις περισσότερες ζώνες ολίσθησαν οι ασυνέχειες. Σε λίγες μόνο διέρρευσε το άρρηκτο πέτρωμα. Παρατηρείται έντονη εφελκυστική αστοχία εκτεινόμενη σε τρία διακριτά μακροσκοπικά επίπεδα.



Εικόνα 55. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

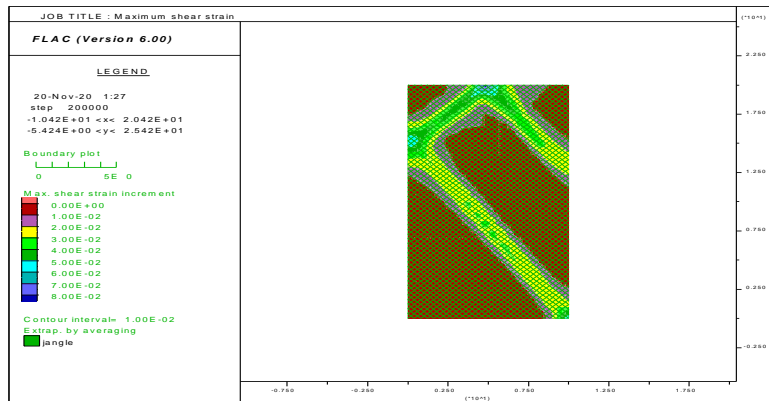
Παρατηρείται μέτωπο διαρροής που σχηματίζει γωνία περίπου 65° που συμπίπτει με το θεωρητικό επίπεδο του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο $MC(45+\phi/2)$.

4.3.5 Γωνία κλίσης 40°-130°



Εικόνα 56. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

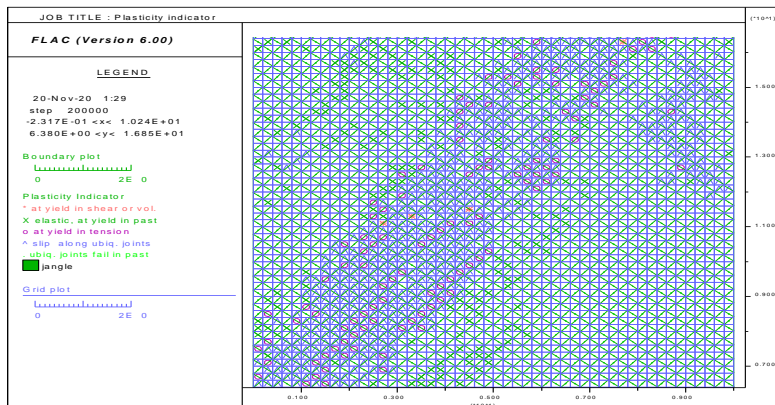
Το άρρηκτο πέτρωμα διαρρέει σε πολύ λίγες ζώνες στα άκρα του μοντέλου κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 40° . Η αστοχία εκδηλώνεται σε μία διατμητική ζώνη παράλληλα με το θεωρητικό επίπεδο της ασυνέχειας. Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με 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.



Εικόνα 57. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

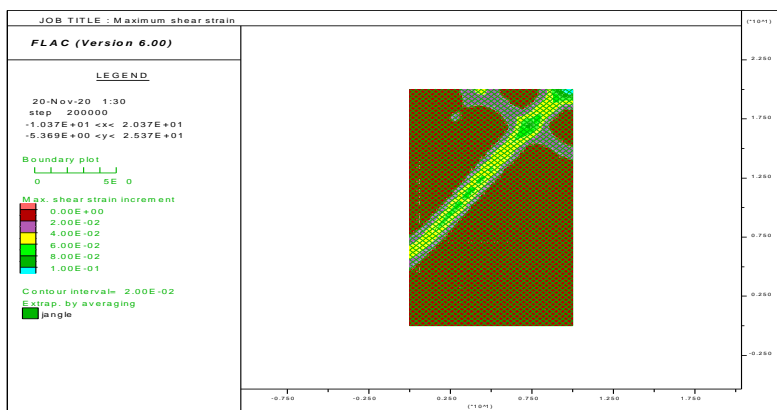
Παρατηρούνται δύο παράλληλα μέτωπα διαρροής που σχηματίζουν γωνία περίπου 65° που συμπίπτει με το θεωρητικό επίπεδο του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο $MC(45+\phi/2)$.

4.3.6 Γωνία κλίσης $50^\circ-140^\circ$



Εικόνα 58. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

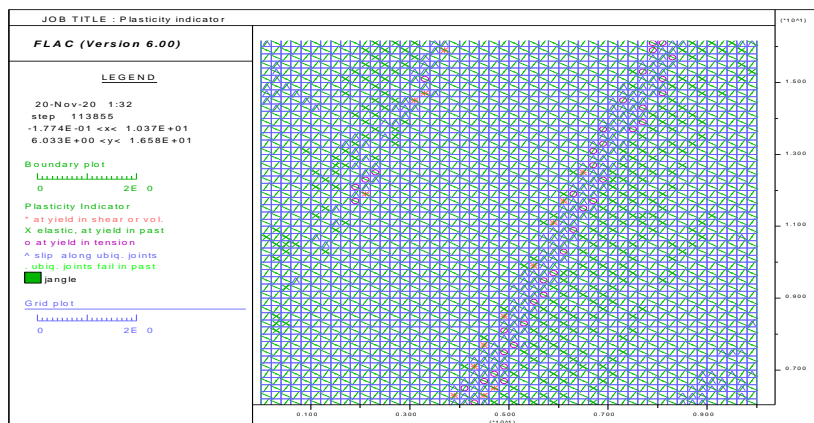
Ομοίως με προηγούμενο μοντέλο όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Παρατηρείται μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας κατά μήκος της ασυνέχειας κλίσης 50°. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. 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 καθετότητα των ασυνεχειών εμποδίζει την διατμητική αστοχία να εκδηλωθεί προς μια κατεύθυνση.



Εικόνα 59. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Σχηματίζεται ένα μέτωπο διαρροής παράλληλο με τις ασυνέχειες κλίσης 50°.

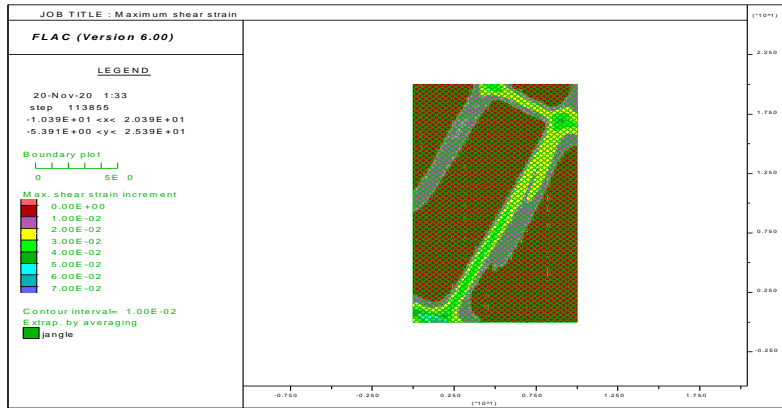
4.3.7 Γωνία κλίσης 60°-150°



Εικόνα 60. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Παρατηρείται μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας κατά μήκος της ασυνέχειας κλίσης 60°. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται

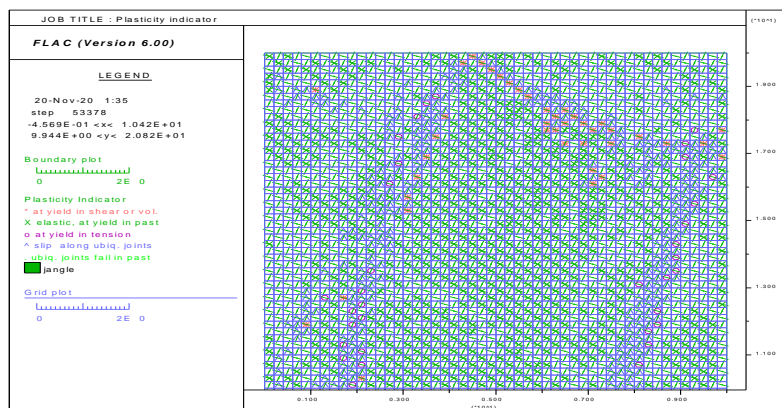
τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. Καθώς η διατεμνόμενη ασυνέχεια τείνει να ολισθήσει, φορτίζει τις επόμενες ζώνες προκαλώντας διατμητική αστοχία που τείνει να διαδοθεί αρχικά παράλληλα και στη συνέχεια υπό κλίση ως προς την ασυνέχεια. Κατά την υπό κλίση διάδοση παρασέρνει γειτονικές ζώνες οι οποίες αστοχούν σε εφελκυσμό.



Εικόνα 61. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Σχηματίζεται ένα μέτωπο διαρροής παράλληλο με τις ασυνέχειες κλίσης 60°.

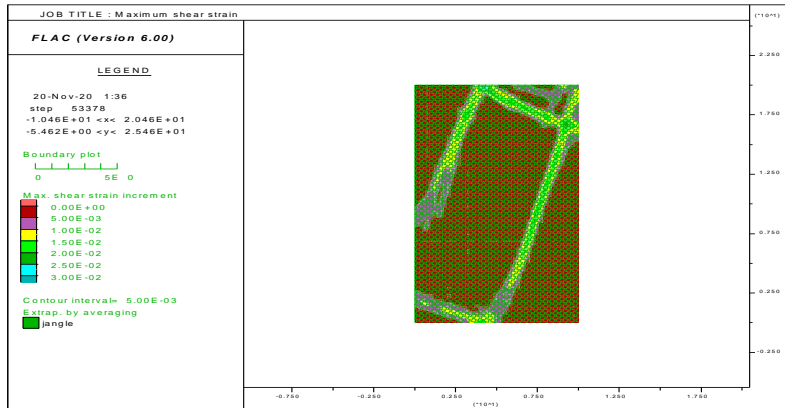
4.3.8 Γωνία κλίσης 70°-160°



Εικόνα 62. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Όλες οι ζώνες με καταστατικό μοντέλο UJ διαρρέουν σε διάτμηση. Παρατηρείται μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας κατά μήκος της ασυνέχειας κλίσης 70°. Επιπλέον, ορισμένες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC πλησίον της ασυνέχειας διαρρέουν σε διάτμηση, ενώ αναπτύσσονται τοπικά και εφελκυστικές αστοχίες. 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. Παρατηρείται διαρροή του άρρηκτου στο άνω και κάτω άκρο του δοκιμίου κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 160°.

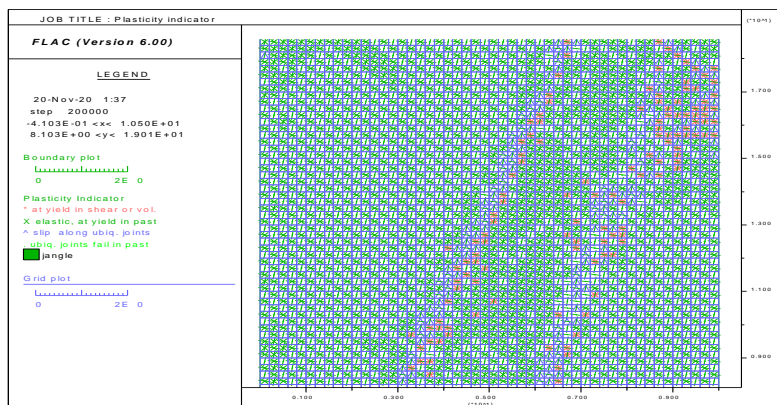
Επιπλέον, αστοχούν σε διάτμηση ζώνες του πετρώματος μακριά από το επίπεδο της ασυνέχειας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη γεωμετρία του δοκιμίου καθώς μετά από την αρχική ολίσθηση στην περιοχή της ασυνέχειας ο παρεμποδισμός της ολίσθησης από της συνοριακές συνθήκες οδηγεί στην αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.



Εικόνα 63. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

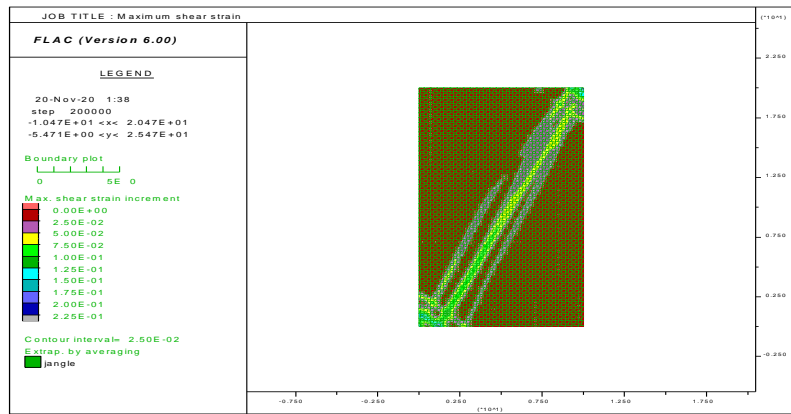
Σχηματίζονται δύο μέτωπα διαρροής παράλληλα με τις ασυνέχειες κλίσης 70°.

4.3.9 Γωνία κλίσης 80°-170°



Εικόνα 64. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

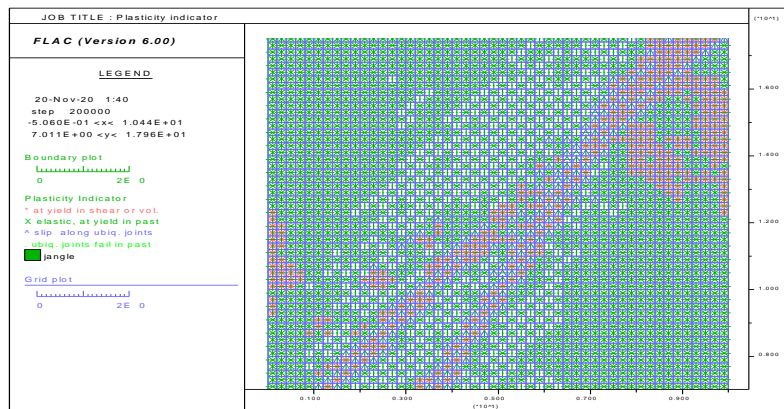
Παρατηρείται ένα μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας κατά μήκος της ασυνέχειας κλίσης 80°. Σ' αυτό το επίπεδο διαρρέει το άρρηκτο κυρίως σε ζώνες με ασυνέχειες κλίσης 170° και γύρω του ολισθαίνουν ασυνέχειες κλίσης 80° στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο. Στις υπόλοιπες ζώνες ολισθαίνουν οι ασυνέχειες σε προηγούμενο κύκλο.



Εικόνα 65. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

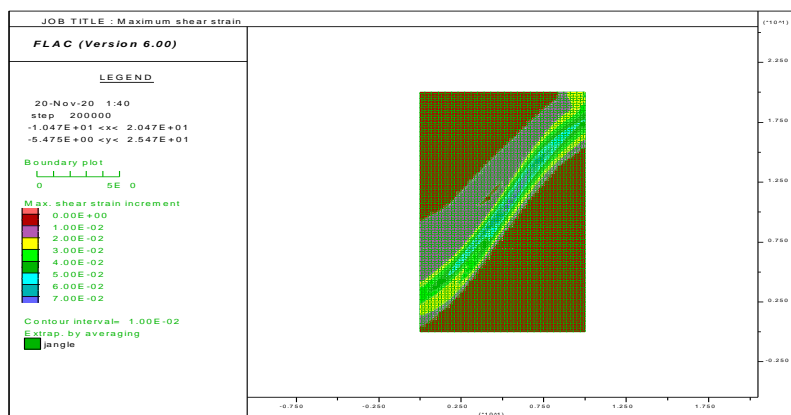
Σχηματίζεται ένα μέτωπο διαρροής παράλληλο με τις ασυνέχειες κλίσης 80°.

4.3.10 Γωνία κλίσης 90°-180°



Εικόνα 66. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Παρατηρείται ένα μακροσκοπικό επίπεδο αστοχίας στη διαγώνιο του μοντέλου. Σ' αυτό το επίπεδο διαρρέει το άρρηκτο σε μεγαλύτερο ποσοστό από προηγούμενο μοντέλο σε ζώνες με ασυνέχειες κλίσης 180° κυρίως και γύρω του ολισθαίνουν ασυνέχειες κλίσης 90° στον τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο. Στις υπόλοιπες ζώνες ολισθαίνουν οι ασυνέχειες σε προηγούμενο κύκλο.



Εικόνα 67. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Παρατηρείται μέτωπο διαρροής που σχηματίζει γωνία περίπου 65° που συμπίπτει με το θεωρητικό επίπεδο του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC(45+ ϕ /2).

4.4 3^η Σειρά (UJ2-non-persistent)

Προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας με μία οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών. Στις ζώνες του αριθμητικού μοντέλου ανατίθεται εναλλάξ το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint, με ασυνέχεια συγκεκριμένης γωνίας κλίσης, με το καταστατικό μοντέλο ισότροπου πετρώματος Mohr-Coulomb. Διερευνάται έτσι η δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιώσει την επίδραση της παρουσίας γεφυρών άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των ασυνεχειών.

πυκνότητα=2500 kg/m³

ελαστικές ιδιότητες:

Μέτρο συστολής (bulk modulus)= 2.77778×10^{10} Pa

Μέτρο διάτμησης (shear modulus)= 2.08333×10^{10} Pa

Ιδιότητες άρρηκτου πετρώματος:

Συνοχή (cohesion)= 10×10^6 Pa

Γωνία τριβής (friction)= 40.0°

Γωνία διαστολής (dilation)=0.0

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

Ιδιότητες ασυνεχειών:

Γωνία κλίσης (jangle)=0 ως 90°

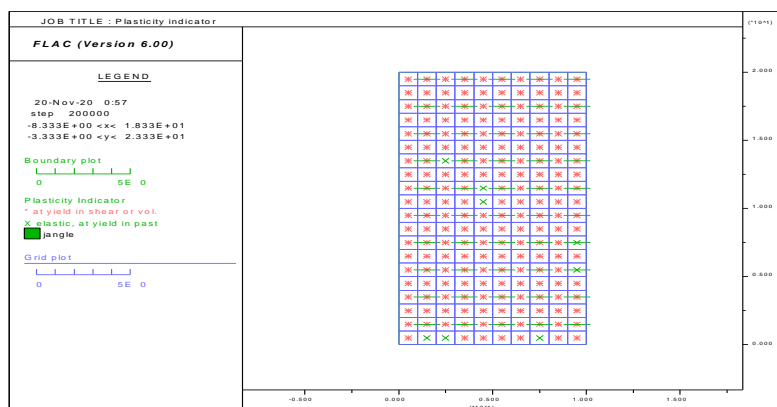
Συνοχή (jcohesion)=10MPa

Γωνία τριβής (jfriction)= 40.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

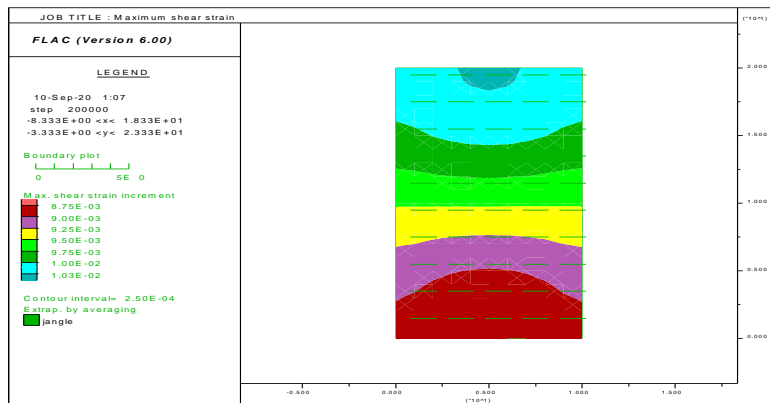
Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

4.4.1 Γωνία κλίσης 0°



Εικόνα 68. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Σε όλες τις ζώνες του μοντέλου διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα.

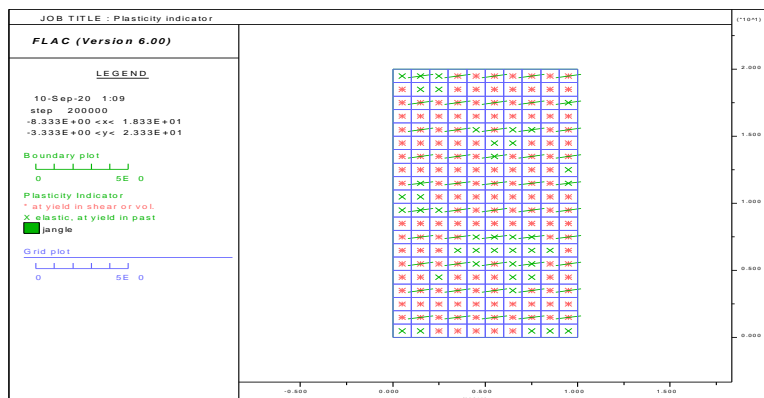


Εικόνα 69. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

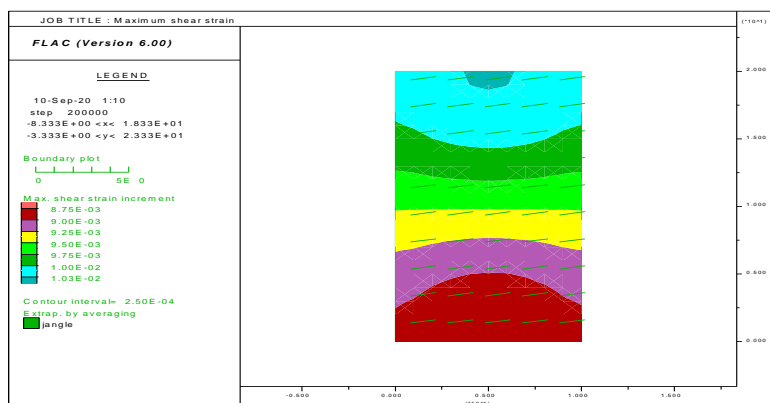
Οι τιμές αύξησης της μέγιστης διατμητικής τροπής δεν δείχνουν να δημιουργείται κάποιο διακριτό μέτωπο διαρροής.

Στα μοντέλα με γωνία κλίσης ασυνέχειας 0° - 40° παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά, όπως φαίνεται στη συνέχεια. Είναι αναμενόμενο να διαρρέει μόνο το άρρηκτο πέτρωμα καθώς η γωνία κλίσης είναι μικρότερη από τη γωνία τριβής των ασυνεχειών.

4.4.2 Γωνία κλίσης 10°

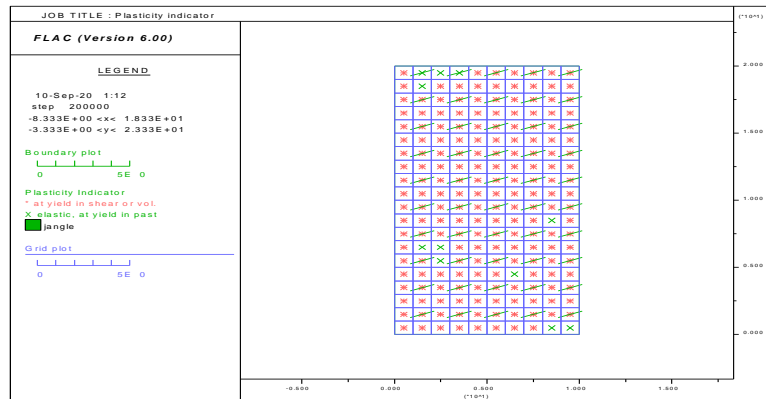


Εικόνα 70. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

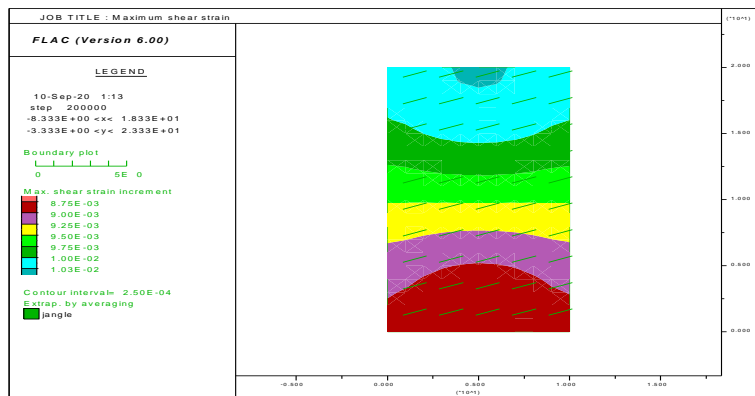


Εικόνα 71. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.3 Γωνία κλίσης 20°

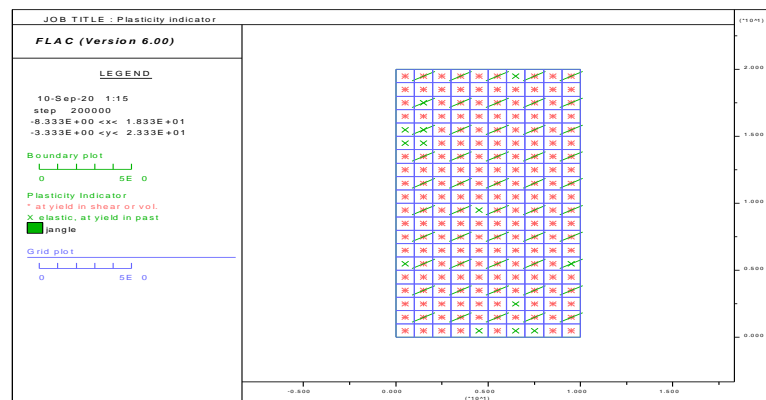


Εικόνα 72. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

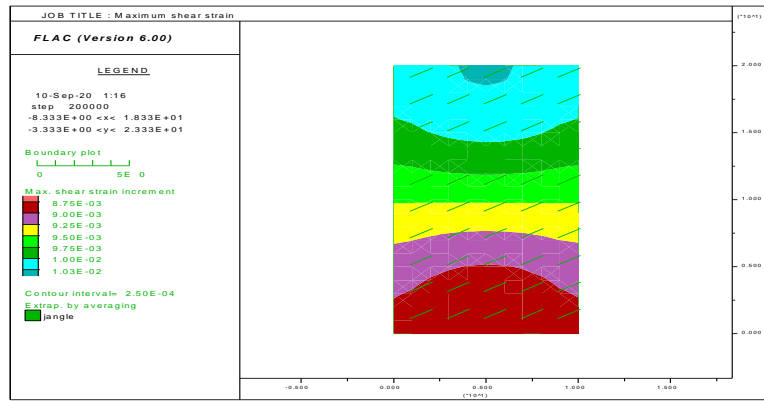


Εικόνα 73. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.4 Γωνία κλίσης 30°

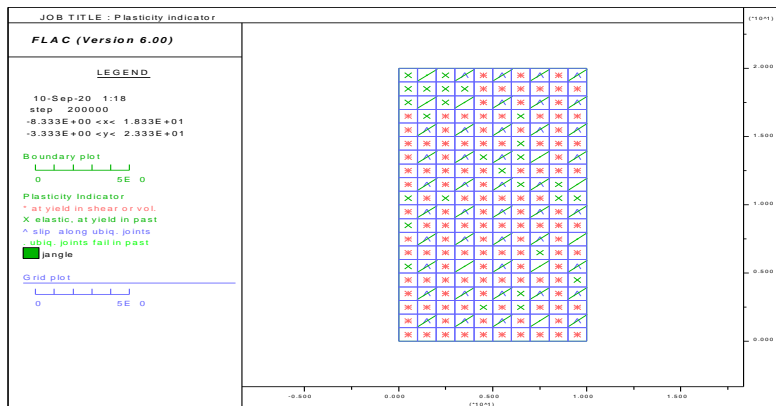


Εικόνα 74. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

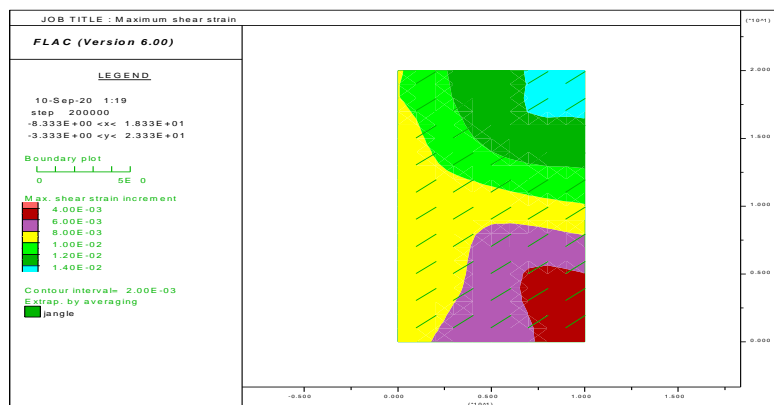


Εικόνα 75. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.5 Γωνία κλίσης 40°

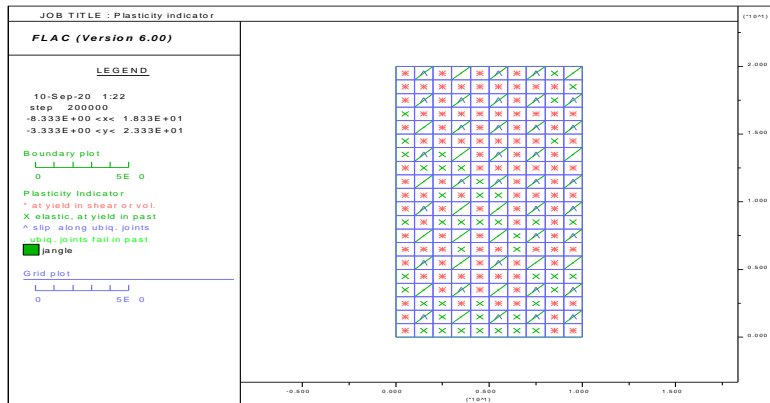


Εικόνα 76. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου



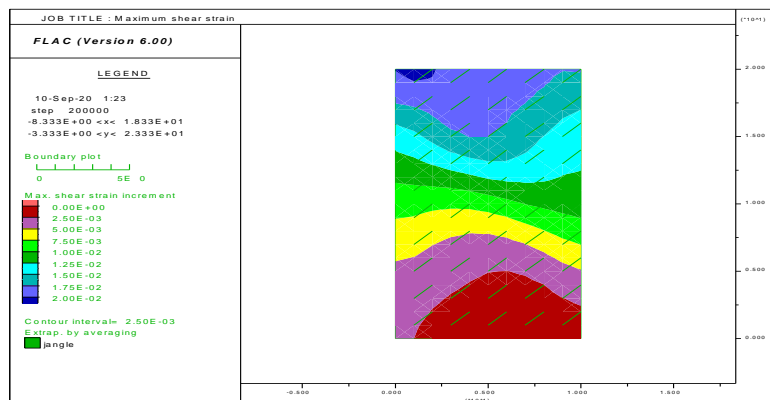
Εικόνα 77. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.6 Γωνία κλίσης 45°



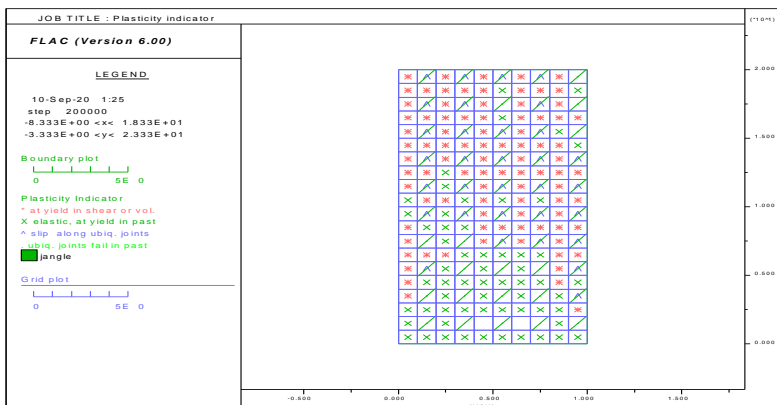
Εικόνα 78. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες είτε στο τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο είτε σε προηγούμενους. Στις υπόλοιπες ζώνες με καταστατικό μοντέλο Mohr Coulomb διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα. Η αριθμητική λύση είναι σωστή καθώς η γωνία κλίσης 45° είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής των ασυνεχειών.



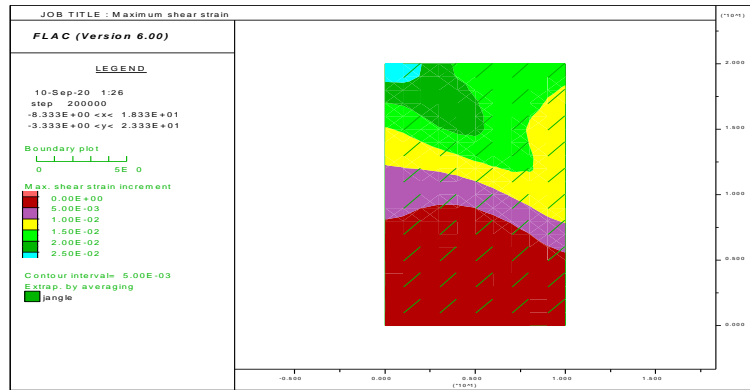
Εικόνα 79. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.7 Γωνία κλίσης 50°



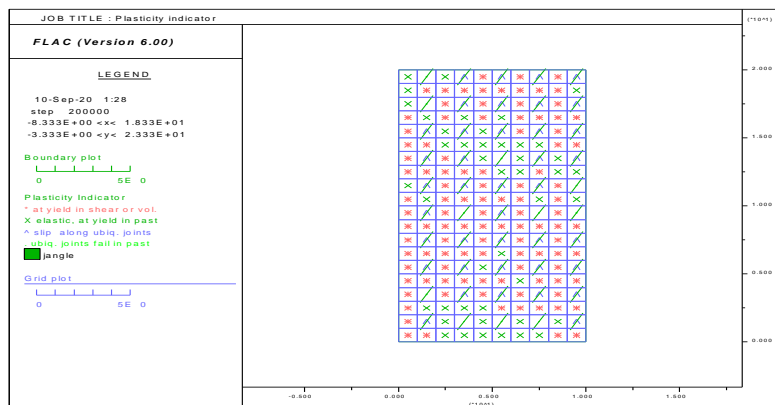
Εικόνα 80. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες είτε στο τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο είτε σε προηγούμενους. Στις υπόλοιπες ζώνες με καταστατικό μοντέλο Mohr Coulomb διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα. Προηγήθηκε η διαρροή του κάτω μέρος του δοκιμίου συγκριτικά με το άνω σ' αυτόν τον υπολογιστικό κύκλο.



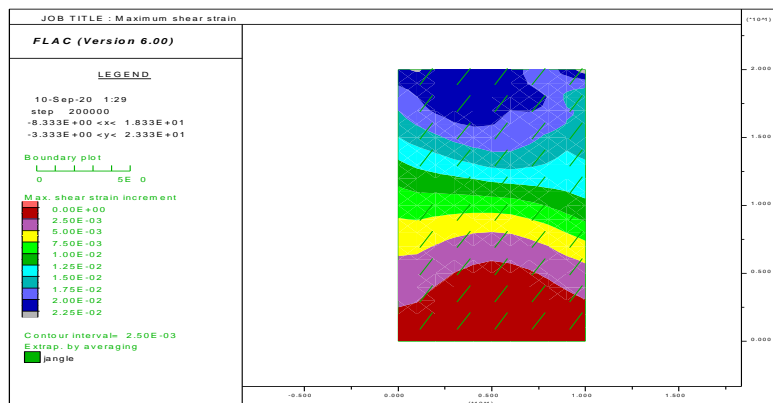
Εικόνα 81. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.8 Γωνία κλίσης 60°



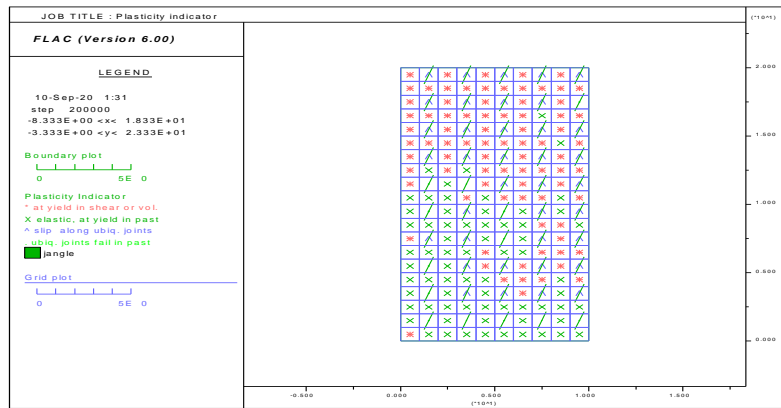
Εικόνα 82. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες είτε στο τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο είτε σε προηγούμενους. Στις υπόλοιπες ζώνες με καταστατικό μοντέλο Mohr Coulomb διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα. Προηγήθηκε η διαρροή του κάτω μέρους του δοκιμίου όπως προηγουμένως.



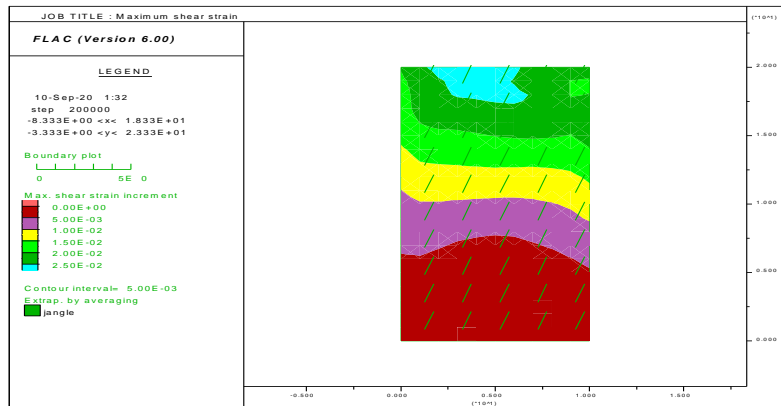
Εικόνα 83. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.9 Γωνία κλίσης 70°



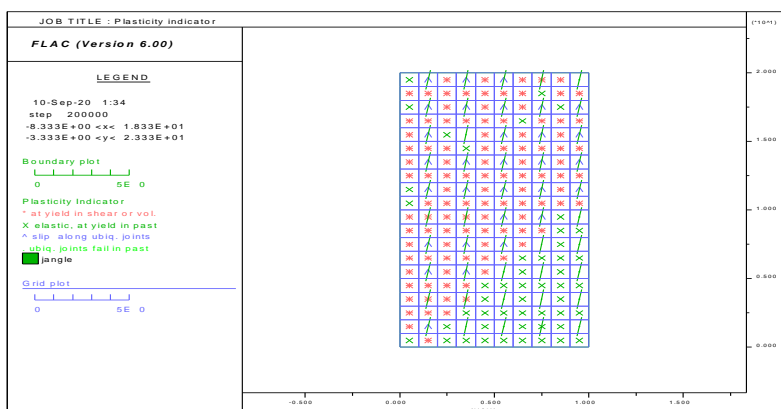
Εικόνα 84. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες είτε στο τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο είτε σε προηγούμενους. Στις υπόλοιπες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC διαρρέει το άρρηκτο.



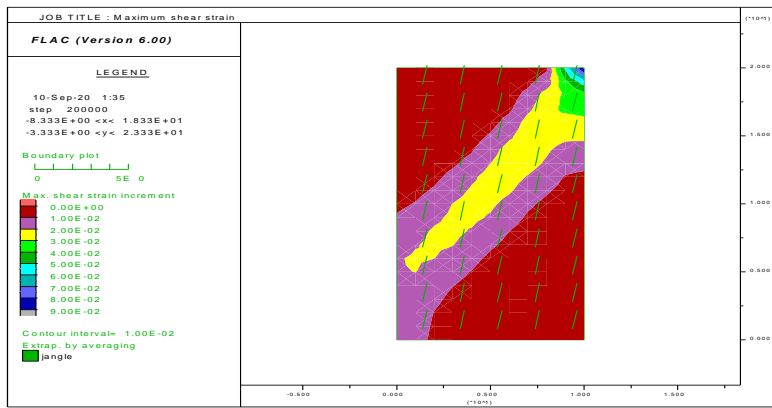
Εικόνα 85. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.4.10 Γωνία κλίσης 80°



Εικόνα 86. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

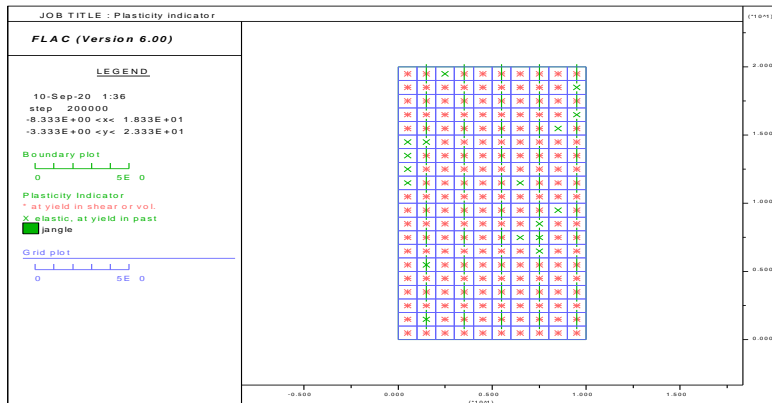
Παρατηρείται μόνο ολίσθηση στις ασυνέχειες είτε στο τρέχοντα υπολογιστικό κύκλο είτε σε προηγούμενους. Στις υπόλοιπες ζώνες με καταστατικό μοντέλο MC διαρρέει το άρρηκτο.



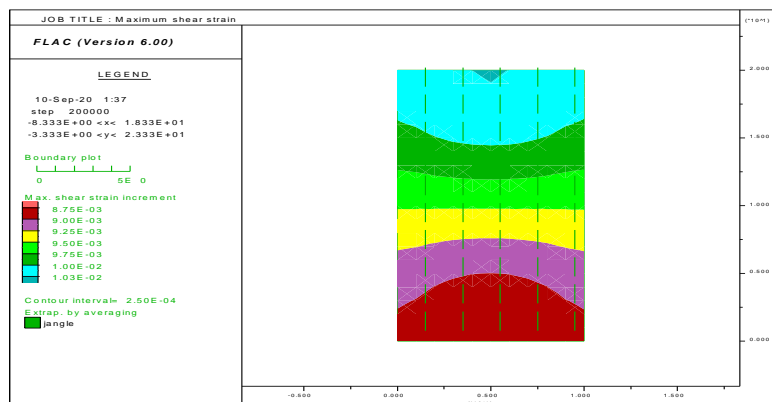
Εικόνα 87. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Παρατηρείται κεκλιμένο μέτωπο σε γωνία 65° από την οριζόντιο που συμπίπτει με τη θεωρητική γωνία του επιπέδου διατμητικής αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο MC ($45+\phi/2$).

4.4.11 Γωνία κλίσης 90°



Εικόνα 88. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου



Εικόνα 89. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Αστοχεί το άρρηκτο σε όλες τις ζώνες όπως αναμένονταν.

4.5 4^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse)- Αραιός κάρναβος

Η βραχομάζα έχει τρεις οικογένειες ασυνεχειών, εκ των οποίων οι δύο είναι κάθετες μεταξύ τους. Η τρίτη οικογένεια ασυνεχειών, η οποία στην σχετική περιγραφή της δομής βραχομάζας κατά την ταξινόμηση GSI θεωρείται ότι έχει παράταξη παράλληλη με το επίπεδο, μεταφέρεται στην αριθμητική προσομοίωση στο επίπεδο με ενδιάμεση των άλλων δύο οικογενειών ασυνεχειών κλίση. Σε όλες τις ζώνες τις ζώνες του μοντέλου ανατίθεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

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°

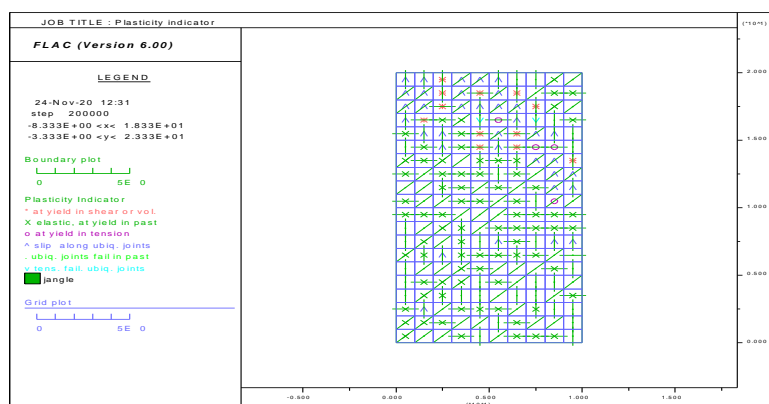
Συνοχή (jcohesion)=10MPa

Γωνία τριβής (jfriction)=40.0°

Γωνία διαστολής (jdilation)=0.0

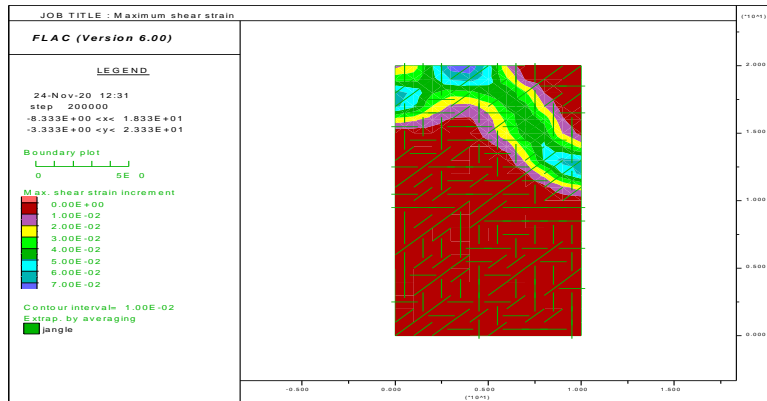
Εφελκυστική αντοχή (jtension)=0.0

4.5.1 Γωνία κλίσης 0°-90°-45°



Εικόνα 90. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

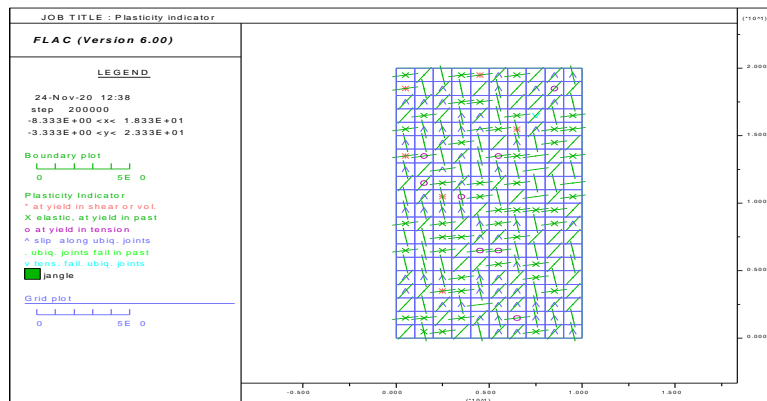
Στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 0° και 90° αστοχεί το άρρηκτο πέτρωμα. Επίσης παρατηρείται ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας 45° . Σε τέσσερις ζώνες σημειώνεται εφελκυστική αστοχία του άρρηκτου. Καθώς ασκείται κατακόρυφη τάση ευνοείται η ολίσθηση των ασυνεχειών κλίσης 90° και 0° εμποδίζουν την διάδοση οπότε μερικές γειτονικές τους αστοχούν εφελκυστικά.



Εικόνα 91. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

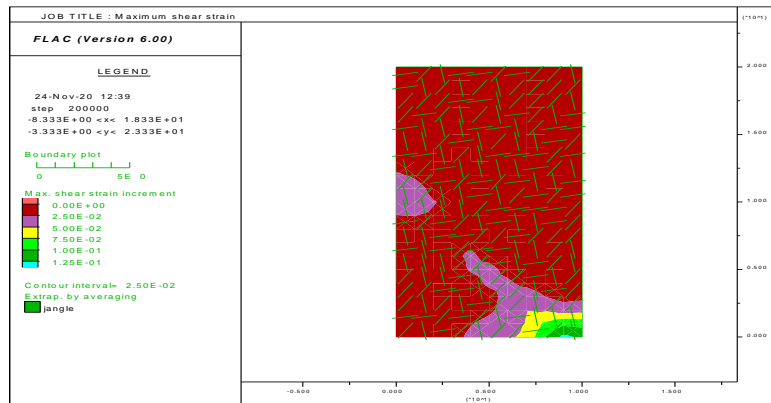
Σχηματίζεται μέτωπο διαρροής κάθετο στην ασυνέχεια κλίσης 65° στο πάνω μέρος του μοντέλου.

4.5.2 Γωνία κλίσης 10° - 100° - 55°



Εικόνα 92. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

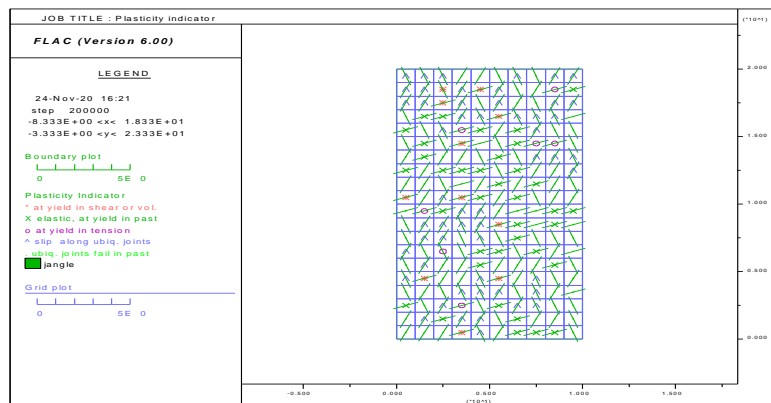
Στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 10° και 100° αστοχεί το άρρηκτο πέτρωμα. Επίσης παρατηρείται ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας 55° . Σε μερικές ζώνες σημειώνεται εφελκυστική αστοχία του άρρηκτου. Καθώς ασκείται κατακόρυφη τάση ευνοείται η ολίσθηση των ασυνεχειών κλίσης 100° και οι ασυνέχειες κλίσης 10° εμποδίζουν την διάδοση οπότε μερικές γειτονικές τους αστοχούν εφελκυστικά.



Εικόνα 93. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

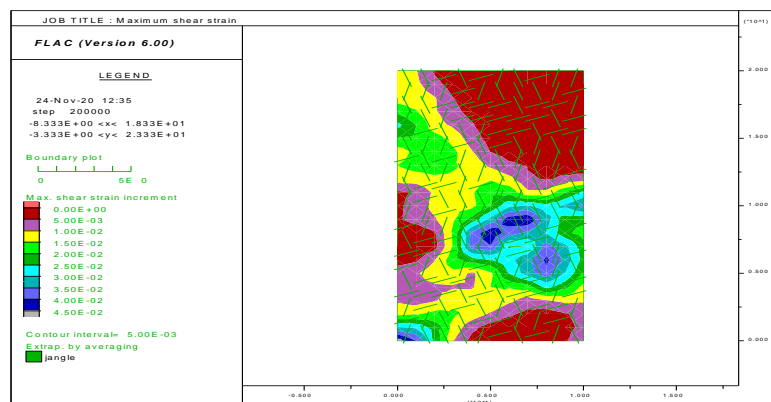
Δεν παρατηρείται μέτωπο διαρροής.

4.5.3 Γωνία κλίσης 20°-110°-65°



Εικόνα 94. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

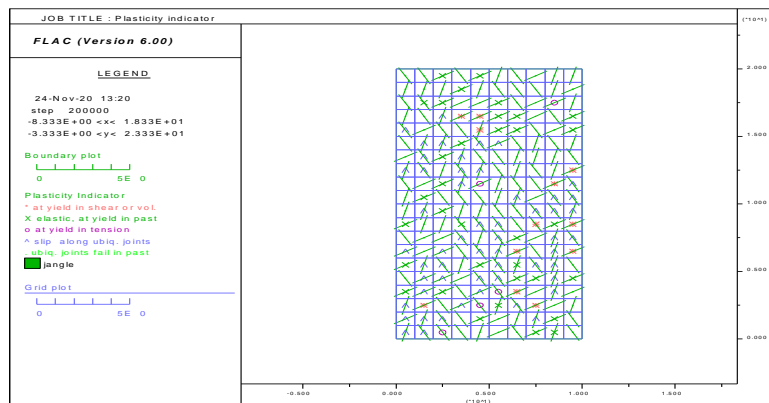
Ολισθαίνουν όλες οι ασυνέχειες με κλίση 110° και οι περισσότερες κλίσης 65°. Το άρρηκτο διαρρέει στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 20°. Ο εφελκυσμός δεν είναι έντονος αλλά εντοπίζεται σε περιοχές που εμποδίζονταν η διαρροή του άρρηκτου λόγω γεωμετρίας.



Εικόνα 95. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

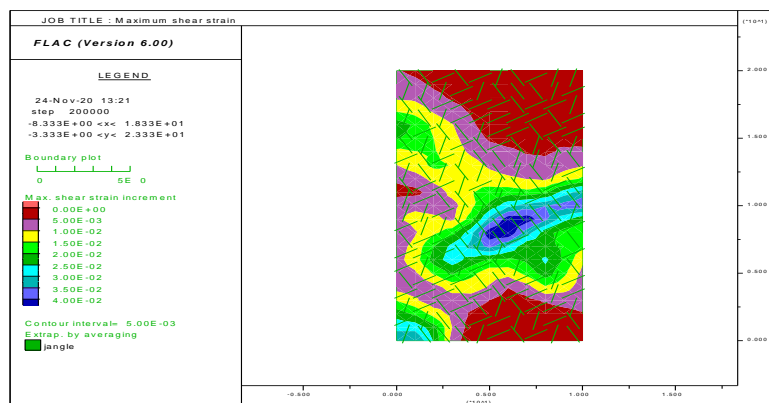
Το μέτωπο διαρροής είναι σχεδόν παράλληλο με την ασυνέχεια κλίσης 110°.

4.5.4 Γωνία κλίσης 30°-120°-75°



Εικόνα 96. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

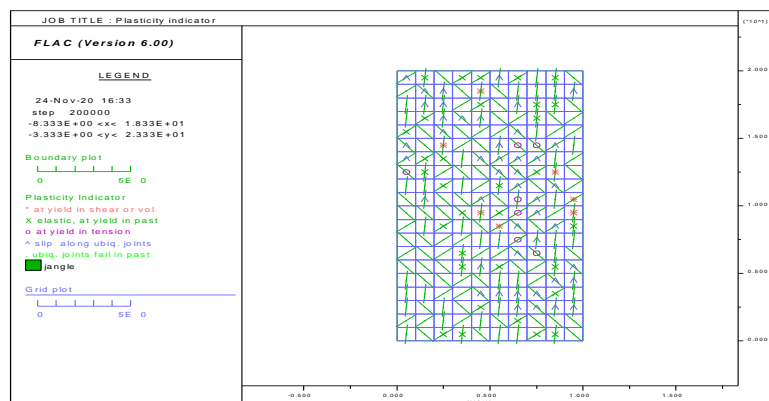
Οι ασυνέχειες κλίσης 120° και 75° ολισθαίνουν. Σε κάποιες ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 30° διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα ειδικά στο κάτω αριστερά άκρο του δοκιμίου. Παρατηρείται αξονικός σχισμός κατά τη διεύθυνση 30° και 85° λόγω εφελκυστικής αστοχίας του άρρηκτου.



Εικόνα 97. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

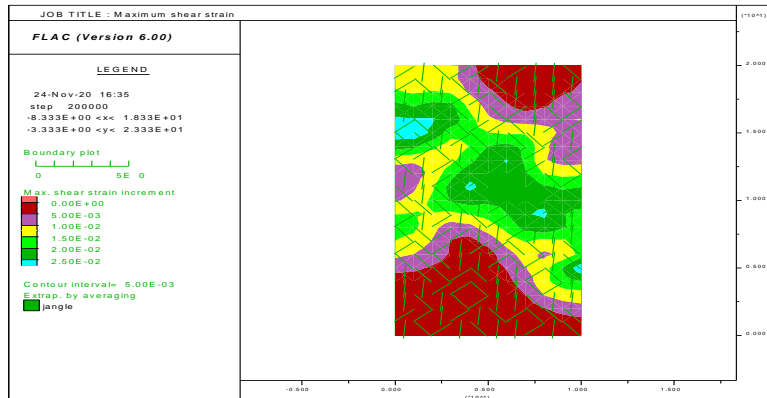
Δεν υπάρχει ορατό μέτωπο διαρροής.

4.5.5 Γωνία κλίσης 40°-130°-85°



Εικόνα 98. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

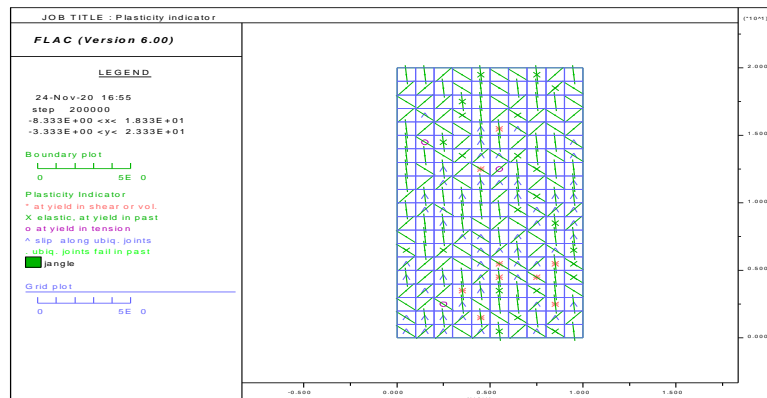
Οι ασυνέχειες κλίσης 130° και 85° ολισθαίνουν. Σε κάποιες ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 40° διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα ειδικά στο κάτω αριστερά άκρο του δοκιμίου. Παρατηρείται αξονικός σχισμός κατά τη διεύθυνση 40° και 85° λόγω εφελκυστικής αστοχίας του άρρηκτου.



Εικόνα 99. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

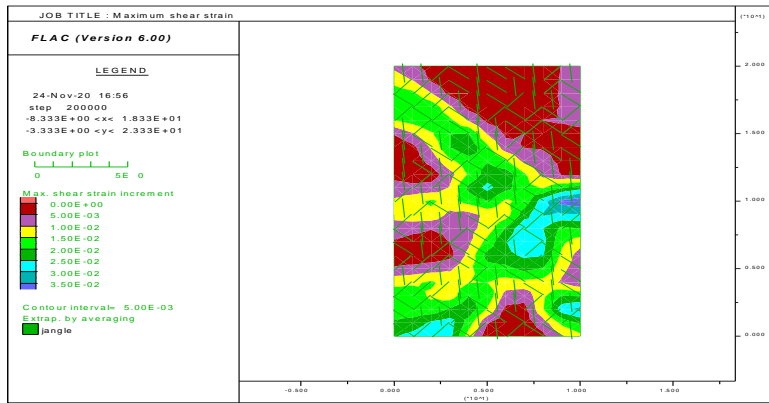
Δεν υπάρχει ορατό μέτωπο διαρροής.

4.5.6 Γωνία κλίσης 50° - 140° - 95°



Εικόνα 100. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

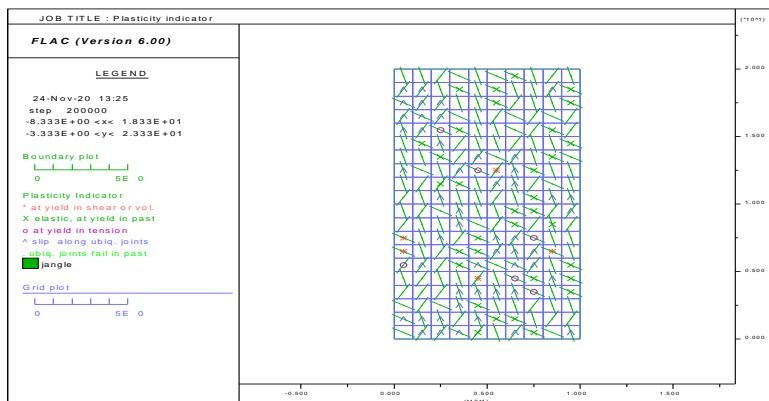
Παρατηρείται ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών κλίσης 50° . Το άρρηκτο πέτρωμα διέρρευσε στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 140° και 95° κυρίως στο κάτω αριστερά άκρο του δοκιμίου. Στο κέντρο βλέπουμε εφελκυστική αστοχία καθώς οι συγκεκριμένες ζώνες περιβάλλονται από ζώνες με ασυνέχειες που δεν επιτρέπουν λόγω της κλίσης τους την διάδοση της αστοχίας στο εσωτερικό τους, οπότε αστοχούν σε εφελκυσμό.



Εικόνα 101. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

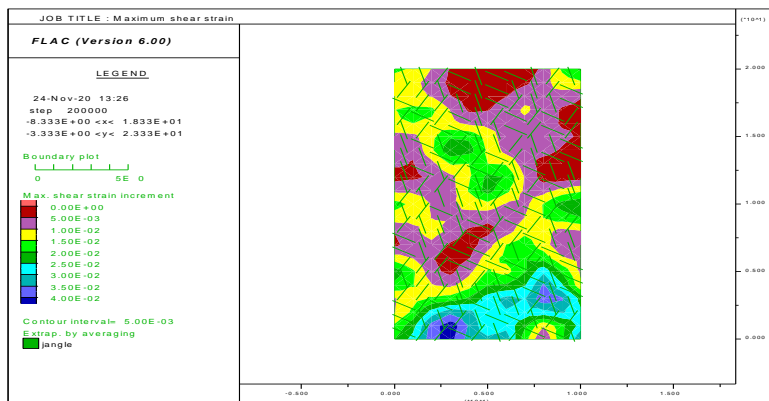
Παρατηρείται ένα μέτωπο διαρροής σχεδόν κάθετο στην ασυνέχεια κλίσης 50°.

4.5.7 Γωνία κλίσης 60°-150°-115°



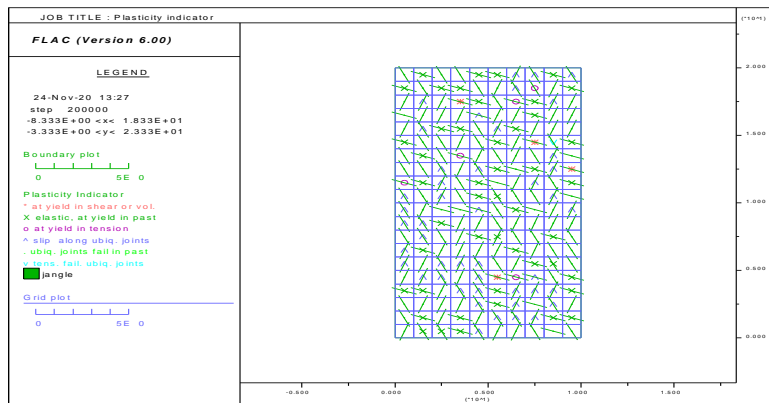
Εικόνα 102. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Ολισθαίνουν όλες οι ασυνέχειες κλίσης 95° και το άρρηκτο διαρρέει κυρίως στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 140° και 50°. Ο εφελκυσμός μας δίνει ένα επίπεδο διαρροής του άρρηκτου παράλληλο στη διεύθυνση ασυνέχειας 140°. Επίσης δεν παρατηρείται μέτωπο διαρροής.



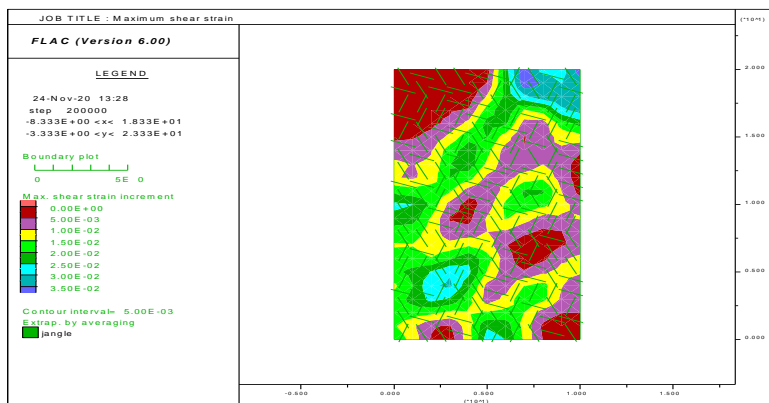
Εικόνα 103. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.5.8 Γωνία κλίσης 70°-160°-125°



Εικόνα 104. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

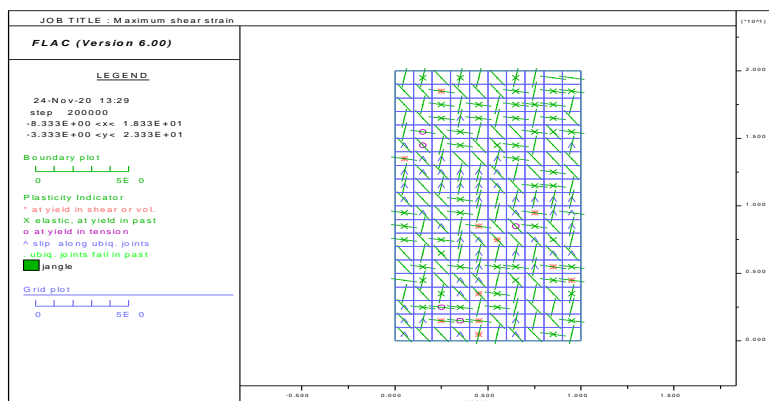
Το άρρηκτο πέτρωμα διαρρέει σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 160° και σε μερικές αστοχεί σε εφελκυσμό. Ολισθαίνουν οι ασυνέχειες κλίσης 70° και 125°. Παρατηρείται ένας σχισμός κατά τη διεύθυνση 70°.



Εικόνα 105. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

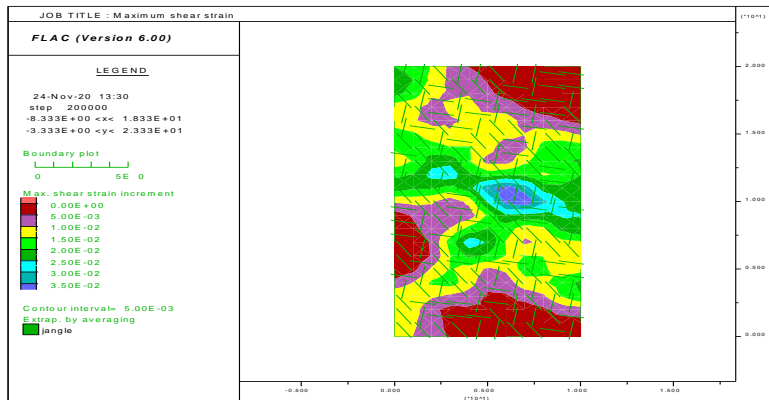
Δεν υπάρχει ορατό μέτωπο.

4.5.9 Γωνία κλίσης 80°-170°-125°



Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

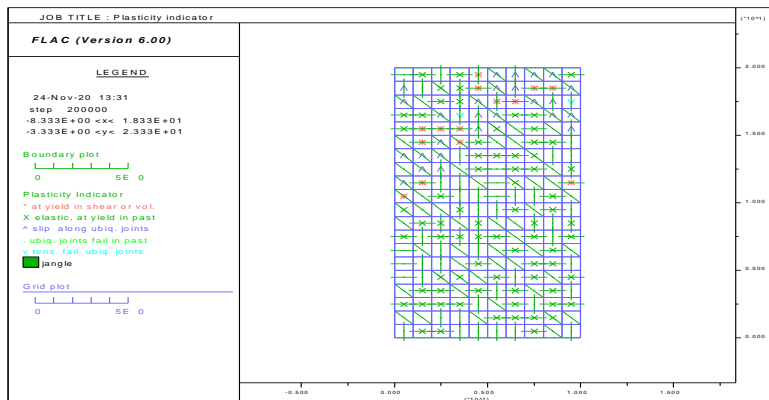
Παρατηρείται αστοχία του άρρηκτου σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 170° και σε μερικές διεύθυνσης 125° αστοχεί εφελκυστικά. Οι ασυνέχειες κλίσης 80° ολισθαίνουν με εξαίρεση τα άκρα του μοντέλου όπου διαρρέει το άρρηκτο.



Εικόνα 106. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

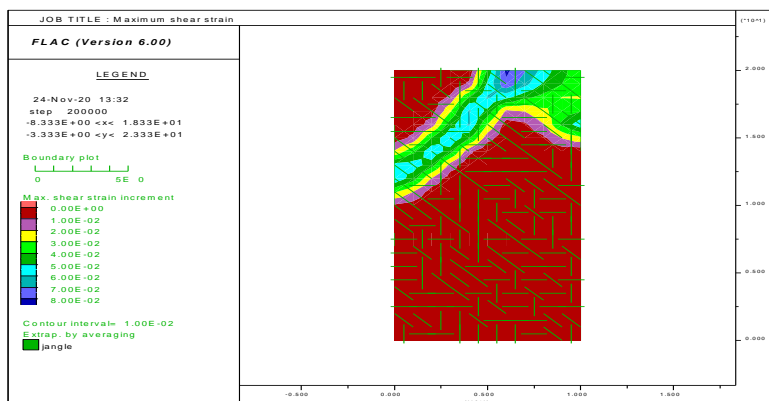
Δεν παρατηρείται μέτωπο διαρροής.

4.5.10 Γωνία κλίσης 90°-180-135°



Εικόνα 107. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Το άρρηκτο αστοχεί στις περισσότερες ζώνες του μοντέλου με κλίση 90° και 180°. Στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 135° κυρίως αλλά και 90° παρατηρείται ολίσθηση στο μήκος τους.



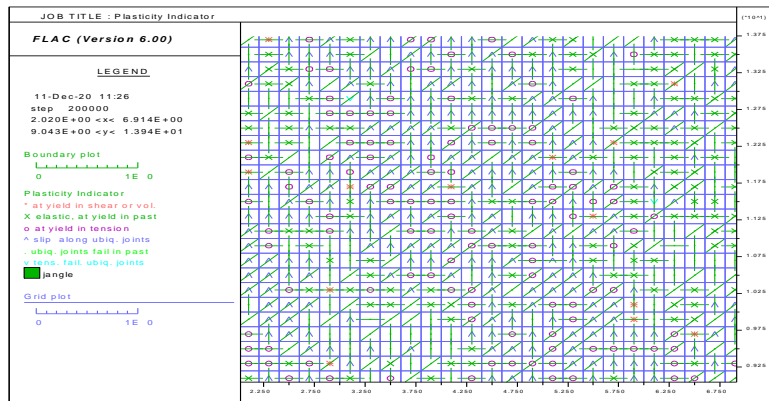
Εικόνα 108. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

Παρατηρείται μέτωπο διαρροής κατά μήκος της διεύθυνσης ασυνέχειας 80° στο άνω τμήμα του μοντέλου.

4.6 5^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse)-Πυκνός κάρναβος

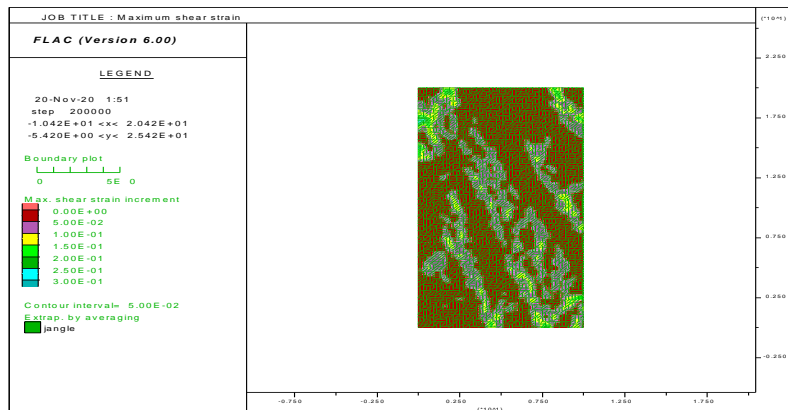
4.6.1 UJ3-Blocky-coarse-Πλευρική 0.5 MPa

4.6.1.1 Γωνία κλίσης 0° - 90° - 45°



Εικόνα 109. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

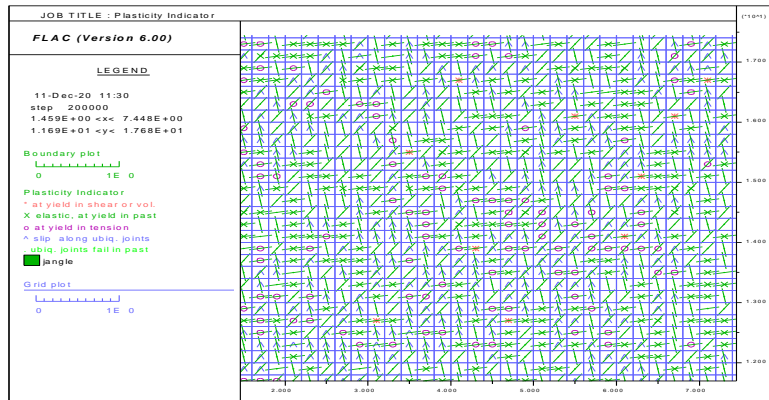
Η αστοχία εκδηλώνεται με αστοχία σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 0° και με ολίσθηση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν τις ασυνέχειες κλίσης 90° και 45° .



Εικόνα 110. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

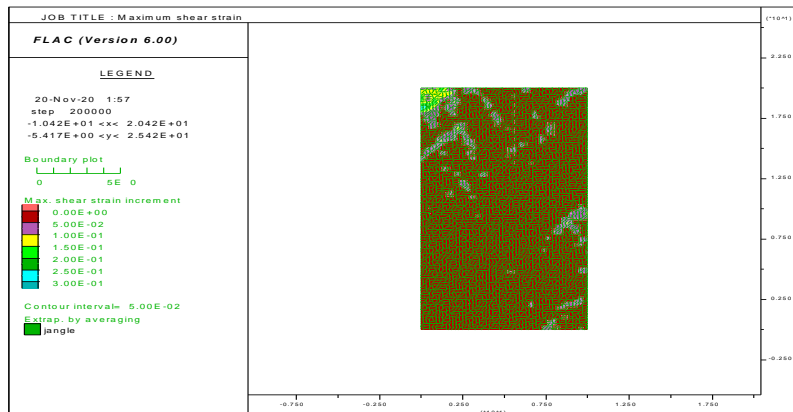
Σχηματίζονται μέτωπα διαρροής κάθετα στην ασυνέχεια κλίσης 45° που επιβεβαιώνουν την έντονη συνεισφορά του άρρηκτου στη διαρροή.

4.6.1.2 Γωνία κλίσης 10°-100°-55°



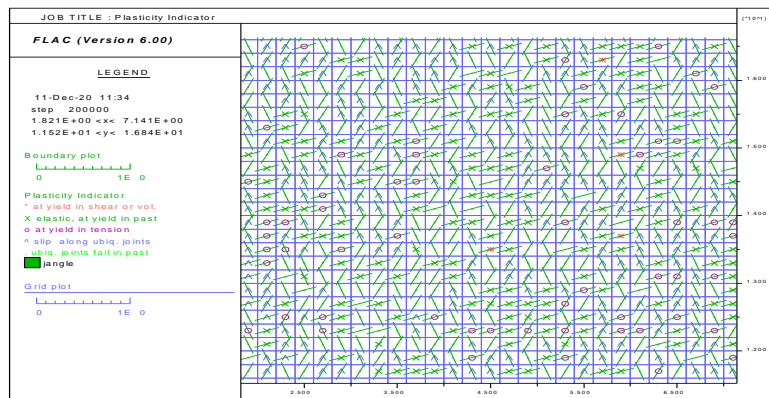
Εικόνα 111. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Το άρρηκτο αστοχεί σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 10° σε πολλές εκ των οποίων εφελκυστικά. Οι ασυνέχειες κλίσης 100° και 55° ολισθαίνουν. Δεν υπάρχει μέτωπο διαρροής.



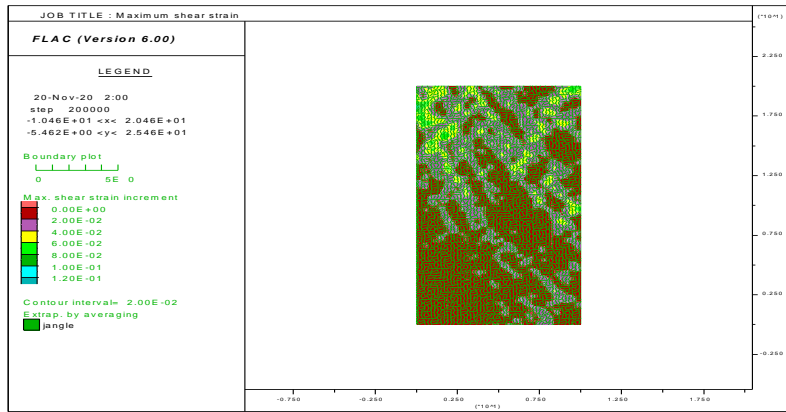
Εικόνα 112. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.1.3 Γωνία κλίσης 20°-110°-65°



Εικόνα 113. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

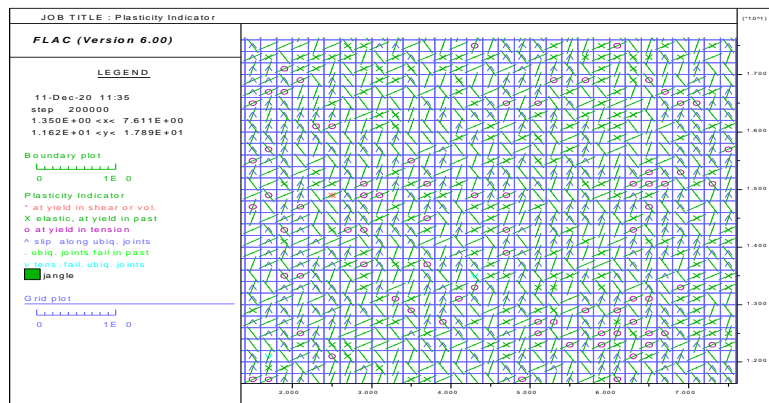
Το άρρηκτο αστοχεί σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 20° σε πολλές εκ των οποίων εφελκυστικά. Οι ασυνέχειες κλίσης 110° και 65° ολισθαίνουν.



Εικόνα 114. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

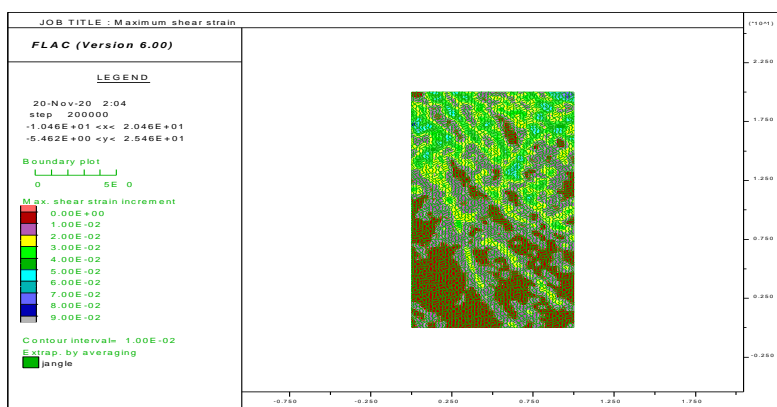
Διαφάνονται μέτωπα διαρροής κατά τη διεύθυνση της ασυνέχειας με κλίση 110°.

4.6.1.4 Γωνία κλίσης 30°-120°-75°



Εικόνα 115. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

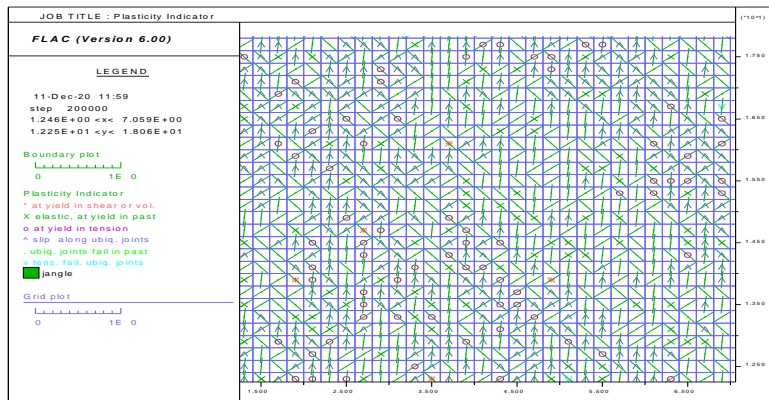
Το άρρηκτο αστοχεί σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 30° σε πολλές εκ των οποίων εφελκυστικά. Οι ασυνέχειες κλίσης 120° και 75° ολισθαίνουν.



Εικόνα 116. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

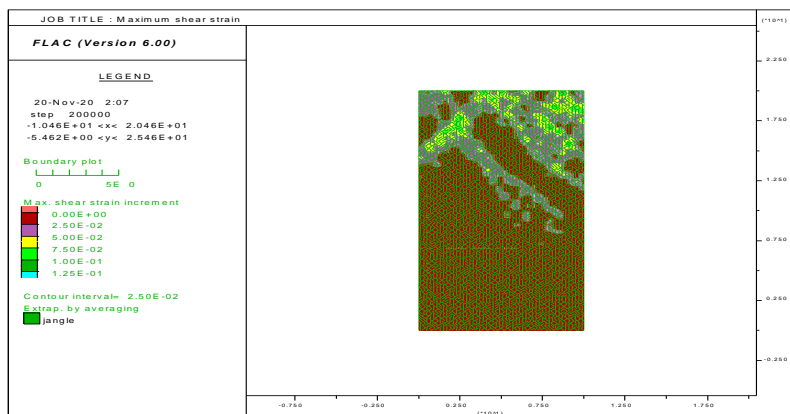
Φαίνεται ότι μειώνεται η συνεισφορά του άρρηκτου στη διαρροή.

4.6.1.5 Γωνία κλίσης 40°-130°-85°



Εικόνα 117. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

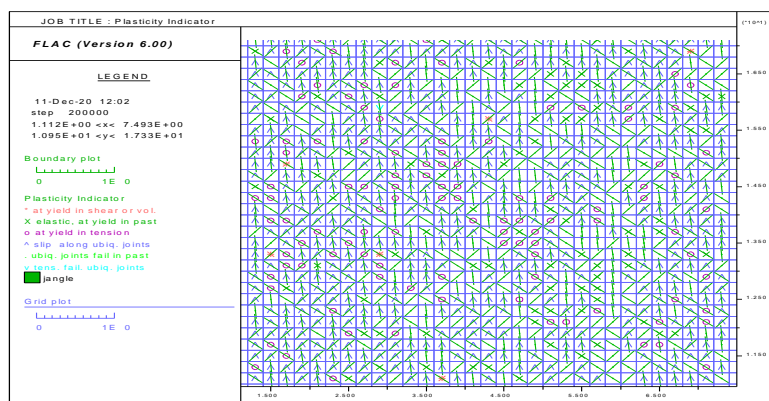
Το άρρηκτο αστοχεί σε όλες τις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 40° σε πολλές εκ των οποίων εφελκυστικά. Η συνεισφορά του είναι μικρότερη απ' ότι στα προηγούμενα μοντέλα. Κυρίως οι ασυνέχειες κλίσης 130° και 85° ολισθαίνουν.



Εικόνα 118. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

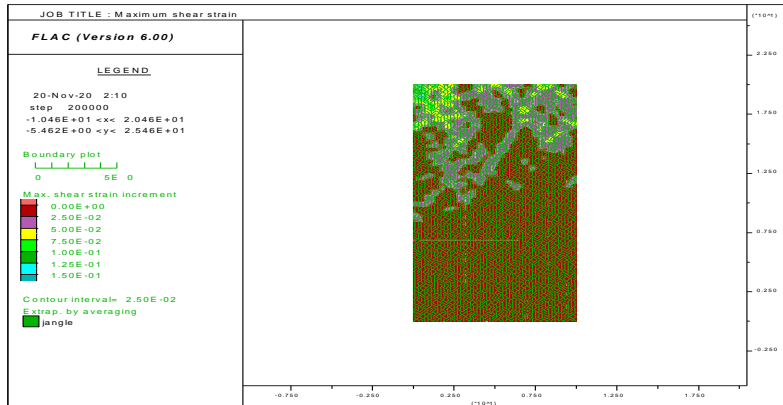
Δεν υπάρχει μέτωπο διαρροής.

4.6.1.6 Γωνία κλίσης 50°-140°-95°



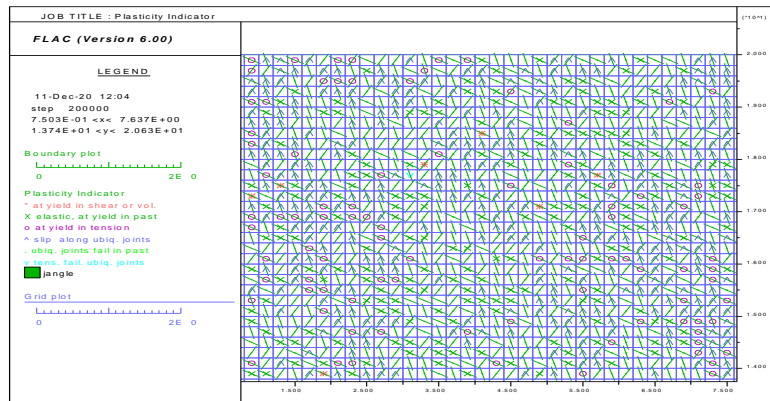
Εικόνα 119. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Το άρρηκτο πέτρωμα διαρρέει στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 50° και 140°. Ολισθαίνουν κυρίως οι ασυνέχειες κλίσης 95° και 140°. Έπειτα φαίνεται ότι δεν υπάρχει μέτωπο διαρροής.



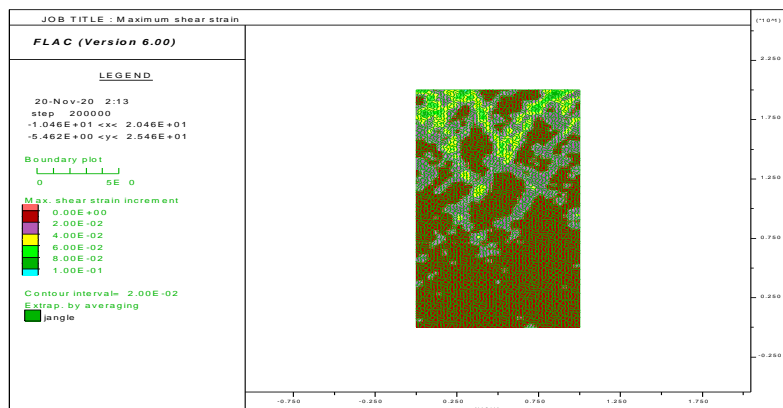
Εικόνα 120. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.1.7 Γωνία κλίσης 60°-150°-105°



Εικόνα 121. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

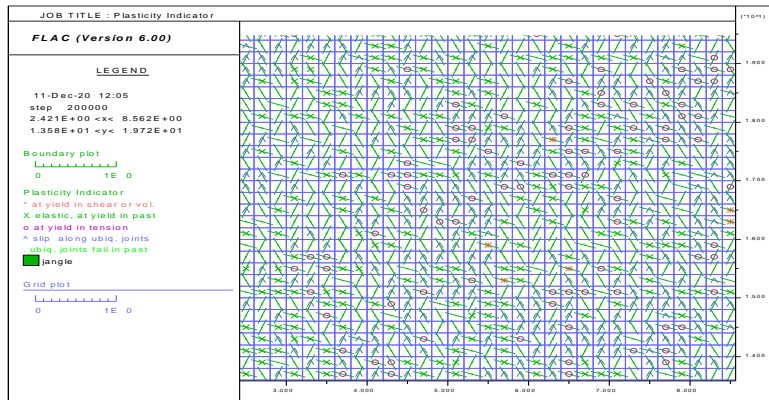
Η διαρροή εκδηλώνεται με αστοχία του άρρηκτου στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 150°. Οι ασυνέχειες που ολισθαίνουν είναι κλίσης 60° και 105°.



Εικόνα 122. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

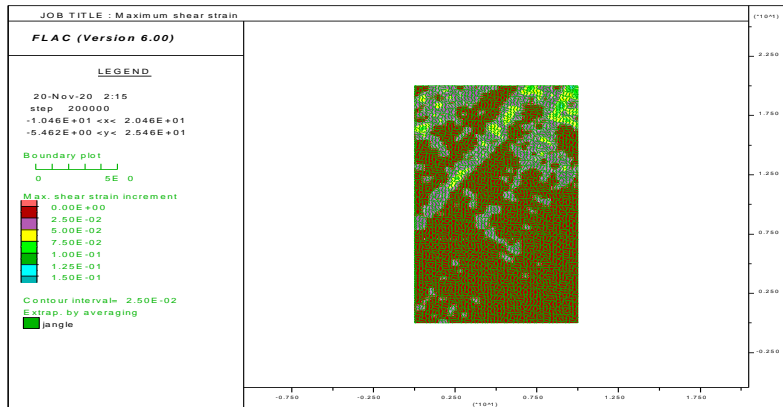
Δεν υπάρχει μέτωπο διαρροής.

4.6.1.8 Γωνία κλίσης 70°-160°-115°



Εικόνα 123. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

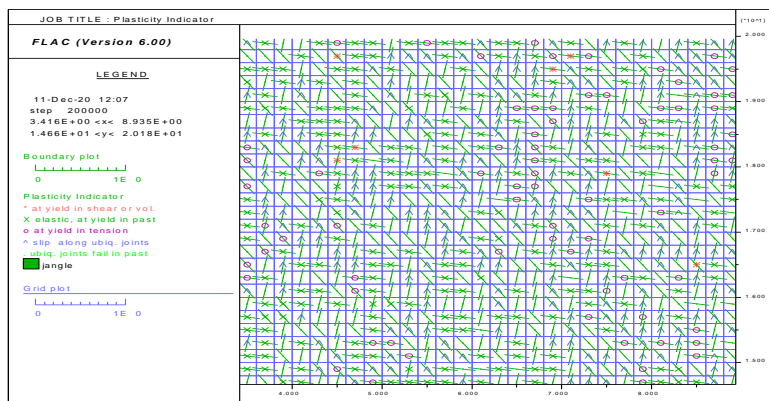
Η διαρροή εκδηλώνεται με αστοχία του άρρηκτου στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 70°. Οι ασυνέχειες που ολισθαίνουν είναι κλίσης 160° και 115°.



Εικόνα 124. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

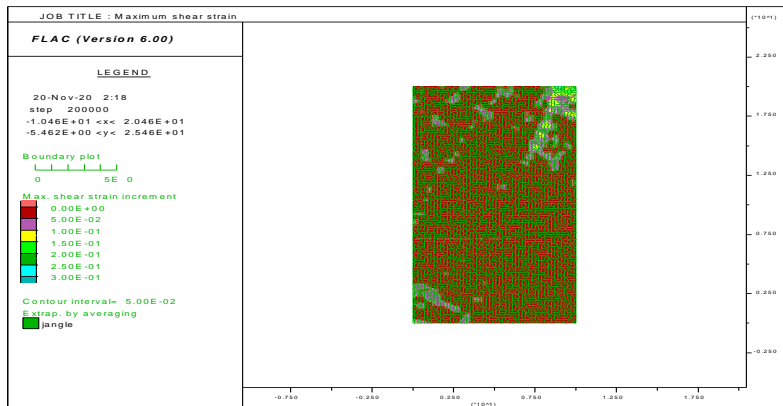
Παρατηρείται ένα μέτωπο διαρροής παράλληλο με την ασυνέχεια κλίσης 70°.

4.6.1.9 Γωνία κλίσης 80°-170°-125°



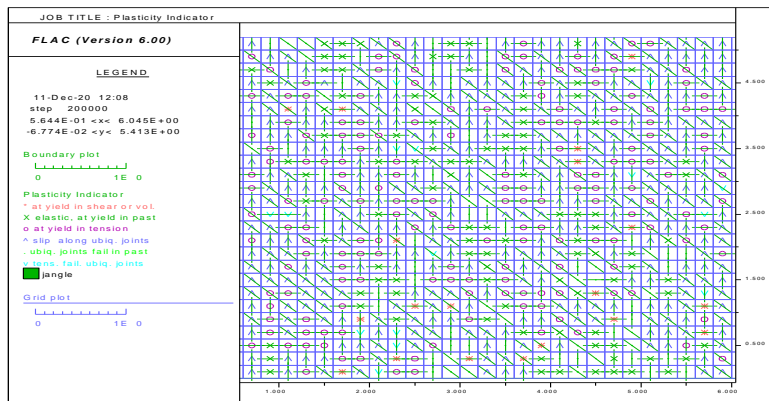
Εικόνα 125. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Η διαρροή εκδηλώνεται με αστοχία του άρρηκτου στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 80°. Οι ασυνέχειες που ολισθαίνουν είναι κλίσης 170° και 125°. Δεν υπάρχει μέτωπο διαρροής.



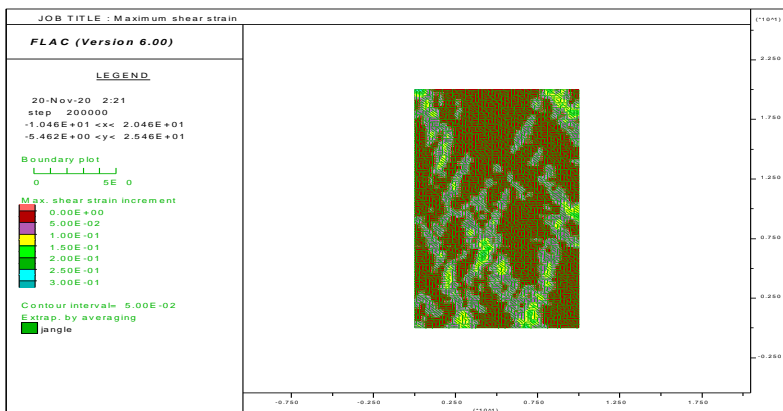
Εικόνα 126. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.1.10 Γωνία κλίσης 90°-180°-135°



Εικόνα 127. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

Η διαρροή εκδηλώνεται με αστοχία του άρρηκτου στις ζώνες με ασυνέχεια κλίσης 180° και 135°. Οι ασυνέχειες που ολισθαίνουν είναι κλίσης 90° και 135°.



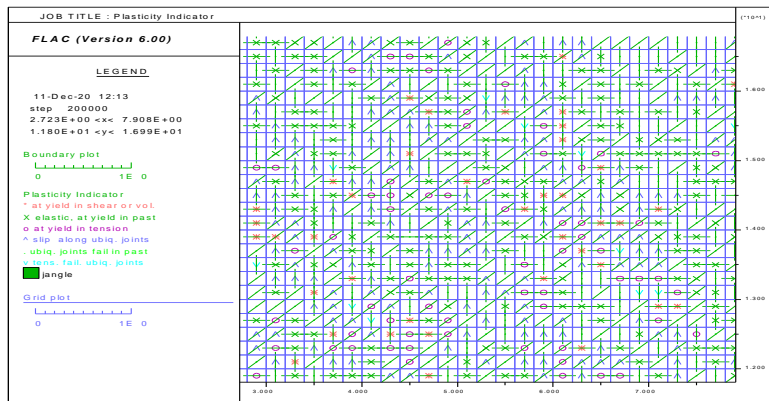
Εικόνα 128. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

Σχηματίζεται μέτωπο διαρροής παράλληλο με την ασυνέχεια κλίσης 135°.

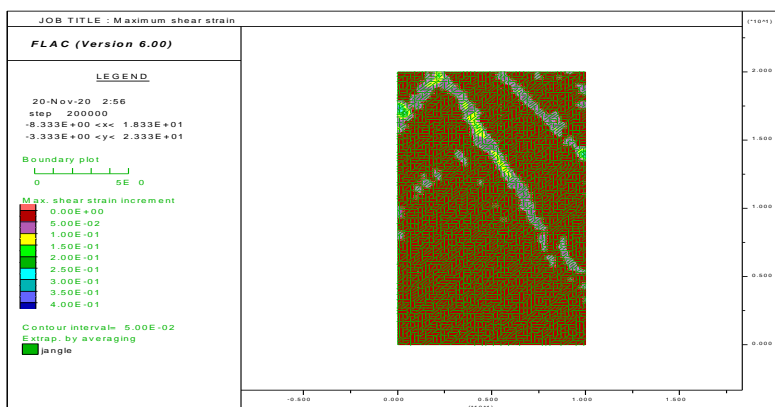
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στις επόμενες σειρές μοντέλων για δύο διαφορετικές τιμές πλευρικών πιέσεων 2MPa και 5MPa.

4.6.2 UJ3-Blocky-coarse-Πλευρική 2 MPa

4.6.2.1 Γωνία κλίσης 0°-90°-45°

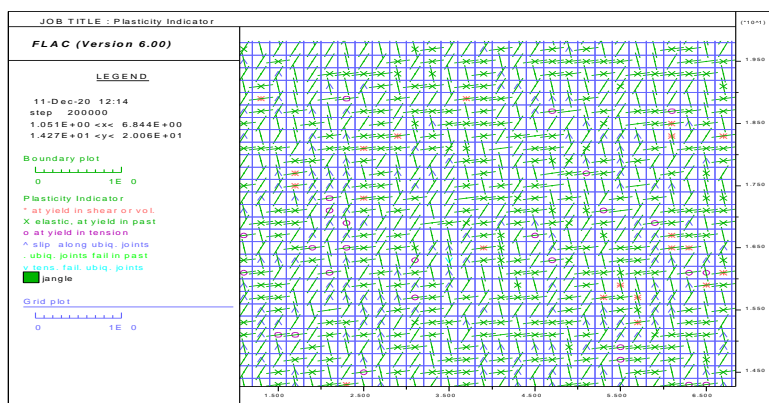


Εικόνα 129. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

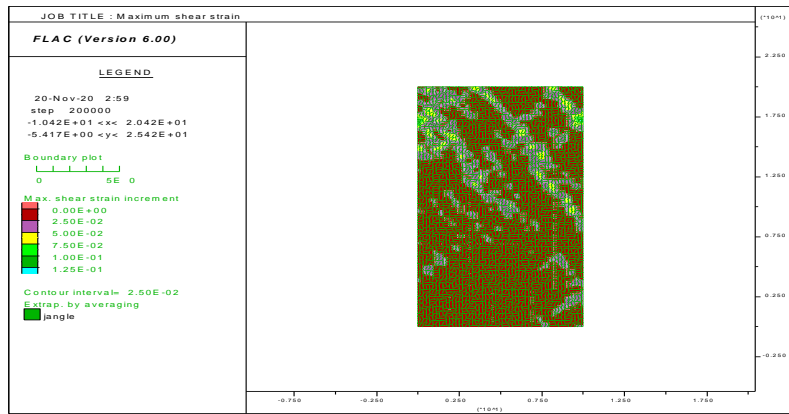


Εικόνα 130. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.2 Γωνία κλίσης 10°-100°-55°

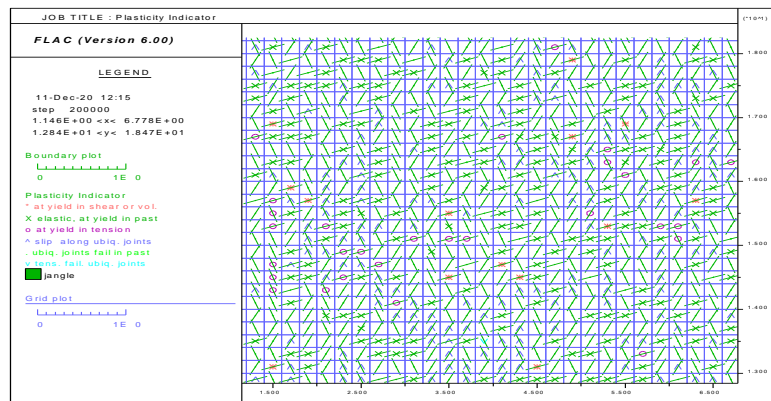


Εικόνα 131. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

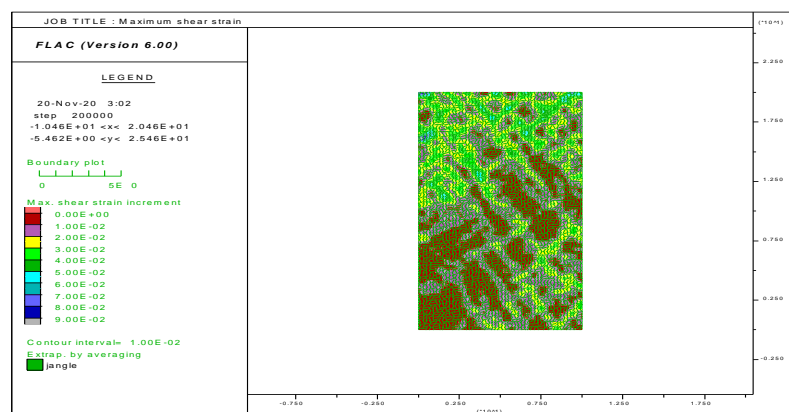


Εικόνα 132. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.3 Γωνία κλίσης 20°-110°-65°

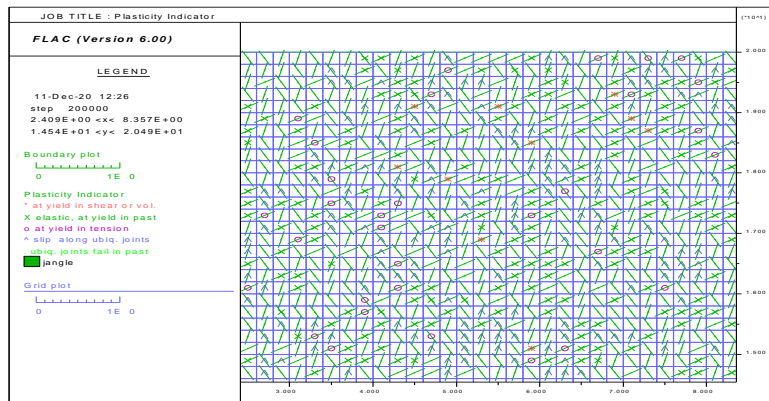


Εικόνα 133. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

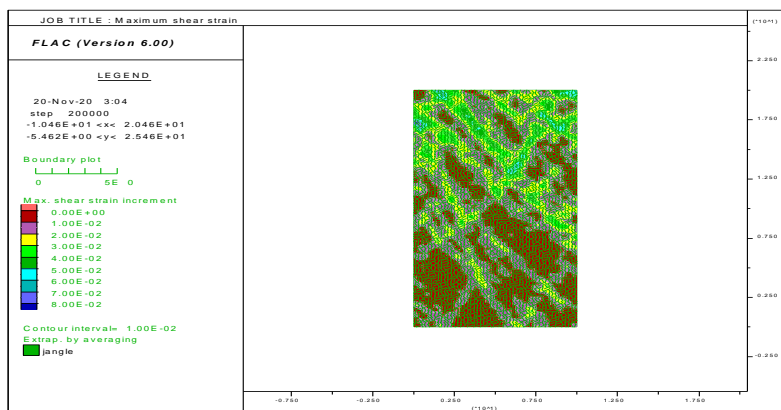


Εικόνα 134. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.4 Γωνία κλίσης 30°-120°-75°

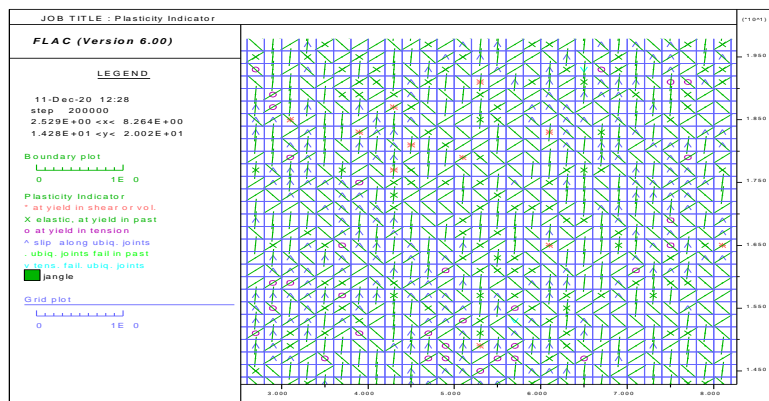


Εικόνα 135. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

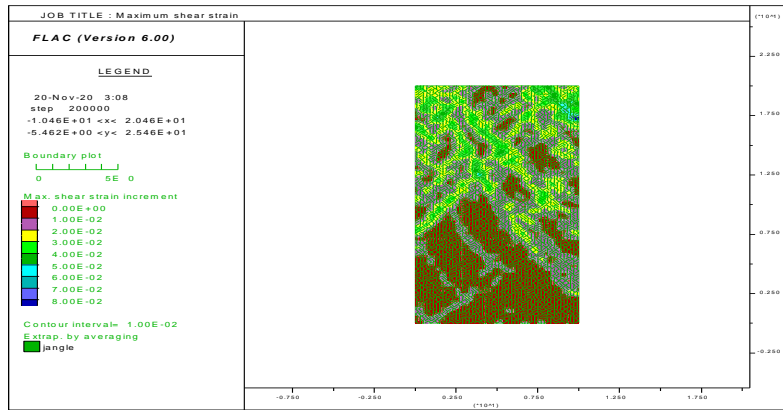


Εικόνα 136. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.5 Γωνία κλίσης 40°-130°-85°

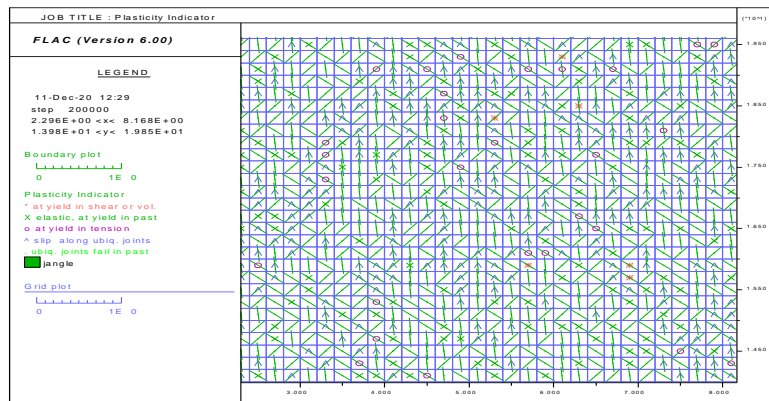


Εικόνα 137. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

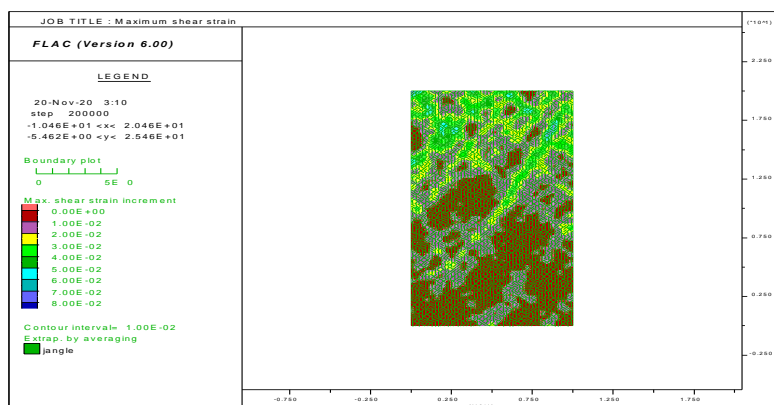


Εικόνα 138. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.6 Γωνία κλίσης 50°-140°-95°

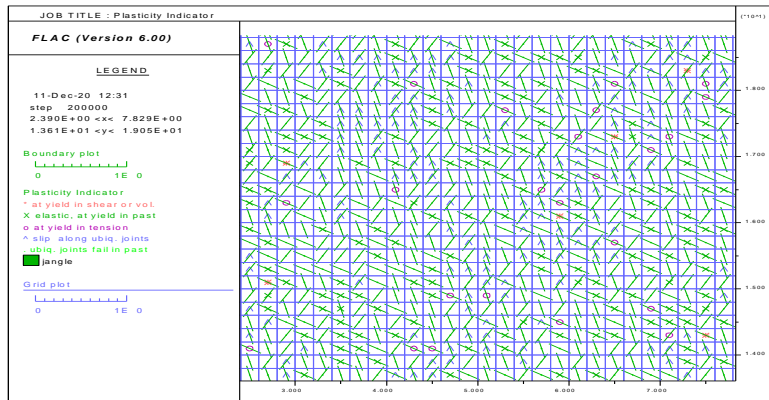


Εικόνα 139. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

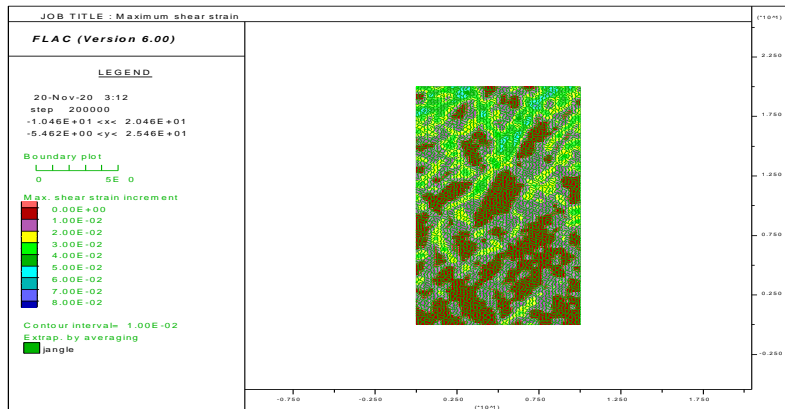


Εικόνα 140. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.7 Γωνία κλίσης 60°-150°-105°

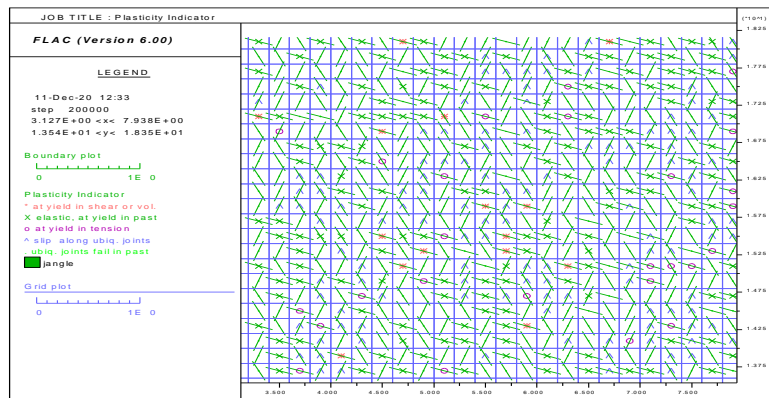


Εικόνα 141. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

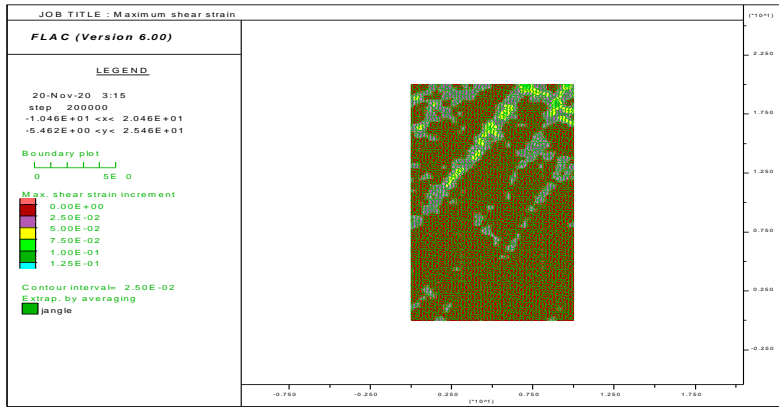


Εικόνα 142. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.2.8 Γωνία κλίσης 70°-160°-115°

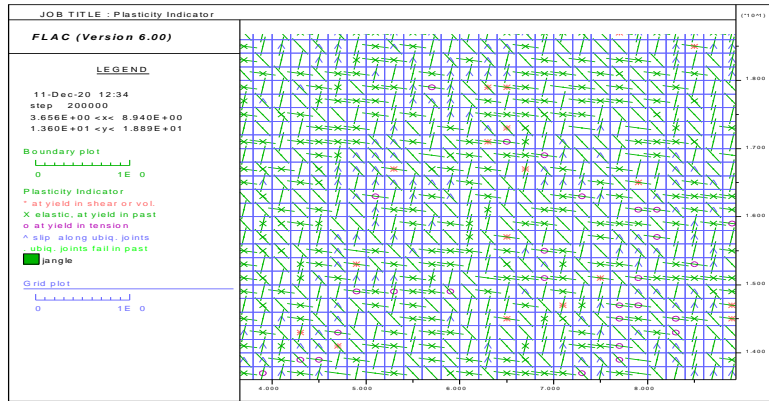


Εικόνα 143. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

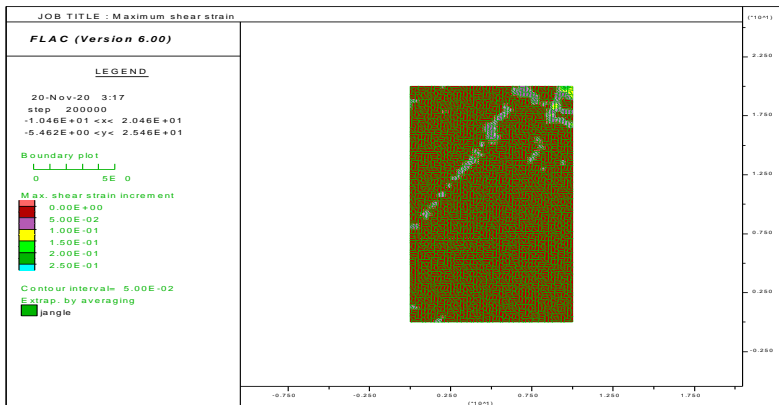


Εικόνα 144. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

4.6.2.9 Γωνία κλίσης 80°-170°-125°

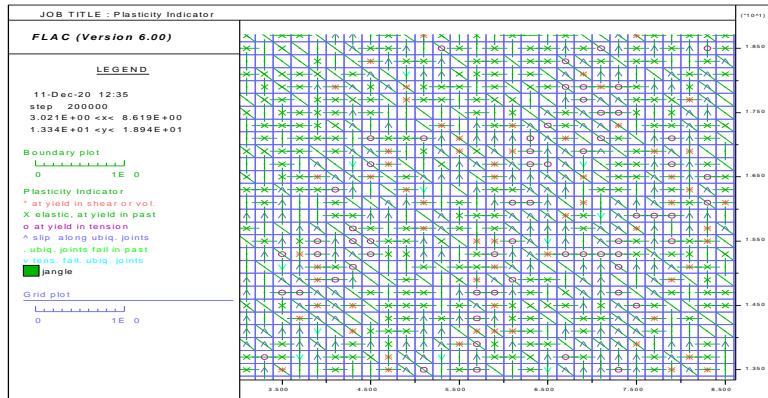


Εικόνα 145. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

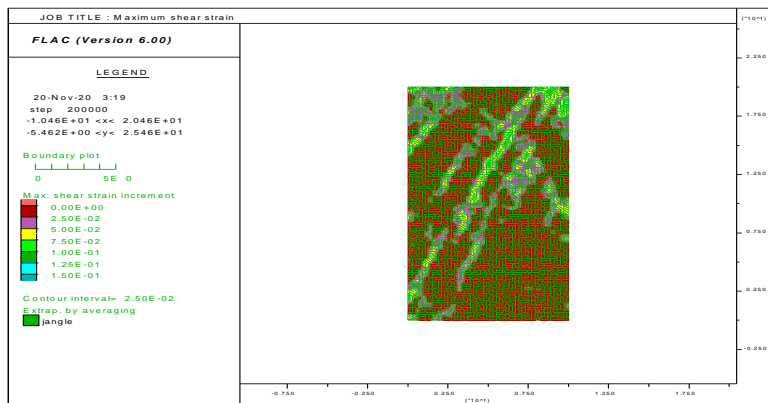


Εικόνα 146. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

4.6.2.10 Γωνία κλίσης 90°-180°-135°



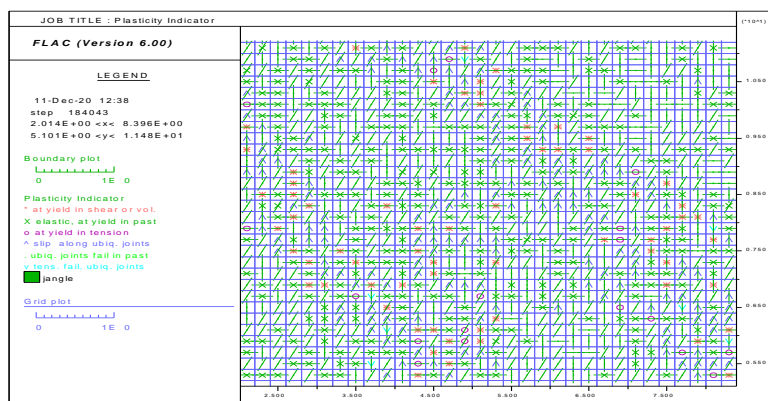
Εικόνα 147. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου



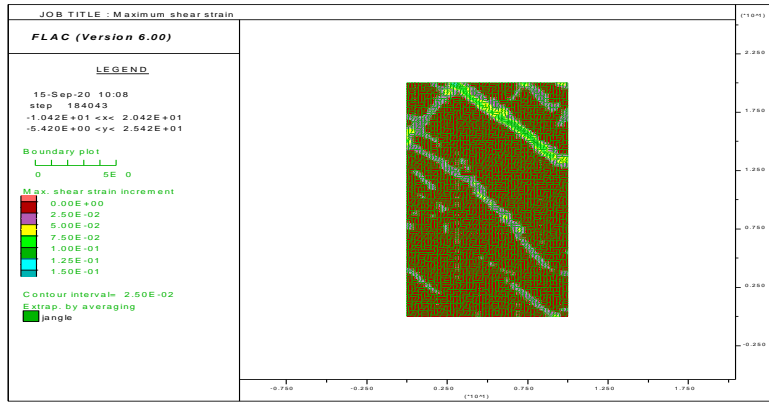
Εικόνα 148. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.3 UJ3-Blocky-coarse-Πλευρική 5 MPa

4.6.3.1 Γωνία κλίσης 0°-90°-45°

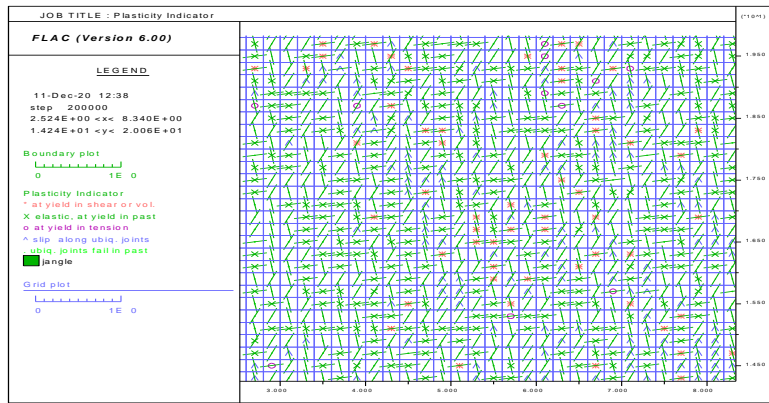


Εικόνα 149. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

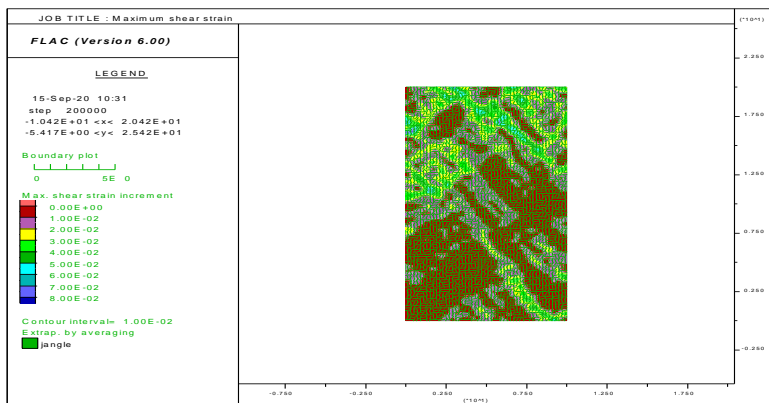


Εικόνα 150. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.3.2 Γωνία κλίσης 10°-100°-55°

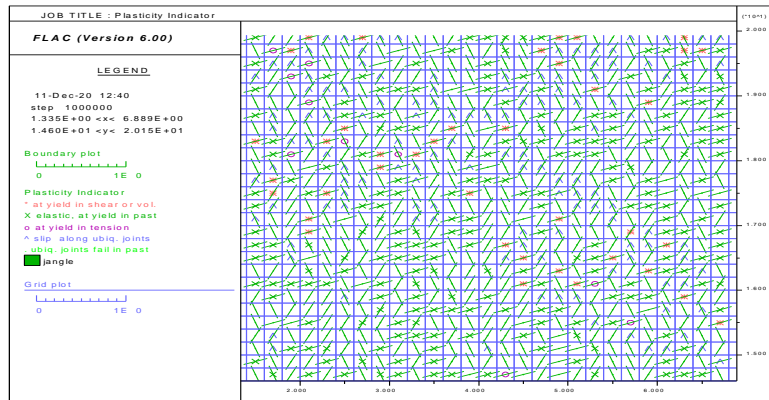


Εικόνα 151. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

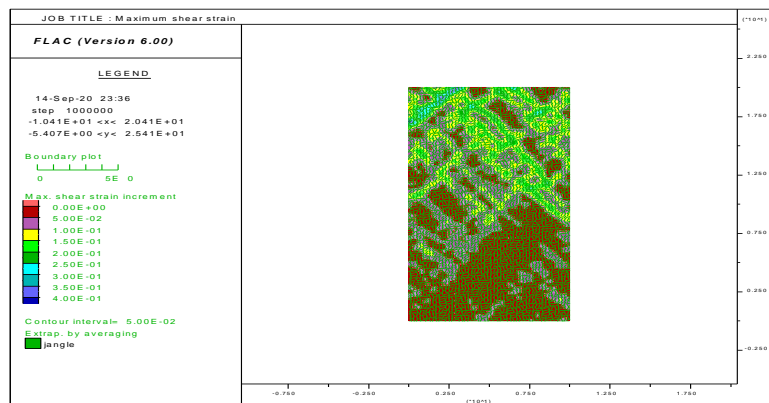


Εικόνα 152. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.3.3 Γωνία κλίσης 20°-110°-65°

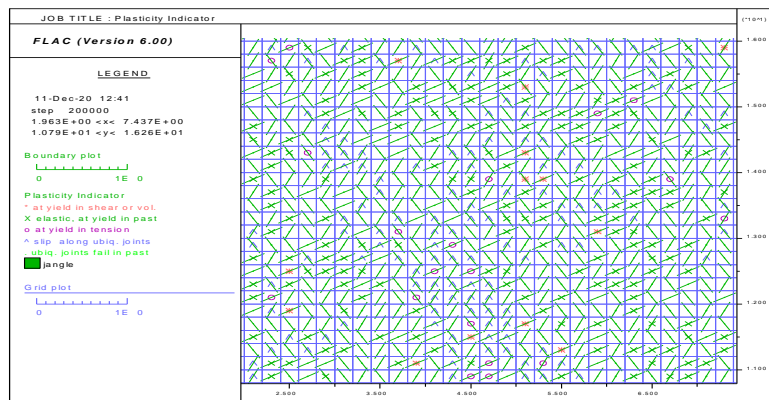


Εικόνα 153. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

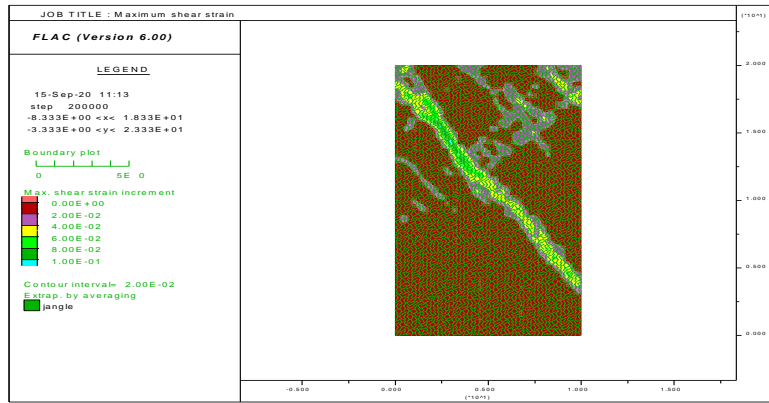


Εικόνα 154. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

4.6.3.4 Γωνία κλίσης 30°-120°-75°

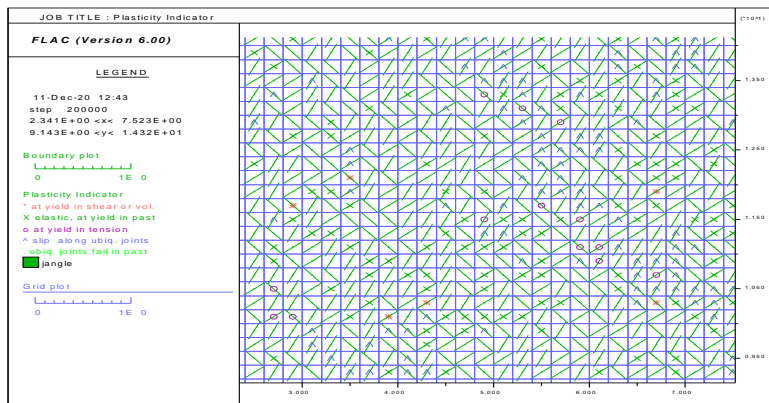


Εικόνα 155. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

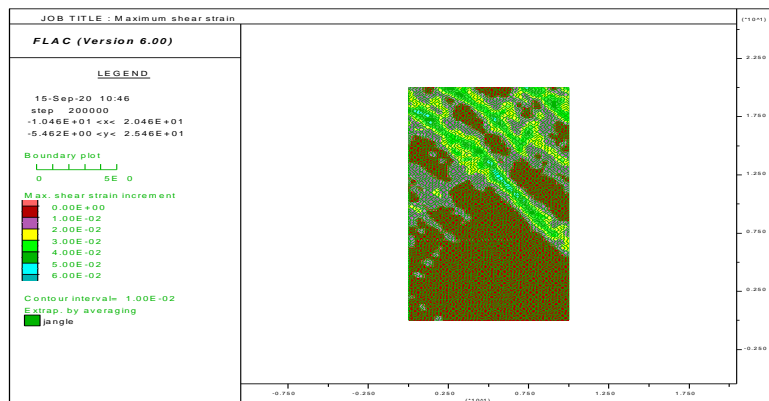


Εικόνα 156. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

4.6.3.5 Γωνία κλίσης 40°-130°-85°

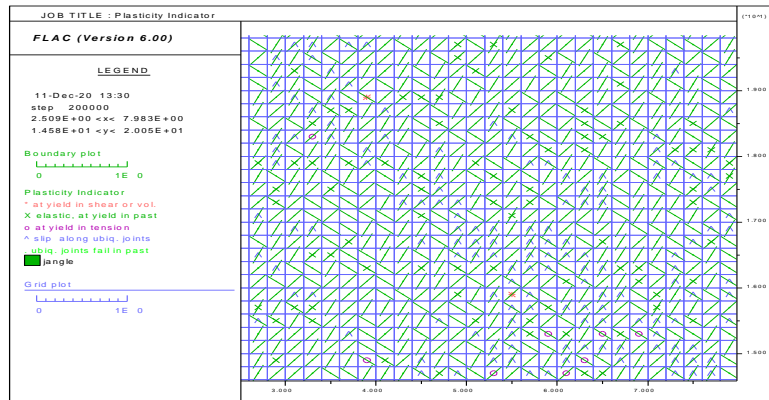


Εικόνα 157. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

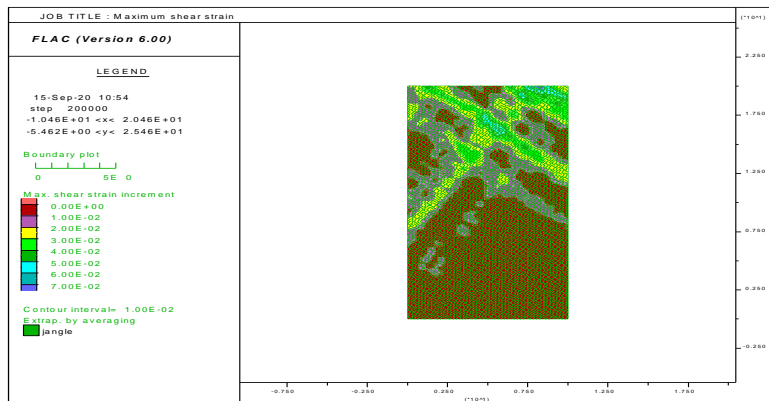


Εικόνα 158. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

4.6.3.6 Γωνία κλίσης 50°-140°-95°

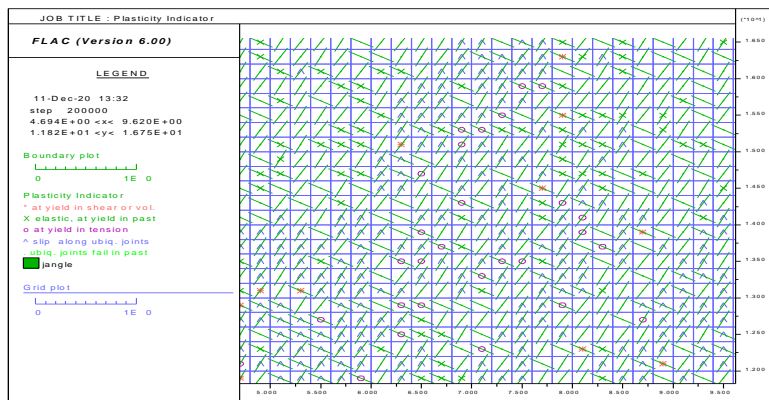


Εικόνα 159. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

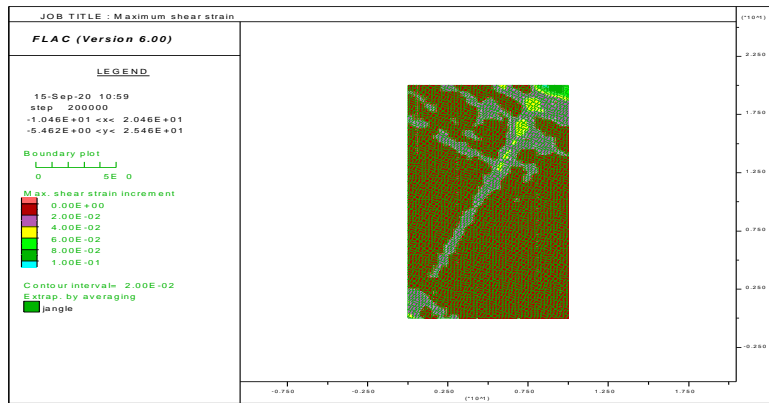


Εικόνα 160. Τρέχουσα αύξηση της διαμητικής τροπής

4.6.3.7 Γωνία κλίσης 60°-150°-105°

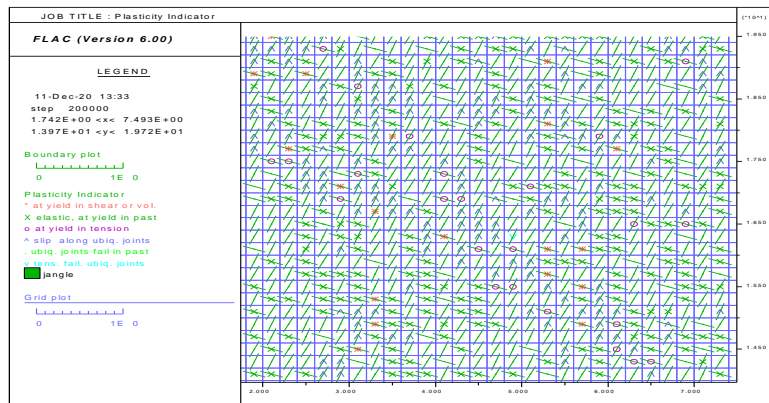


Εικόνα 161. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

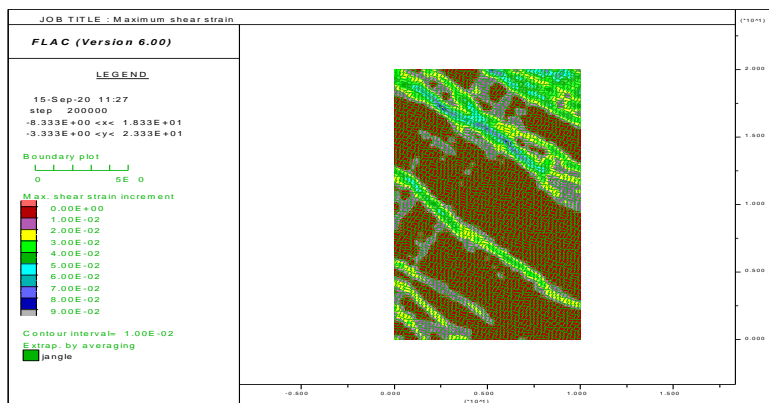


Εικόνα 162. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.3.8 Γωνία κλίσης 70°-160°-115°

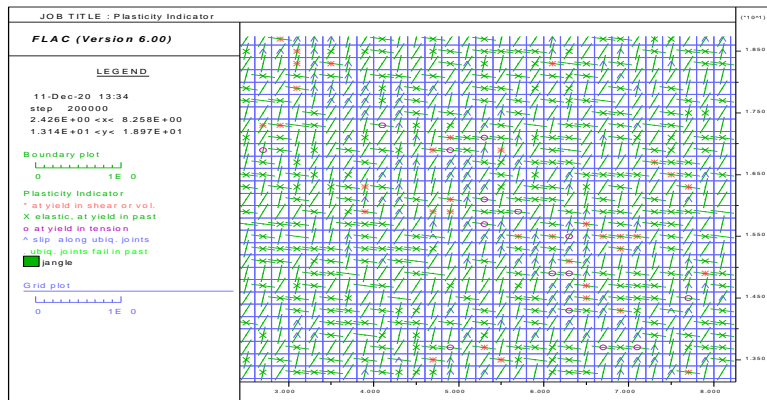


Εικόνα 163. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

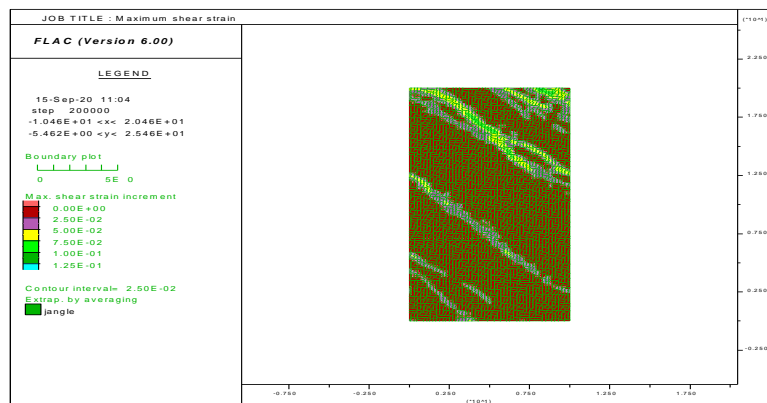


Εικόνα 164. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.3.9 Γωνία κλίσης 80°-170°-125°

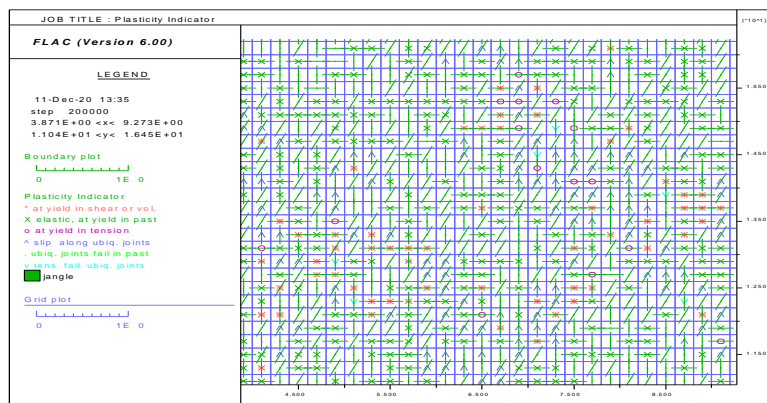


Εικόνα 165. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

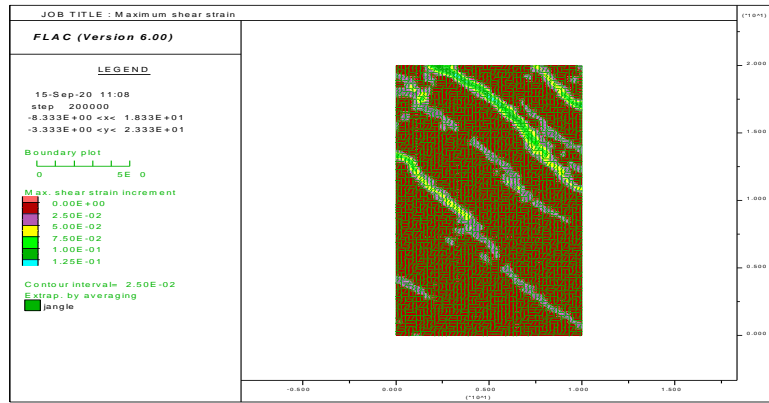


Εικόνα 166. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.6.3.10 Γωνία κλίσης 90°-180°-135°



Εικόνα 167. Πλαστικοποίηση των ζωνών του μοντέλου

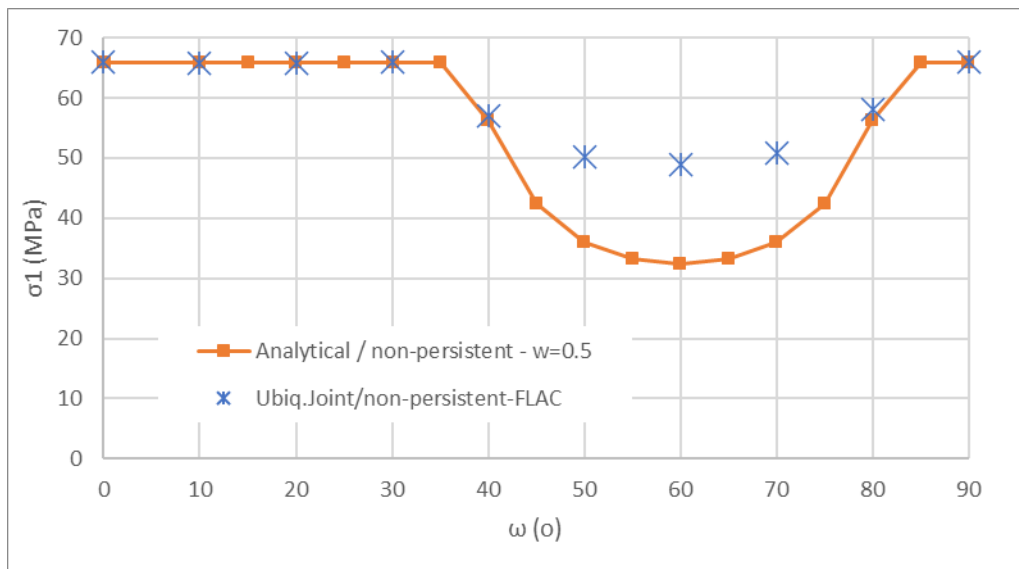


Εικόνα 168. Τρέχουσα αύξηση της διατμητικής τροπής

4.7 Συμπεράσματα αριθμητικών προσομοιώσεων

4.7.1 Προσομοίωση μη εμμενουσών ασυνεχειών (Non-persistent)

Στο διάγραμμα στην Εικόνα 169 δίνονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης μίας οικογένειας μη εμμενουσών ασυνεχειών με το μοντέλο Ubiquitous Joint στον κώδικα FLAC. Στο ίδιο διάγραμμα δίνονται για σύγκριση και τα αποτελέσματα της αναλυτικής επίλυσης που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.



Εικόνα 169. Αντοχή αριθμητικού δοκιμίου με μία οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική επίλυση με τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας για $w=0.5$

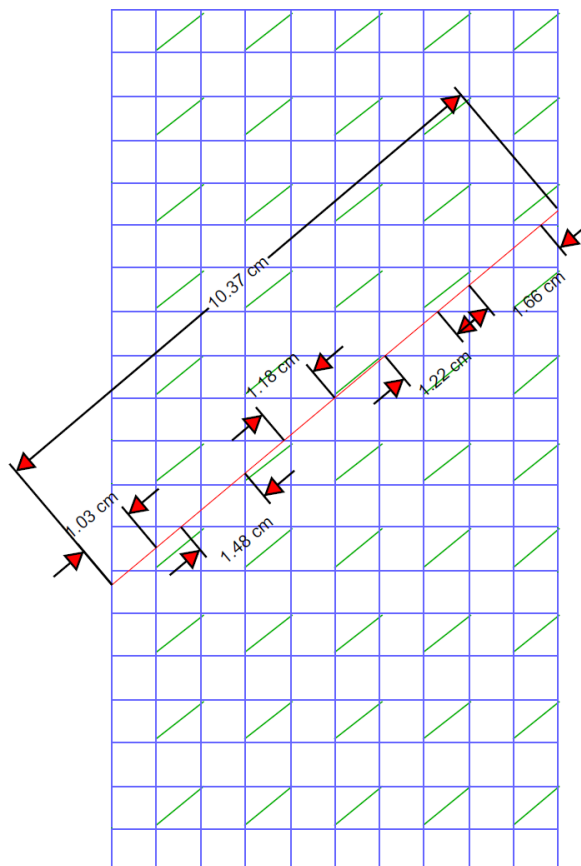
Παρατηρείται ότι η αναλυτική λύση υπολογίζει χαμηλότερες τιμές αντοχής από την αριθμητική επίλυση. Η διαφορά αυτή μπορεί τουλάχιστον μερικώς να αποδοθεί στις διαφορές του συντελεστή w , που θεωρείται για την εφαρμογή της αναλυτικής λύσης ($w=0.5$), και της γεωμετρικής σχέσης του μήκους που καταλαμβάνουν οι ζώνες ασυνεχειών με τις ζώνες που αντιπροσωπεύουν το άρρηκτο πέτρωμα στο μοντέλο του κώδικα FLAC.

Σαν παράδειγμα, παρουσιάζεται η μέτρηση του μήκους αυτού για το μοντέλο με γωνία κλίσης ασυνεχειών 40° . Το συνολικό μήκος του επιπέδου ολίσθησης είναι (στην κλίμακα του σχήματος)

ίσο με 10.37cm, ενώ το συνολικό μήκος των ζωνών που αντιπροσωπεύουν το άρρηκτο πέτρωμα είναι 6,57 cm και εκείνο των ασυνεχειών 3,8. Συνεπώς, ο συντελεστής w για το αριθμητικό μοντέλο γίνεται:

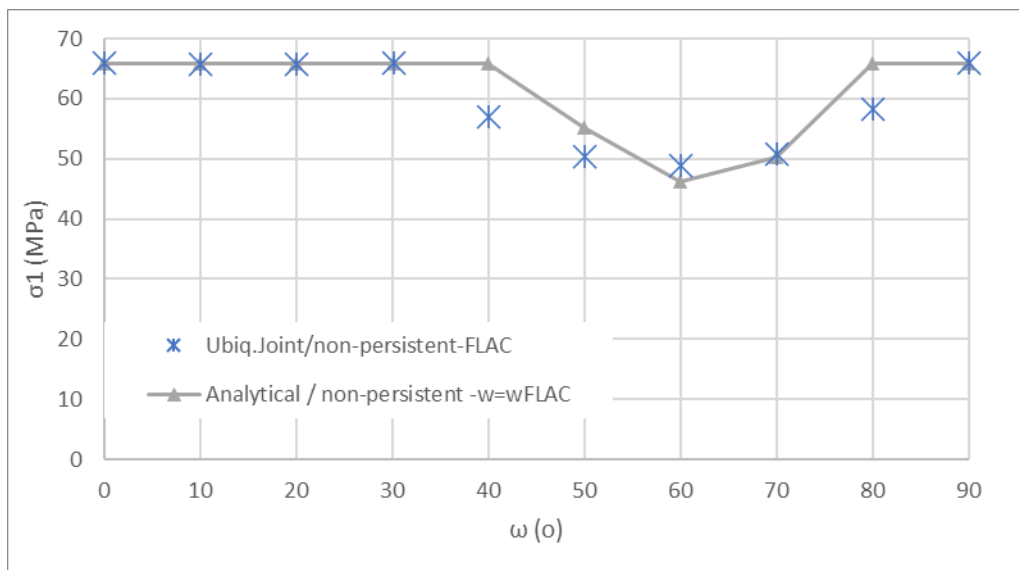
$$w_{FLAC,40}=3.8/10.37=0.37$$

Σημειώνεται επίσης ότι ο λόγος w μεταβάλλεται ακόμα και εντός του ίδιου αριθμητικού μοντέλου ανάλογα με τη θέση του επιπέδου ολίσθησης που εξετάζεται.



Εικόνα 170. Μέτρηση του λόγου w από τη γεωμετρία των ζωνών του αριθμητικού μοντέλου

Στο διάγραμμα στην Εικόνα 171 δίνεται η αναλυτική επίλυση με μεταβαλλόμενο συντελεστή w , που προέκυψε από τη μέτρησή του στον κώδικα FLAC όπως στο προηγούμενο παράδειγμα ($w = w_{FLAC}$). Παρατηρείται ότι η αριθμητική λύση αποκλίνει από την αναλυτική στα μοντέλα με μια οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών για γωνία κλίσης 40° και 50° . Η αντοχή από το FLAC είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε θεωρητικά. Εντούτοις, η αριθμητική και η αναλυτική λύση δίνουν κοντινά αποτελέσματα, τουλάχιστον στην περιοχή γωνιών κλίσης των ασυνεχειών για τις οποίες προκύπτει η χαμηλότερη αντοχή του αριθμητικού δοκιμίου.



Εικόνα 171. Αντοχή αριθμητικού δοκιμίου με μία οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική επίλυση με τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας για $w=w_{FLAC}$

Με βάση τα παραπάνω, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αριθμητική προσομοίωση μίας οικογένειας μη εμμενουσών ασυνεχειών με το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint συγκρίνεται ικανοποιητικά με την αναλυτική λύση.

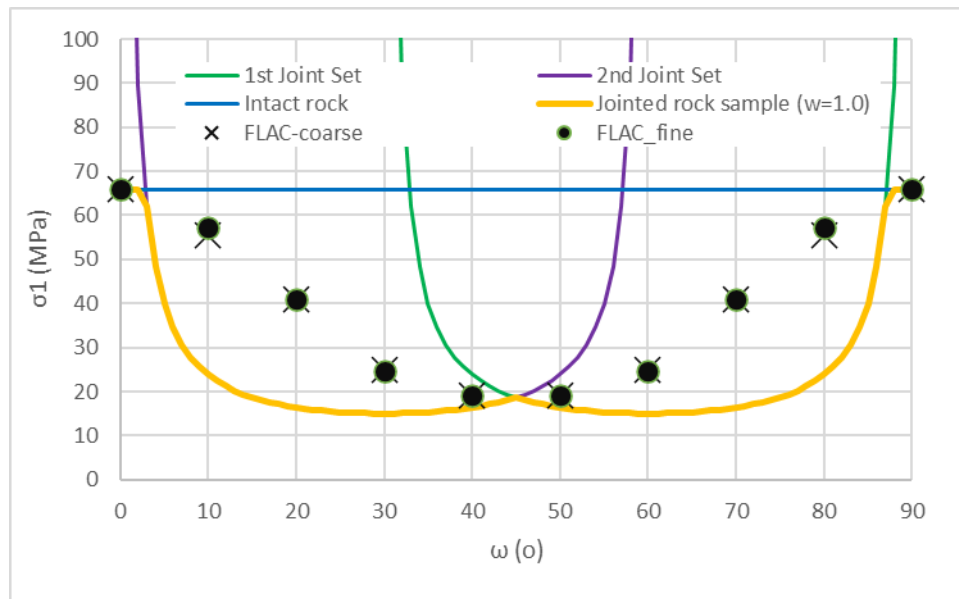
Σημειώνεται εδώ ότι, όπως παρουσιάζεται από τη Στόγια (2018), η αριθμητική λύση ταυτίζεται σχεδόν με την αναλυτική στην περίπτωση μιας οικογένειας ασυνεχειών μεγάλης εμμότητας.

4.7.2 Προσομοίωση δύο οικογενειών ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους

Από την αναλυτική επίλυση με τη θεωρία μεμονωμένων επιπέδων αδυναμίας στη παράγραφο 3.2, προέκυψε ανισότροπη συμπεριφορά για μία βραχομάζα με δύο οικογένειες ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους. Η αντοχή του ρωγματωμένου δοκιμίου μεταβάλλεται με τη μεταβολή της γωνίας κλίσης του πρώτου επιπέδου αδυναμίας.

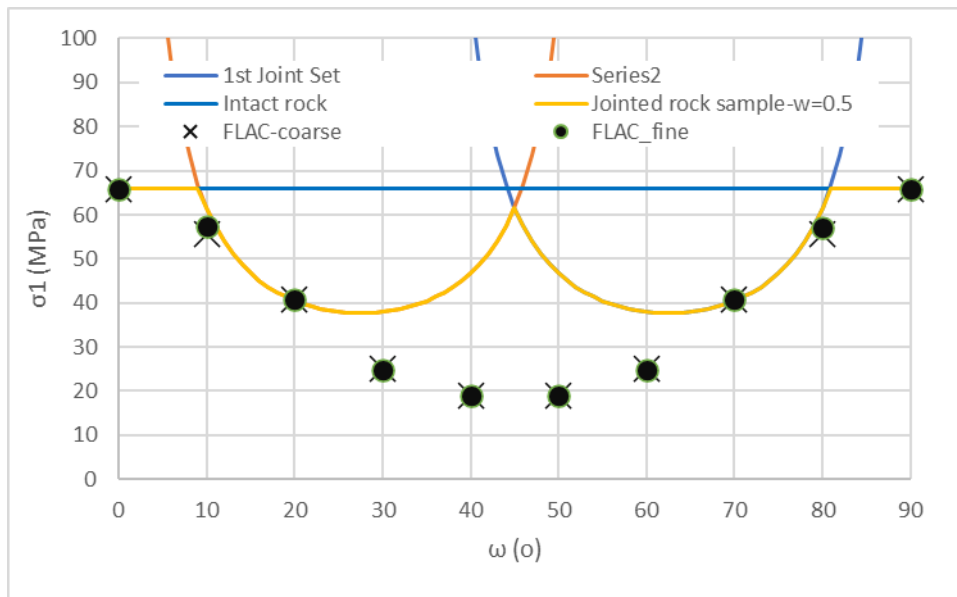
Στην **Εικόνα 172** δίνονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με τον κώδικα FLAC ενός δοκιμίου βραχομάζας με δύο οικογένειες ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους. Όπως παρατηρείται από αυτό η αντοχή του αριθμητικού δοκιμίου παρουσιάζει επίσης ανισότροπη συμπεριφορά. Επίσης, προκύπτει ότι δεν υπάρχει διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ των μοντέλων με αραιό και πυκνό κάναβο.

Στο ίδιο σχήμα δίνεται και η αντοχή του ρωγματωμένου δοκιμίου που προκύπτει από την αναλυτική λύση του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας για δύο κάθετες μεταξύ τους ασυνέχειες. Από τη σύγκριση της αναλυτικής λύσης με τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτει καλή συσχέτιση των τιμών αντοχής για περιοχές γωνιών κλίσης του 1^{ου} επιπέδου ασυνέχειας 30° έως 60° και ιδιαίτερα στην περιοχή γωνιών που το ρωγματωμένο δοκίμιο παρουσιάζει την ελάχιστη αντοχή. Για αυτές τις γωνίες κλίσεις, όπως προκύπτει από την εικόνα της διαρροής των μοντέλων που παρουσιάστηκαν προηγούμενα, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί κυρίως με ολίσθηση στα επίπεδα των ασυνεχειών, που συνάδει με τις προβλέψεις της αναλυτικής λύσης.



Εικόνα 172. Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων δύο κάθετων μεταξύ τους οικογενειών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική λύση για δύο κάθετες ασυνέχειες μεγάλης εμμονής ($w=1.0$)

Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκλίνουν για τιμές της γωνίας κλίσης εκτός των περιοχών που αναφέρθηκαν παραπάνω, και ειδικότερα για γωνίες κλίσης 10° , 20° , 70° , 80° . Όπως προκύπτει από την εικόνα της διαρροής των μοντέλων, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί με σημαντική συμμετοχή της διαρροής του άρρηκτου πετρώματος, καθώς τα πιθανά επίπεδα ολίσθησης κατά μήκος των ασυνεχειών διακόπτονται από την παρουσία ζωνών με διαφορετικής κλίσης ασυνέχειες. Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας δεν λαμβάνεται υπόψη από τη θεωρία του μεμονωμένου αδυναμίας, εκτός και εάν οι ασυνέχειες θεωρηθούν μη εμμένουσες και ληφθούν υπόψη οι γέφυρες άρρηκτου πετρώματος. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3 οι γέφυρες άρρηκτου πετρώματος μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω του συντελεστή w , που εκφράζει το λόγο του μήκους των ιχνών των ασυνεχειών προς το μήκος των γεφυρών άρρηκτου πετρώματος επάνω στο εξεταζόμενο επίπεδο ολίσθησης. Έτσι στην **Εικόνα 173** δίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με την αναλυτική λύση για μη εμμένουσες ασυνέχειες με συντελεστή $w=0.5$. Όπως παρατηρείται από αυτό, οι αριθμητικά υπολογιζόμενες τιμές της αντοχής συμπίπτουν με τις αναλυτικά υπολογιζόμενες.



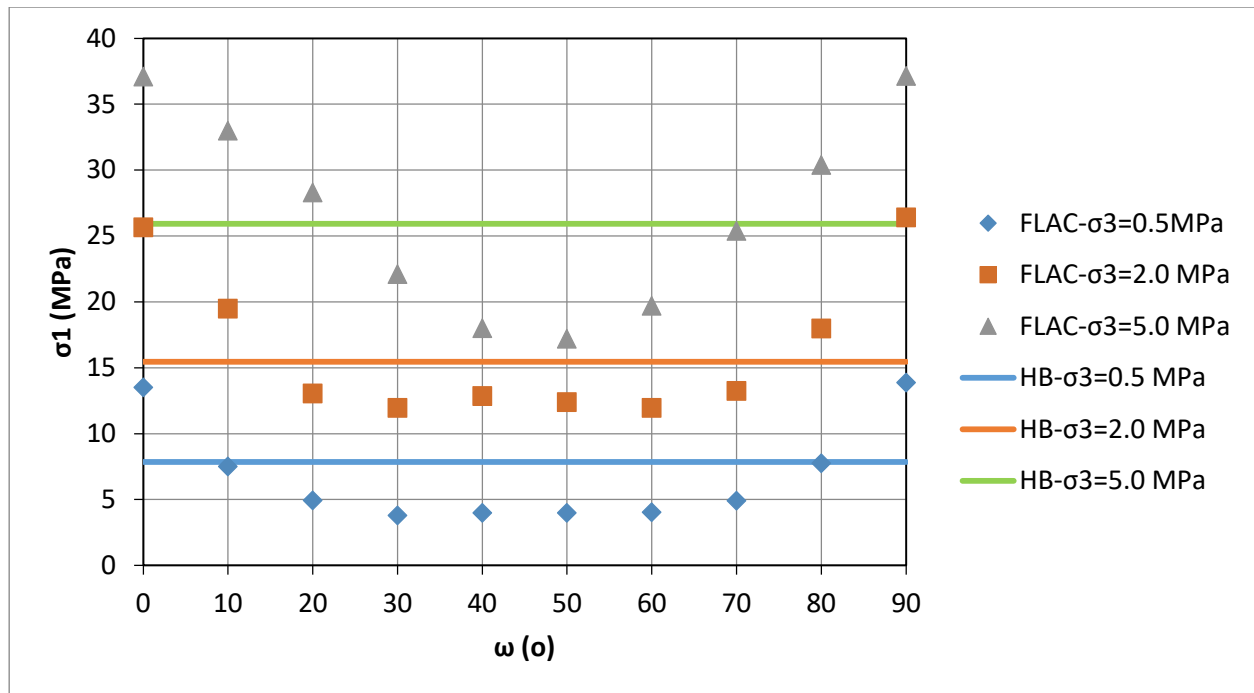
Εικόνα 173. Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων δύο κάθετων μεταξύ τους οικογενειών ασυνεχειών και σύγκριση με την αναλυτική λύση για δύο κάθετες μη εμμένουσες ασυνέχειες ($w=0.5$)

Συνάγεται συνεπώς το συμπέρασμα ότι η προσομοίωση με το μοντέλο ubiquitous joint έχει τη δυνατότητα να αναπαραστήσει ικανοποιητικά τη μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας με δύο κάθετες μεταξύ τους οικογένειες ασυνεχειών, καθώς και να αποδώσει την ανισοτροπία της βραχομάζας.

4.7.3 Προσομοίωση διακλασμένης βραχομάζας

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, η προσομοίωση της διακλασμένης βραχομάζας γίνεται με παρουσία τριών οικογενειών ασυνεχειών, που ανήκει στην κατηγορία δομής “BLOCKY” του διαγράμματος του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής GSI. Επιπλέον, θεωρείται ότι οι ασυνέχειες της βραχομάζας εμφανίζονται με κατάσταση επιφανειών “FAIR” του διαγράμματος GSI. Έτσι, στην αριθμητική προσομοίωση θεωρείται γωνία τριβής των ασυνεχειών ίση με 30° .

Στην Εικόνα 174 δίνεται η μεταβολή της αντοχής των δοκιμών διακλασμένης βραχομάζας κατηγορίας “BLOCKY” ως προς τη γωνία κλίσης της $1^{ης}$ οικογένειας ασυνεχειών, όπως προκύπτει από τις αριθμητικές προσομοιώσεις με τον κώδικα FLAC για τρεις τιμές της πλευρικής πίεσης σ_3 . Από αυτό προκύπτει ότι η βραχομάζα έχει ανισότροπη συμπεριφορά, με ελάχιστη τιμή αντοχής για γωνίες κλίσεις 40° - 50° . και μέγιστη τιμή για γωνίες 0° και 90° . Στο ίδιο διάγραμμα δίνεται η αντοχή που προκύπτει από την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown, για ισότροπη βραχομάζα δομής “BLOCKY” και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών “FAIR”, με εκτιμώμενη τιμή $GSI=55$. Παρατηρείται ότι η αντοχή που προκύπτει από το κριτήριο Hoek-Brown αποτελεί χονδρικά ένα μέσο όρο της αντοχής των αριθμητικών μοντέλων. Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι, η αριθμητική προσομοίωση δίνει τιμές αντοχής συμβατές με την αντοχή που προκύπτει από τις εμπειρικές εκτιμήσεις.



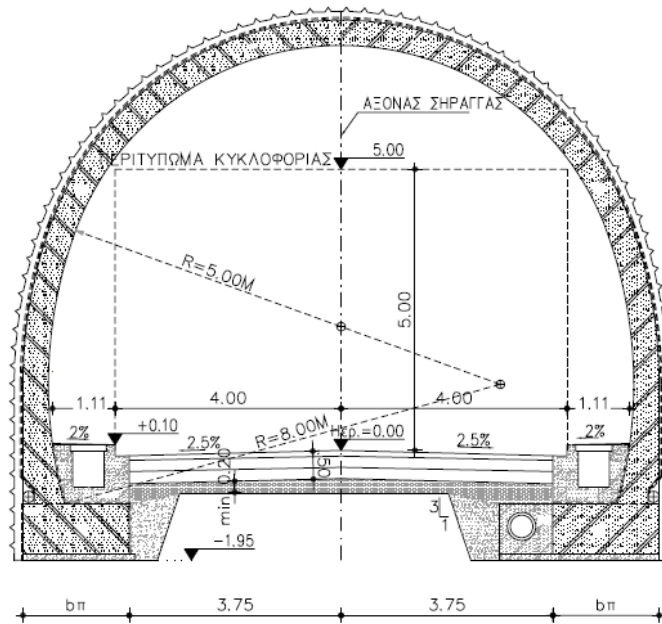
Εικόνα 174. Μεταβολή της αντοχής των δοκιμών διακλασμένης βραχομάζας κατηγορίας “BLOCKY” ως προς τη γωνία κλίσης της 1^{ης} οικογένειας ασυνεχειών

5 Μελέτη περίπτωσης: σήραγγα Αγίας Κυριακής στην Ε.Ο. Άρτας -Τρικάλων

5.1 Προετοιμασία αριθμητικών μοντέλων

5.1.1 Γενικά για τη σήραγγα

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση με χρήση του κώδικα FLAC και του καταστατικού μοντέλου Ubiquitous Joint σε μία πραγματική περίπτωση διάνοιξης σήραγγας και συγκεκριμένα στη σήραγγα Αγίας Κυριακής. Η σήραγγα της Αγίας Κυριακής διανοίχθηκε στο πλαίσιο βελτίωσης της Εθνικής Οδού Άρτας – Τρικάλων. Πρόκειται για σήραγγα διπλής κατεύθυνσης με συνολικό μήκος 1027 m. Η τυπική διατομή της σήραγγας δίνεται στην **Εικόνα 175**.



Εικόνα 175. Τυπική διατομή σήραγγας Αγίας Κυριακής

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής διέλευσης της σήραγγας αποτελείται από τους σχηματισμούς της ζώνης Γαβρόβου - Τρίπολης. Κατά μήκος της σήραγγας εμφανίζονται:

- Ασβεστόλιθοι Άνω Ιουρασικού, λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις, με ενδιαστρώσεις κερατολίθων και κυμαινόμενο βαθμό κερματισμού.
- Ιουρασικοί κερατόλιθοι, που αποτελούνται από εναλλαγές λεπτοστρωματωδών έως ενίοτε μεσοστρωματωδών πράσινων, ερυθρών και κυανών κερατολίθων που εμφανίζουν κυμαινόμενο βαθμό κερματισμού.

Βάσει των γεωλογικών στοιχείων και της γεωτεχνικής ταξινόμησης της βραχομάζας, η βραχομάζα της περιοχής διέλευσης της σήραγγας κατατάχθηκε σε 4 Σηραγγολογικές Κατηγορίες, που συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, λαμβάνοντας ως χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων τις χαμηλότερες του εκτιμώμενου εύρους τιμών της κάθε κατηγορίας (Ντουνιάς κ.α. 2006).

Πίνακας 4. Σηραγγολογικές κατηγορίες βραχομάζας (Ντουνιάς κ.α. 2006)

Σηραγγολογική κατηγορία	I	II	III	IV
Δομή βραχομάζας	BLOCKY/VERY BLOCKY	VERY BLOCKY-BLOCKY/DISTURBED	BLOCKY/DISTURBED	DESINTEGRATED
Κατάσταση ασυνεχειών	VERY GOOD έως GOOD	GOOD	FAIR	FAIR έως POOR
GSI	60-70	45-60	30-45	20-30
Χαρακτηριστικές τιμές για τους υπολογισμούς	$\sigma_c = 60$ MPa, GSI = 60, $m_i = 12$	$\sigma_c = 45$ MPa, GSI = 45, $m_i = 10$	$\sigma_c = 30$ MPa, GSI = 30, $m_i = 10$	$\sigma_c = 20$ MPa, GSI = 20, $m_i = 9$.

Για την άμεση υποστήριξη της σήραγγας προβλέφθηκαν τέσσερις κατηγορίες υποστήριξης με τα μέτρα που φαίνονται στον **Πίνακας 5**.

Πίνακας 5. Κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης (Ντουνιάς κ.α. 2006)

Κατηγορία υποστήριξης	Μέτρα υποστήριξης
I	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ινοπλισμένο / 40 kg/m ³) πάχους 7cm Αγκυρία μήκους 4.0 μ σε κάναβο 1.75m x 2.0m μόνο στο θόλο.
II	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ινοπλισμένο / 40 kg/m ³) πάχους 12cm Αγκυρία μήκους 5.0 μ σε κάναβο 1.25m x 1.75m.
III	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ινοπλισμένο / 40 kg/m ³) πάχους 17cm Αγκυρία μήκους 6.0 μ σε κάναβο 1.5m x 1.25m. Δικτυωτά πλαίσια ανά 1.5 m Spiling (ράβδοι Φ25, S500, ανά 0.5m, L=6m στην οροφή, εφόσον απαιτείται)
IV	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ινοπλισμένο / 40 kg/m ³) πάχους 22cm Πλαίσια ολόσωμης διατομής IPB-160 ανά 1m Αυτοδιατρύμενα αγκύρια, L= 6 m σε κάθε πόδι πλαισίου. Forepoling, Φ114 / 0.40m σε γωνία 130° στην οροφή 5cm εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μέτωπο Επιπλέον μέτρα σταθεροποίησης (τσιμεντενέσεις) εφόσον απαιτηθεί

5.1.2 Αριθμητική προσομοίωση

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση για τη σήραγγολογική κατηγορία 1, με κατηγορία υποστήριξης I, σε βάθος 200 m. Στο βάθος αυτό η κατακόρυφη τάση υπολογίζεται ως:

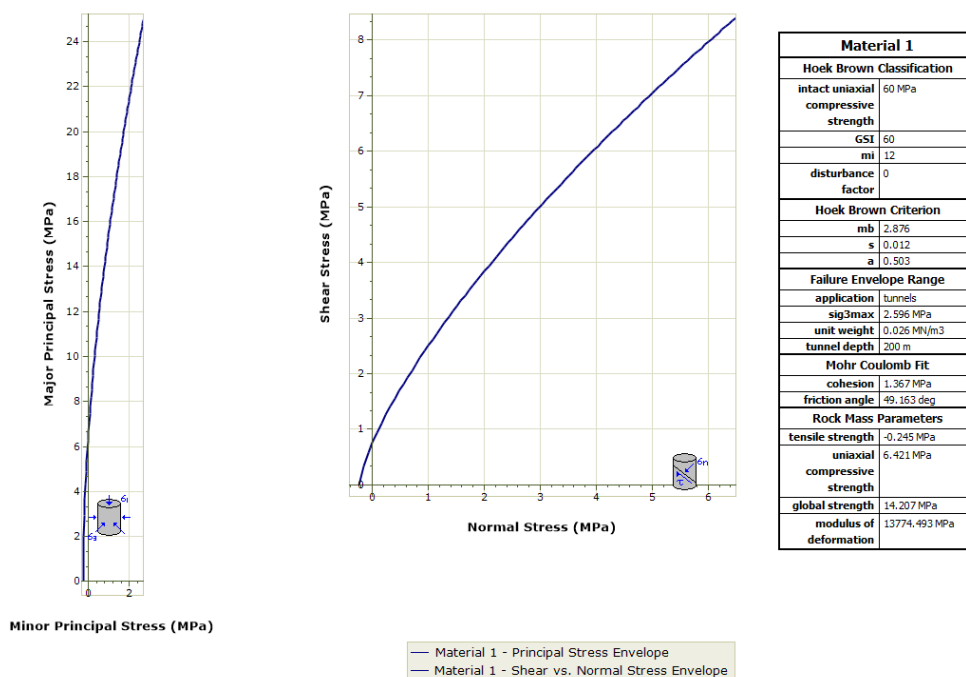
$$p_0 = \gamma \cdot z = 0,026 \cdot 200 = 5,2 \text{ MPa},$$

ενώ ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων ελήφθηκε ίσος με $K=0.7$.

5.1.2.1 Προσομοίωση με θεώρηση της βραχομάζας ως ισοδύναμο συνεχές μέσο

Προσομοιώνεται η βραχομάζα ως ισοδύναμο συνεχές μέσο, χρησιμοποιώντας το καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb με ισοδύναμες παραμέτρους αντοχής σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Hoek, Carranza-Torres, Corkum (2002).

Για $\sigma_c=60 \text{ MPa}$, $GSI=60$, $m_i=12$, βάθος σήραγγας 200m, οι ισοδύναμες παραμέτρους του κριτηρίου Mohr-Coulomb λαμβάνονται από το πρόγραμμα RocData.



Εικόνα 176. Ισοδύναμες παραμέτροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb από το πρόγραμμα RocData

5.1.2.1.1 Ιδιότητες στο FLAC

prop density=2600.0 bulk=9.18267E9 shear=5.5096E9 cohesion=1367000.0 & friction=49.163 dilation=0.0 tension=0.0

5.1.2.1.2 Μεθοδολογία προσομοίωσης

Στάδιο 1: αρχική εντατική κατάσταση (πριν από την εκσκαφή) για βάθος 200m

Στάδιο 2: αποτόνωση άνω ημιδιατομής 60% ($\lambda=0.75$) $\rightarrow \rho_i/\rho_0=0.25$

Στην αρχή της φάσης αποτόνωσης δεσμεύονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις των κόμβων του μοντέλου στο όριο της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής και επιλύεται το μοντέλο για έναν υπολογιστικό κύκλο (cycle=1). Μετρούνται οι δυνάμεις στους κόμβους και σταδιακά μειώνονται στο 25% των αρχικών.

Στάδιο 3: εκσκαφή και υποστήριξη άνω ημιδιατομής

Τοποθετούνται στοιχεία δοκού στο όριο της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής για την προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πάχος 7 cm

Μέτρο ελαστικότητας 15 GPa

Λόγος Poisson 0.25

Τοποθετούνται στοιχεία αγκυρίων (cable elements) για την προσομοίωση των αγκυρίων πλήρους πάκτωσης, με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Διάμετρος $\Phi 25\text{mm}$, μέτρο ελαστικότητας χάλυβα 200 GPa, φέρουσα ικανότητα 200 kN.

Η ρ_i μηδενίζεται.

Στάδιο 4: αποτόνωση βαθμίδας 50% ($\lambda=0.75$) $\rightarrow \rho_i/\rho_0=0.25$

Στην αρχή της φάσης αποτόνωσης δεσμεύονται οι κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις των κόμβων του μοντέλου στο όριο της εκσκαφής της βαθμίδας και επιλύεται το μοντέλο για έναν υπολογιστικό κύκλο (cycle=1). Μετρούνται οι δυνάμεις στους κόμβους και σταδιακά μειώνονται στο 25% των αρχικών. Το ποσοστό αποτόνωσης είναι ίδιο με αυτό της άνω ημιδιατομής.

Στάδιο 5: εκσκαφή και υποστήριξη βαθμίδας

Τοποθετούνται στοιχεία δοκού στο όριο της εκσκαφής της βαθμίδας για την προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πάχος 7 cm

Μέτρο ελαστικότητας 15 GPa

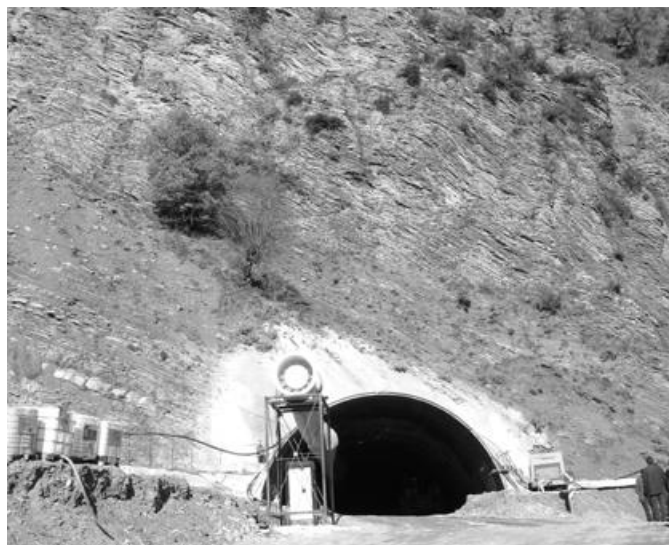
Λόγος Poisson 0.25

5.1.2.2 Προσομοίωση με θεώρηση ανισότροπης βραχομάζας- UJ model

Οι Ιουρασικοί κερατόλιθοι, που εμφανίζονται κατά μήκος της σήραγγας πλησίον του μετώπου της Αγίας Κυριακής, αποτελούνται από εναλλαγές λεπτοστρωματωδών έως ενίοτε μεσοστρωματωδών πράσινων, ερυθρών και κυανών κερατολίθων με κυμαινόμενο βαθμό κερματισμού (Ντουνιάς κ.ά 2006). Σύμφωνα με την κατάταξη της βραχομάζας της περιοχής διέλευσης της σήραγγας, η Σηραγγολογική Κατηγορία I περιελάμβανε μεσοστρωματώδεις πράσινους κερατολίθους ή ασβεστόλιθους υγιείς, έως ελαφρά κερματισμένους. Η βραχομάζα είναι συμπαγής, οι ασυνέχειες τραχείες και κλειστές, χωρίς παρουσία υλικών πλήρωσης ή με επιφάνειες συγκολλημένες με ασβεστιτικό υλικό. Η σηραγγολογική κατηγορία I έχει τιμή GSI=60, $\sigma_c = 60$ MPa, $m_i = 12$.

Στην περίπτωση που εξετάζεται, η βραχομάζα κατατάσσεται από πλευράς δομής από ‘‘BLOCKY’’ έως ‘‘VERY BLOCKY’’ με κατάσταση ασυνεχειών κατά GSI ‘‘VERY GOOD’’ έως ‘‘GOOD’’. Για την απλοποίηση του προβλήματος, θεωρείται ότι η βραχομάζα διατέμενεται από τρεις οικογένειες ασυνεχειών (κατηγορία ‘‘BLOCKY’’ κατά GSI), με κατάσταση ασυνεχειών κατά GSI ‘‘GOOD’’.

Κατά την κατασκευή της σήραγγας, λόγω του συνδυασμού της κλίσης των στρώσεων, της λεπτοπλακώδους της δομής και του κερματισμού, παρατηρήθηκαν συχνές μικρές υπερεκσκαφές στο άνω Ανατολικό τμήμα του μετώπου (Ντουνιάς κ.ά 2006). Από τη φωτογραφία του στομίου Αγίας Κυριακής, είναι εμφανής η κλίση των στρώσεων των κερατολίθων, που εκτιμάται από την ίδια φωτογραφία ως περίπου 35° στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας.



Εικόνα 177. Φωτογραφία στομίου Αγίας Κυριακής

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης των στρώσεων σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις κατά την κατασκευή, η παρουσία των στρώσεων προσομοιώνεται στο αριθμητικό μοντέλο διαχωρίζοντας τη συγκεκριμένη οικογένεια ασυνεχειών από τη βραχομάζα και χρησιμοποιώντας το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint. Για την υλοποίηση της προσομοίωσης, το συνεχές μέσο μεταξύ των ασυνεχειών θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την απομένουσα βραχομάζα πλην των ασυνεχειών στρώσης οι οποίες αναπαρίστανται ξεχωριστά.

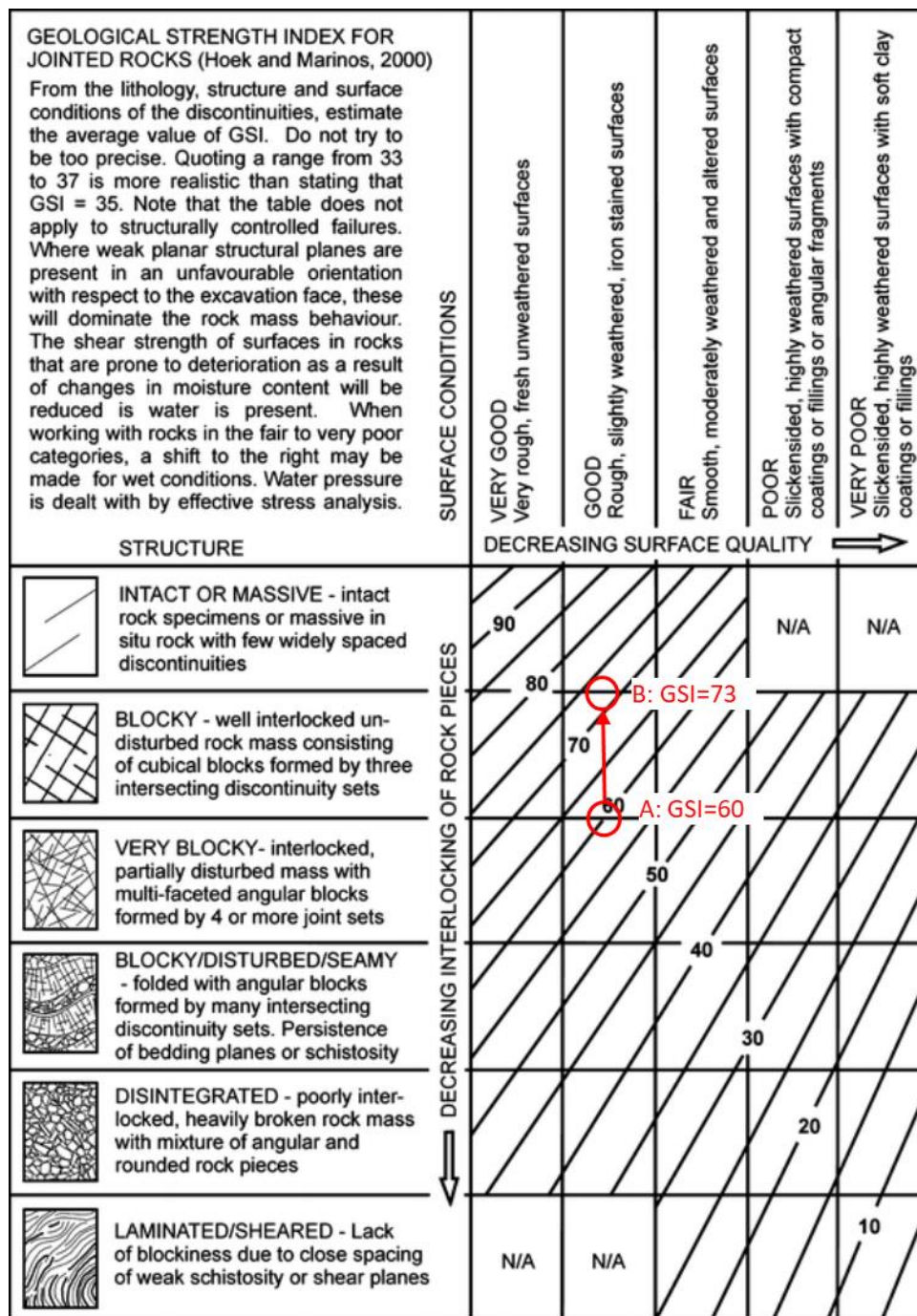
Από άποψη ταξινόμησης της βραχομάζας, διακρίνονται δύο ακραίες τιμές του GSI:

- GSI = 60, για τη βραχομάζα με παρουσία όλων των οικογενειών ασυνεχειών
- GSI = 100, όταν όλες οι ασυνέχειες της βραχομάζας αναπαρίσταται διακριτά στο αριθμητικό μοντέλο.

Για τους σκοπούς της προσομοίωσης στον κώδικα FLAC ακολουθείται η εξής κατηγοριοποίηση:

Πίνακας 6. Ταξινόμηση βραχομάζας στη σήραγγα προσομοίωσης

Περίπτωση	Οικογένειες ασυνεχειών που προσομοιώνονται διακριτά στον κώδικα	Οικογένειες ασυνεχειών απομένουσας βραχομάζας	GSI απομένουσας βραχομάζας	Δομή/κατάσταση ασυνεχειών
A	0	3	60	“Blocky” / “Good”.
B	1 (οικογένεια ασυνεχειών στρώσης)	2	73	“Intact or Massive” – “Blocky” / “Good”.



Εικόνα 178. Τιμή GSI που επιλέχθηκε για την προσομοίωση

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι παράμετροι αντοχής της απομένουσας βραχομάζας.

Πίνακας 7. Παράμετροι αντοχής απομένουσας βραχομάζας

Μοναδιαίο βάρος, γ	26 kN/m ³
Δείκτης GSI	73
Αντοχή άρρηκτου πετρώματος, σ_{ci}	60 MPa
Παράμετρος αντοχής m_i	12
<i>Ισοδύναμες παράμετροι κριτηρίου M-C για βάθος z=200m</i>	
Συνοχή βραχομάζας, c	2.214 MPa
Γωνία τριβή, ϕ	51.70°

Για το μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας, διατηρείται η τιμή $E_{rm}=13.774\text{GPa}$, θεωρώντας ότι στο μοντέλο UJ οι ασυνέχειες δεν συνεισφέρουν στην ελαστική παραμόρφωση της βραχομάζας. Για τη διατμητική αντοχή των ασυνεχειών, αυτή θεωρείται ότι οφείλεται αποκλειστικά στη στιγμιαία γωνία τριβής φ_a , συμπεριλαμβανομένης και της τραχύτητας της ασυνέχειας. Για την εκτίμηση της γωνίας τριβής συσχετίζεται η περιγραφή της κατάστασης “Good” των ασυνεχειών κατά GSI με το λόγο J_r/J_a της ταξινόμησης Q του Barton (2002). Για τραχείες ασυνέχειες εκτιμάται μία τιμή συντελεστή τραχύτητας $J_r=1.5$, ενώ για μη εξαλλοιωμένες ασυνέχειες τιμή του συντελεστή $J_a=1.0$, δίνοντας λόγο $J_r/J_a=1.5$.

Η γωνία τριβής υπολογίζεται ως:

$$\varphi_a = \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1.5}{1.0} \right) = 56.3^\circ \quad \text{Εξίσωση 36}$$

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στη στιγμιαία γωνία τριβής περιλαμβάνεται και η τραχύτητα της ασυνέχειας. Δεδομένου ότι η σήραγγα προσομοιώνεται για βάθος 200 m εκτιμάται ότι η συνεισφορά της τραχύτητας θα είναι σχετικά μειωμένη λόγω της ορθής τάσης στο επίπεδο των ασυνεχειών. Συνεπώς, η τιμή της γωνία τριβής που λαμβάνεται στους υπολογισμούς είναι $\varphi_j=45^\circ$.

5.1.2.3 Προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας Blocky του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI

Σε αυτή τη σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων γίνεται προσπάθεια να προσομοιωθούν όλες οι οικογένειες ασυνεχειών της βραχομάζας με το μοντέλο ubiquitous joint. Η βραχομάζα θεωρείται ότι έχει τρεις οικογένειες ασυνεχειών, σε αντιστοιχία με τη δομή “BLOCKY” του διαγράμματος του GSI ενώ η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών θεωρείται ότι ανήκει στη κατηγορία “GOOD”.

Σε όλες τις ζώνες πεπερασμένων διαφορών του μοντέλου ανατίθεται το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint, ενώ σε κάθε ζώνη αποδίδεται διαφορετική τιμή της γωνίας κλίσης της ασυνέχειας με τη βοήθεια αλγορίθμου που προγραμματίστηκε στη γλώσσα προγραμματισμού FISH του κώδικα FLAC.

Έτσι, κάθε ζώνη συνιστά ένα ρωγματομένο υλικό με ασυνέχεια εντός άρρηκτου πετρώματος. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της «απομένουσας βραχομάζας» εντός της ζώνης θα είναι εκείνα του άρρηκτου πετρώματος, πλην του μέτρου ελαστικότητας που παραμένει ως $E_{rm}=13.774\text{ GPa}$, καθώς η παρουσία των ubiquitous joints δεν συνεισφέρει στην ελαστική παραμόρφωση της ζώνης. Συνεπώς, οι μηχανικές παράμετροι του αριθμητικού μοντέλου θα είναι:

- Για την απομένουσα βραχομάζα οι ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος: $GSI=100$, $\sigma_c=60\text{ MPa}$, $m_i=12$. Από τις παραμέτρους αντοχής του κριτηρίου Hoek-Brown υπολογίζονται οι ισοδύναμες παράμετροι αντοχής του κριτηρίου Mohr-Coulomb για βάθος 200m από το λογισμικό RocData ως: συνοχή $c=9.912\text{ MPa}$, γωνία τριβής $\varphi=55.5^\circ$
- Για τις ασυνέχειες: Συνοχή 0 MPa , γωνία τριβής 45° (όπως προηγουμένως), εφελκυστική αντοχή 0 MPa ,

Η εντολή ανάθεσης του καταστατικού μοντέλου για την προσομοίωση στον κώδικα FLAC διαμορφώνεται ως:

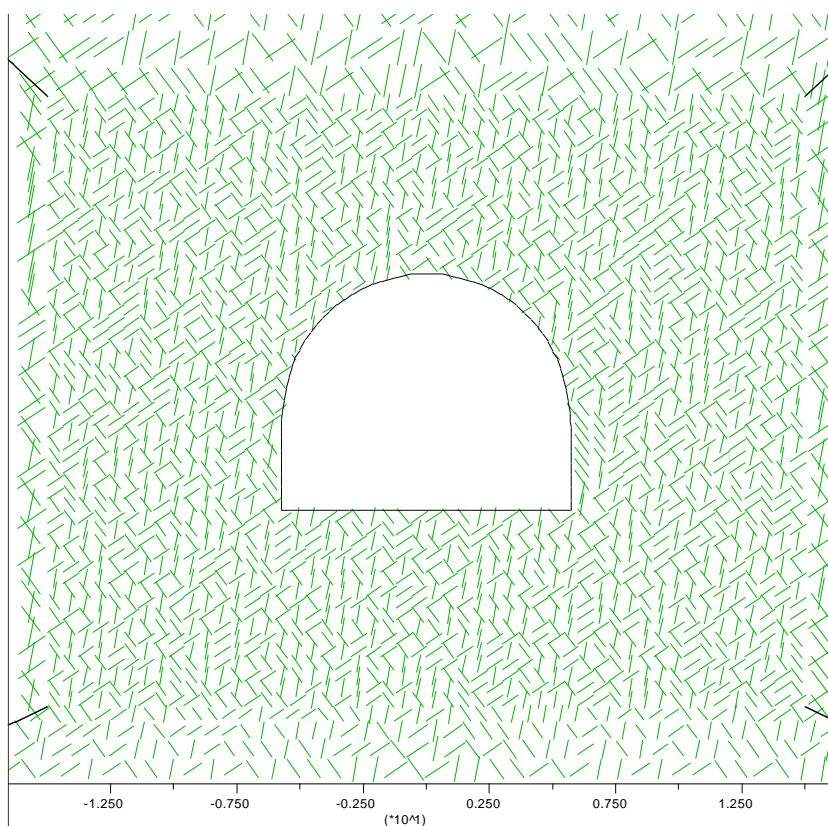
```
prop density=2600.0 bulk=9.18267E9 shear=5.5096E9 cohesion=9.912e6 friction=55.5  
dilation=0.0 tension=0 jangle=a jcohesion=0.0 jfriction=45.0 jdilation=0.0 jtension=0.0
```

α είναι η γωνία κλίσης της ασυνέχειας σε κάθε ζώνη του μοντέλου, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ασυνεχειών του εκάστοτε μοντέλου.

Πίνακας 8. Συνδυασμοί κλίσεων ασυνεχειών που μελετήθηκαν

Συμβολισμός	Γωνία κλίσης (°)		
	Οικογένεια ασυνεχειών 1	Οικογένεια ασυνεχειών 2	Οικογένεια ασυνεχειών 3
0°-Blocky	0	90	45
20°-Blocky	20	110	62
35°-Blocky	35	125	80
50°-Blocky	50	140	95
70°-Blocky	70	160	115
90°-Blocky	90	180	135

Στην **Εικόνα 179** δίνεται η γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου Blocky-35-125-80, όπου φαίνεται η κατανομή των ασυνεχειών με τις διάφορες γωνίες κλίσης γύρω από την σήραγγα. Παρατηρείται ότι, παρόλο που υπάρχει τυχαιότητα (λόγω του αλγορίθμου) στις κλίσεις των ασυνεχειών, εν τούτοις εμφανίζονται και περιπτώσεις όπου οι γειτονικές ζώνες πεπερασμένων διαφορών περιέχουν ασυνέχειες με την ίδια κλίση, σχηματίζοντας έτσι ψευδοσυνεχή επίπεδα.



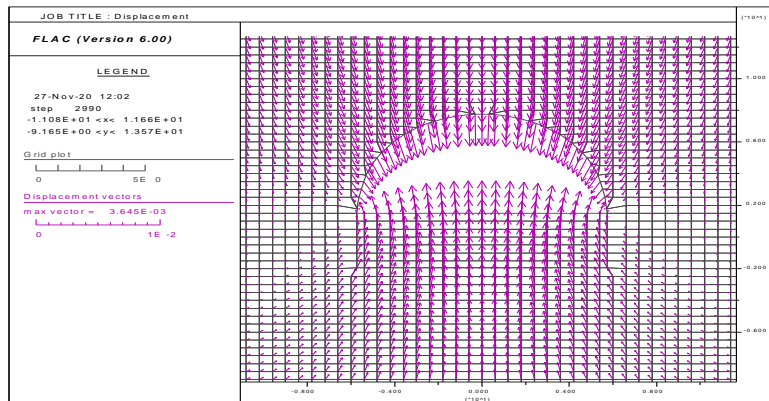
Εικόνα 179. Γεωμετρία του αριθμητικού μοντέλου Blocky-35°-125°-80°

5.2 Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων

Παρουσιάζονται τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχομάζας, οι αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα εκτοξευόμενο, η διαρροή της βραχομάζας και οι μετατοπίσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της προσωρινής υποστήριξης στην 3^η και στην 5^η φάση της προσομοίωσης.

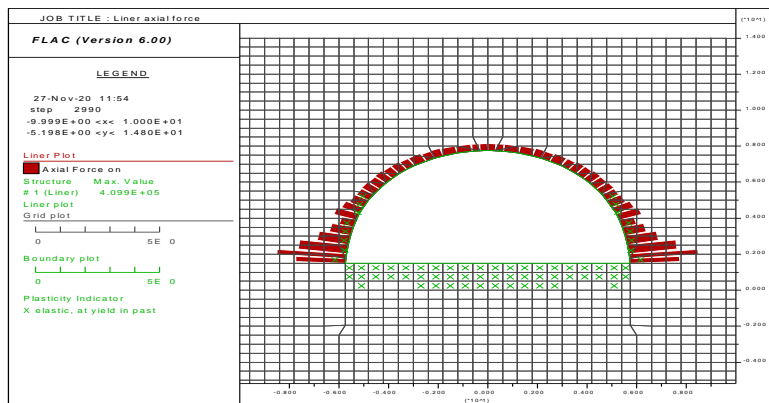
5.2.1 Προσομοίωση με θεώρηση της βραχομάζας ως ισοδύναμο συνεχές μέσο

5.2.1.1.1 3η φάση προσομοίωσης



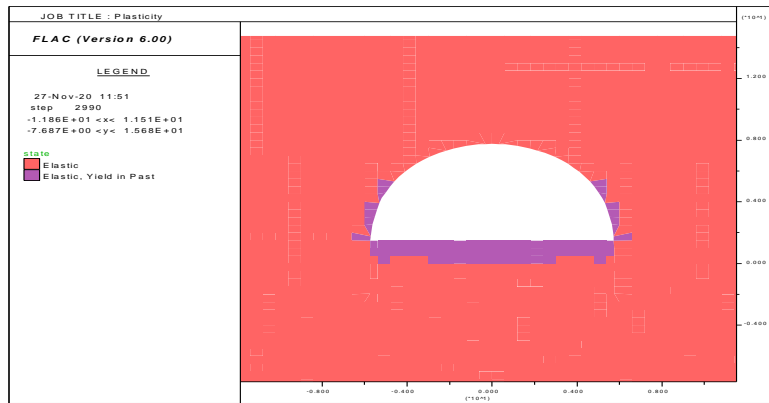
Εικόνα 180. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Παρατηρούνται περιορισμένες μετατοπίσεις στο όριο εκσκαφής της τάξης των 3 mm. Τα διανύσματα της μετατόπισης δείχνουν ένα συμμετρική παραμόρφωση της βραχομάζας.



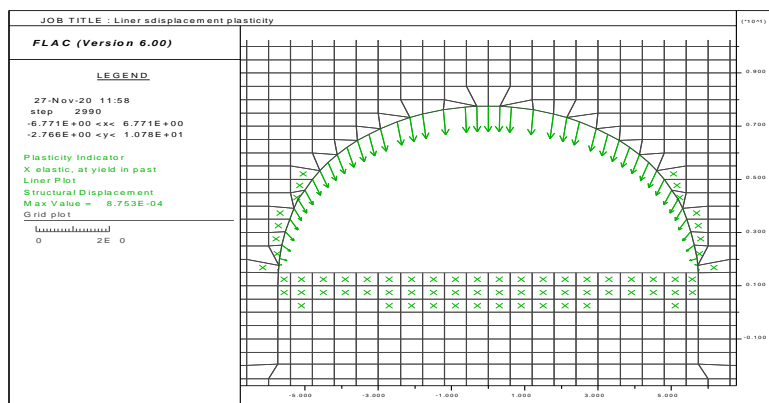
Εικόνα 181. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Οι υψηλότερες αξονικές δυνάμεις ασκούνται στο σκυρόδεμα στο κάτω μέρος της άνω ημιδιατομής στην επαφή της με τη βαθμίδα καθώς στο σημείο αυτό διαρρέει η βραχομάζα. Το σκυρόδεμα πρέπει να ισοσταθμίσει τη δύναμη που δέχεται στη γωνία από τη διαρροή της βραχομάζας.



Εικόνα 182. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

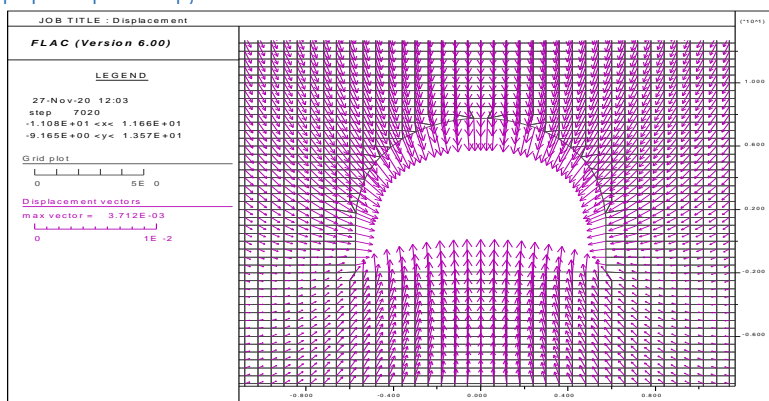
Αναπτύσσεται πλαστική ζώνη στις πλευρές της ημιδιατομής και στη βαθμίδα η οποία όμως θα εκσκαφθεί σε επόμενο στάδιο.



Εικόνα 183. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

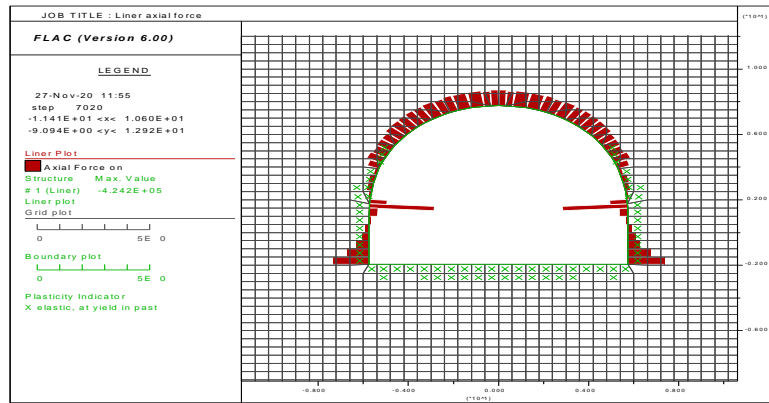
Οι μετατοπίσεις στο σκυρόδεμα αυξάνονται σταδιακά από την επαφή βαθμίδας και ημιδιατομής στη στέψη, όπου διαπιστώνεται η μεγαλύτερη τιμή μετατόπισης.

5.2.1.1.2 5η φάση προσομοίωσης



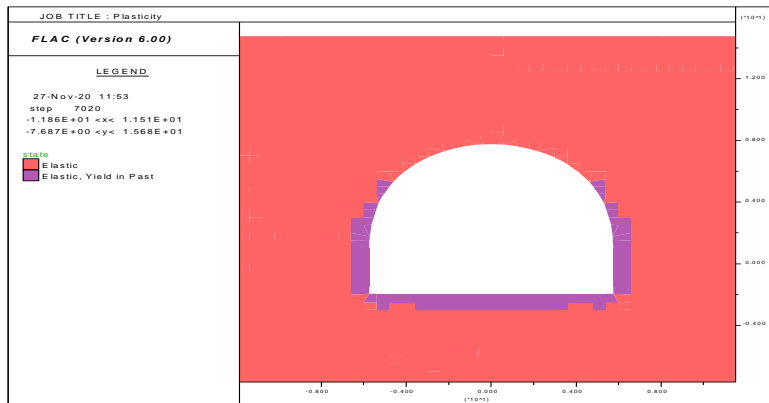
Εικόνα 184. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα μετατόπισης δυκνούν συμμετρική παραμόρφωσης της βραχόμαζας στο όριο εκσκαφής. Μέγιστη τιμή μετατόπισης 3.7 mm



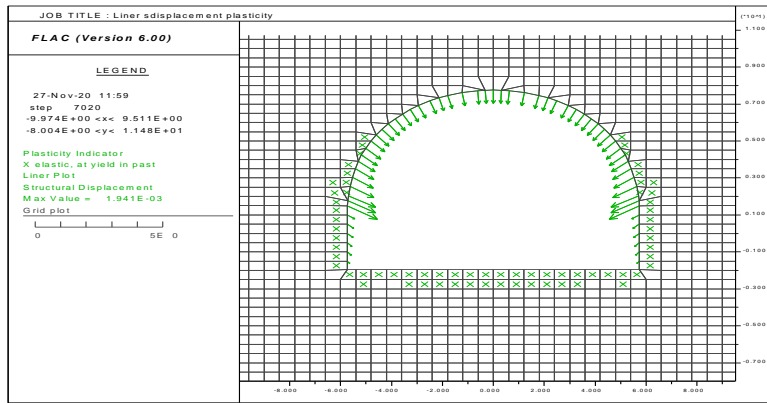
Εικόνα 185. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Η αξονική τάση στο θόλο της άνω ημιδιατομής είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένη. Με την εκσκαφή της βαθμίδας διαρρέουν περισσότερες ζώνες απ' ότι μετά την εκσκαφή της ημιδιατομής. Λόγω αυτής της διαρροής ασκείται υψηλή τάση στο σκυροδέμα της βαθμίδας. Στην περιοχή της συναρμογής άνω ημιδιατομής και βαθμίδας εμφανίζονται εφελκυστικές τιμές της αξονικής δύναμης στο σκυρόδεμα (αρνητικό πρόσημο). Η παρουσία εφελκυστικών αξονικών δυνάμεων οφείνεται σε αδυναμία της προσομοίωσης, καθώς λόγω του τρόπου προσομοίωσης της αποτόνωσης της βαθμίδας, τα γραμμικά στοιχεία που προσομοιώνουν την επένδυση του σκυροδέματος μένουν τρόπο τινά επικρεμμάμενα. Στην πράξη δεν αναμένεται να εμφανιστούν τέτοιες εφελκυστικές δυνάμεις. Εάν εμφανιστούν μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση σπλισμού ή την τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων για να αναλάβουν τον εφελκυσμό.



Εικόνα 186. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Το μήκος της πλαστικής ζώνης στην παρειά της βαθμίδας είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το αντίστοιχο μετά την εκσκαφή της ημιδιατομής.



Εικόνα 187. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στην επαφή βαθμίδας και ημιδιατομής. Οι μετατοπίσεις στο σκυρόδεμα της βαθμίδας είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με αυτές της άνω ημιδιατομής, καθώς η βαθμίδα έχει χαλαρώσει από την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής και δεν ασκεί μεγάλη πίεση στην υποστήριξη.

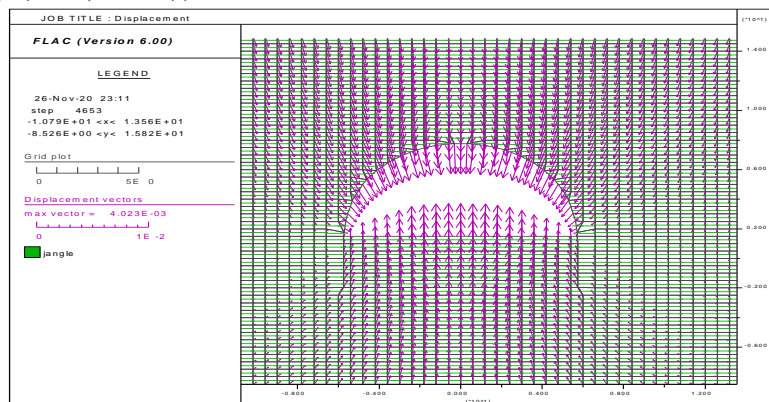
Πίνακας 9. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μήκος πλαστικής ζώνης στο θόλο (m)		Θλιπτική αξονική τάση στο σκυρόδεμα (MN)		Μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα (mm)	
A Φάση	B Φάση	A Φάση	B Φάση	A Φάση	B Φάση
0.72	0.94	0.4099	0.237	0.88	1.941

5.2.2 Προσομοίωση με θεώρηση ανισότροπης βραχόμαζας- UJ model

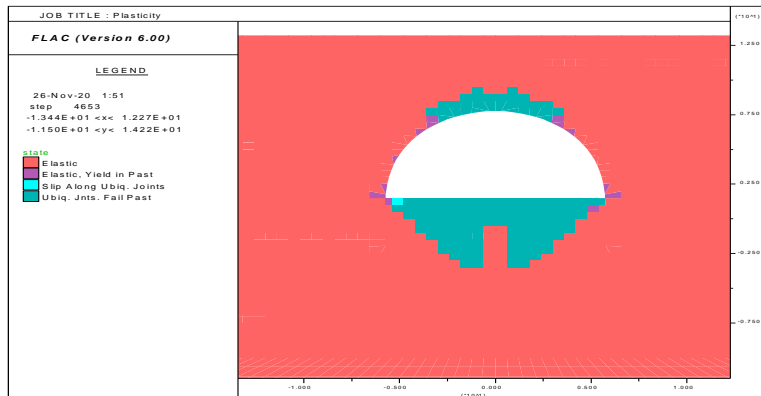
5.2.2.1 Γωνία κλίσης 0°

5.2.2.1.1 3^η φάση προσομοίωσης



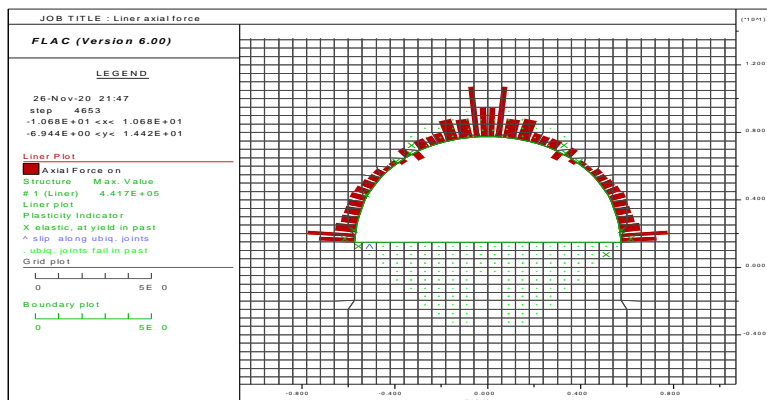
Εικόνα 188. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Η μέγιστη μετατόπιση στο θόλο της άνω ημιδιατομής εμφανίζεται στη στέψη. Οι μετακινήσεις της βραχομάζας στο όριο εκσκαφής της ημιδιατομής είναι συμμετρικές και συγκλίνουν στο κέντρο διατομής της.



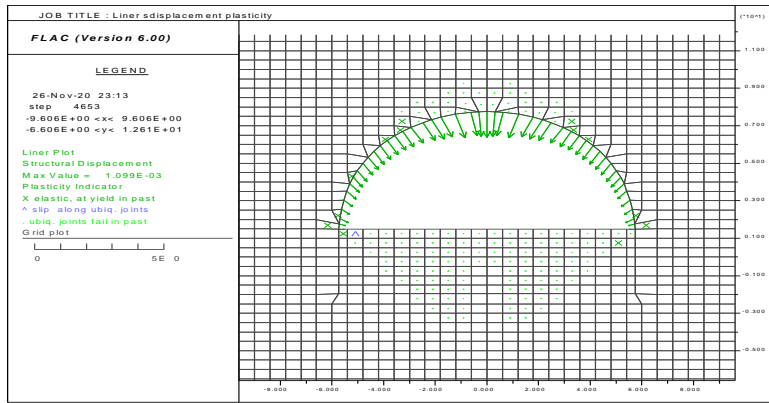
Εικόνα 189. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Στη στέψη της ημιδιατομής οι ζώνες με ασυνέχειες 0° ολισθαίνουν και σχηματίζεται ζώνη ολίσθησης. Η μεγαλύτερη περιοχή ολίσθησης εμφανίζεται στην βαθμίδα, η οποία όμως θα εκσκαφθεί στη συνέχεια.



Εικόνα 190. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

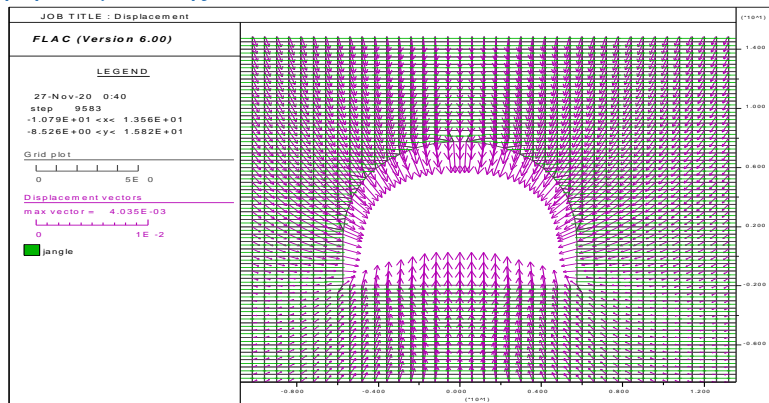
Τη μεγαλύτερη αξονική δύναμη δέχεται το σκυρόδεμα στη στέψη, λόγω ύπαρξης ζωνών με ασυνέχειες που ολισθαίνουν. Μετά την εκσκαφή της ημιδιατομής ολισθαίνουν οι ασυνέχειες κλίσης 0° και στην βαθμίδα που θα αποκοπεί στη συνέχεια με τη δεύτερη εκσκαφή. Επίσης διαρρέουν μερικές ζώνες της απομένουσας βραχομάζας στο θόλο.



Εικόνα 191. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυροδέμα

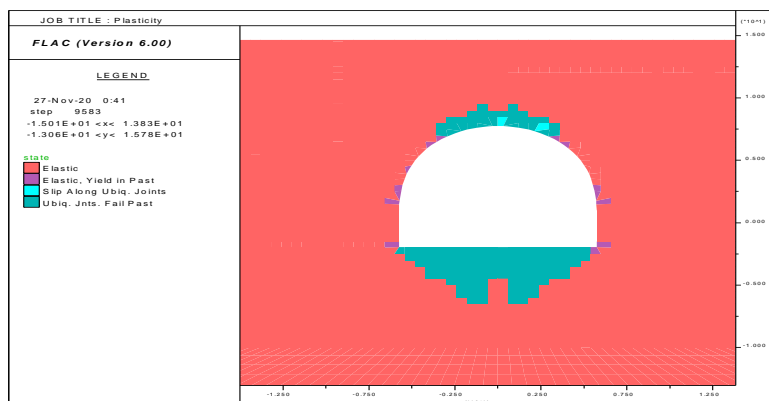
Η μεγαλύτερη μετατόπιση του σκυροδέματος παρατηρείται στη στέγη της ημιδιατομής με κατεύθυνση κάθετη στις ασυνέχειες της κλίσης των ασυνεχειών που ολισθαίνουν (0°).

5.2.2.1.2 5^η φάση προσομοίωσης



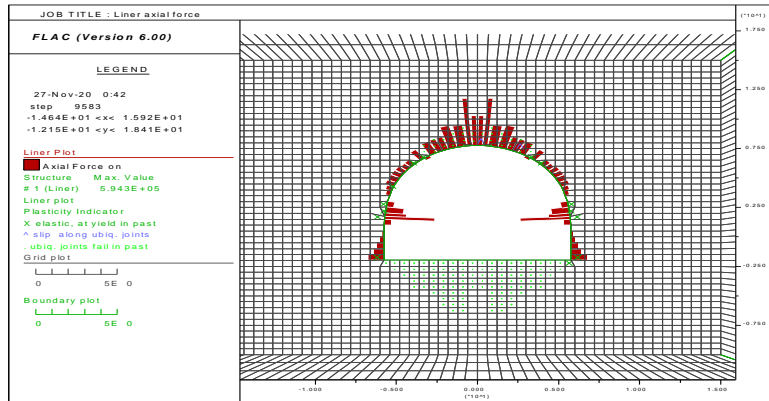
Εικόνα 192. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Οι τιμές μετακινήσεων του πετρώματος γύρω από τη διατομή είναι παρόμοιες στο τρίτο και πέμπτο στάδιο με φορά το κέντρο της διατομής.



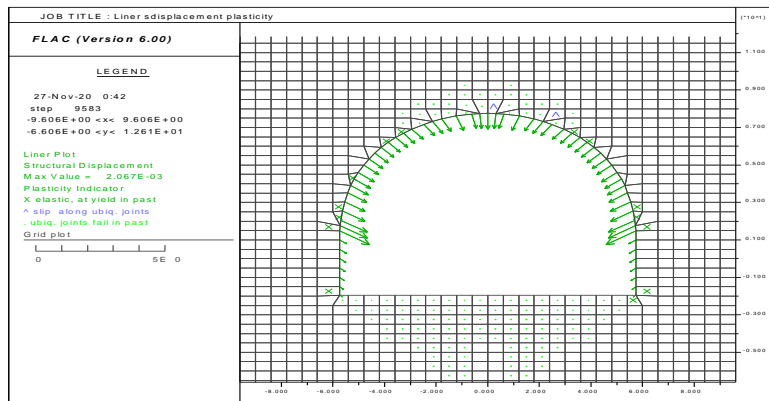
Εικόνα 193. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη γύρω από το θόλο έχει παραπλήσια τιμή και στα δύο στάδια που μελετάμε. Παρατηρείται έντονη ολίσθηση ασυνεχειών στο τμήμα κάτω από το δάπεδο της εκσκαφής.



Εικόνα 194. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Τη μεγαλύτερη αξονική δύναμη αναπτύσσει το σκυρόδεμα στο όριο εκσκαφής στη στέγη του θόλου της ημιδιατομής καθώς εκεί ολισθαίνουν οι ασυνέχειες.

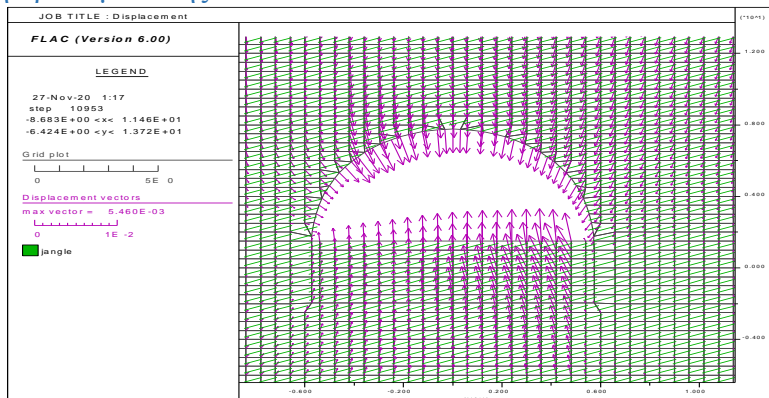


Εικόνα 195. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μεγαλύτερη μετατόπιση στο σκυρόδεμα συντελείται στην σύνδεση βαθμίδας και ημιδιατομής εκεί όπου το σκυρόδεμα τείνει να αποκολληθεί.

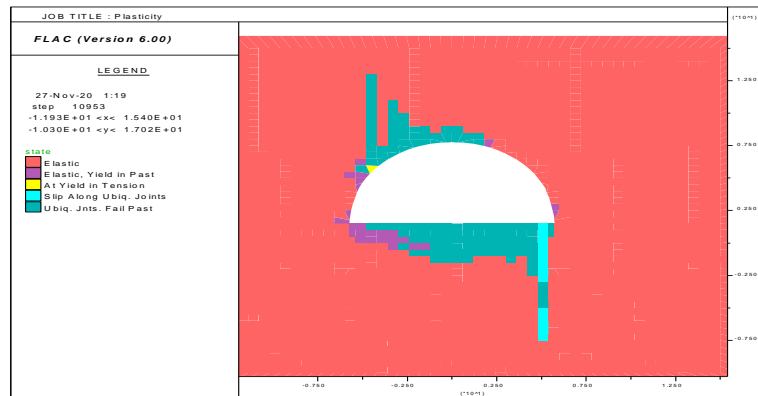
5.2.2.2 Γωνία κλίσης 20°

5.2.2.2.1 3^η φάση προσομοίωσης



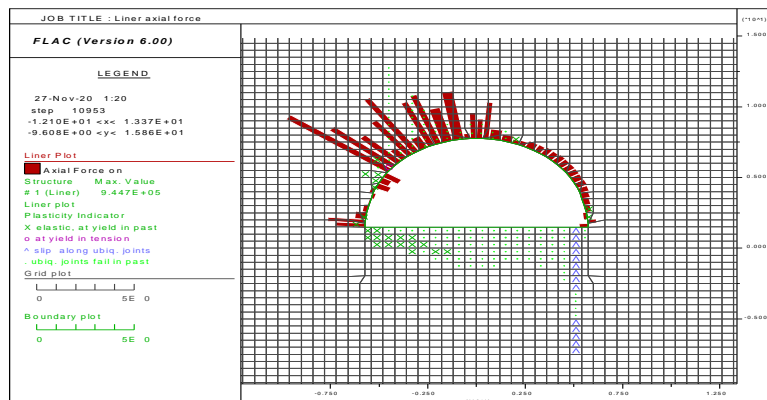
Εικόνα 196. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Οι μετατοπίσεις της βραχομάζας δείχνουν την ανάπτυξη μη συμμετρικού παραμορφωσιακού πεδίου γύρω από τη σήραγγα.



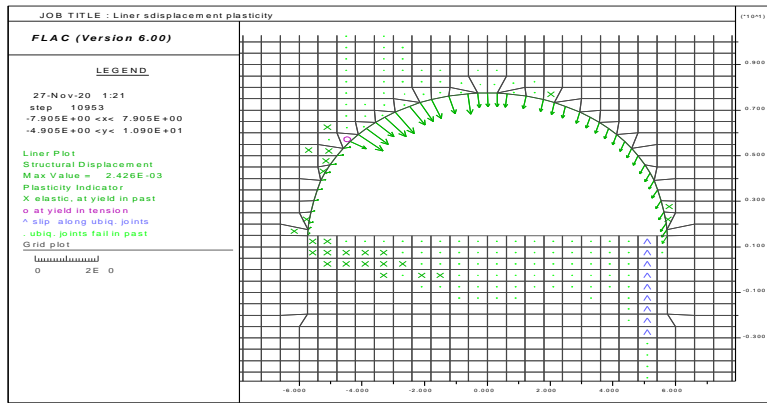
Εικόνα 197. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Παρατηρείται μια μεγάλη περιοχή ολίσθησης στα αριστερά της ημιδιατομής και κάτω δεξιά στη βαθμίδα όπου ολισθαίνουν οι ασυνέχειες κλίσης 20°.



Εικόνα 198. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

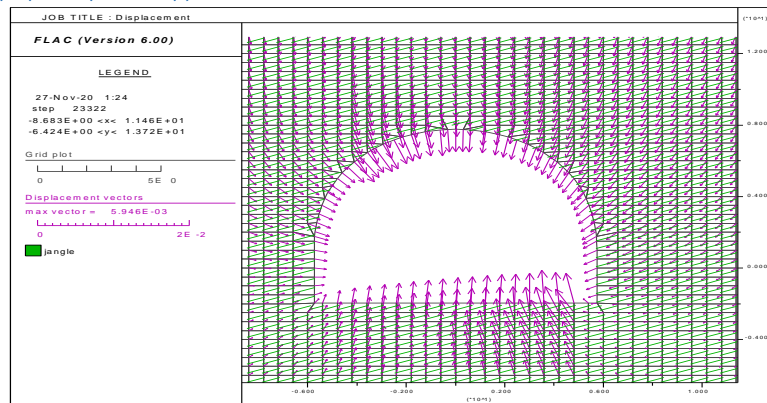
Την υψηλότερη αξονική δύναμη δέχεται το σκυρόδεμα αριστερά της ημιδιατομής όπου εμφανίζονται οι ζώνες ολίσθησης των ασυνεχειών καθώς και ζώνες που διαρρέει η απομένουσα βραχομάζα. Ολίσθηση κατά μήκος των ασυνεχειών παρατηρείται στις περισσότερες ζώνες της βαθμίδας λίγο πριν την εκσκαφή της. Λόγω της διαρροής μιας κάθετης σειράς ζωνών στη βαθμίδα το σκυρόδεμα στην αντιδιαμετρική πλευρά δέχεται την υψηλότερη τάση για να σταθεροποιηθεί η διατομή.



Εικόνα 199. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

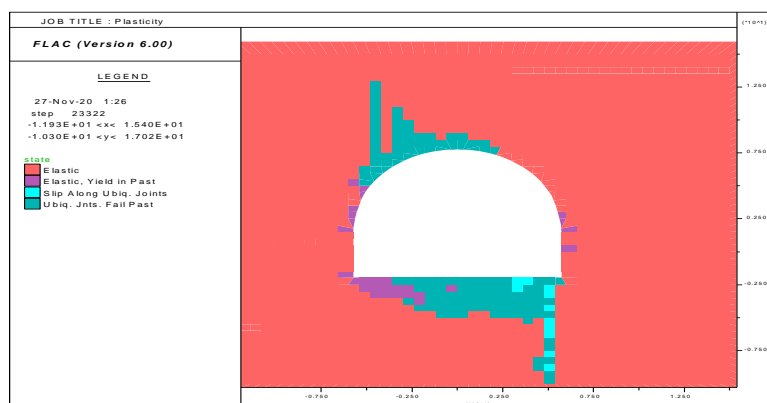
Η μεγαλύτερη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται δίπλα στη ζώνη που αστόχησε εφελκυστικά, οπότε παρέσυρε τις γειτονικές της και την υποστήριξη σ' αυτές.

5.2.2.2.2 5^η φάση προσομοίωσης



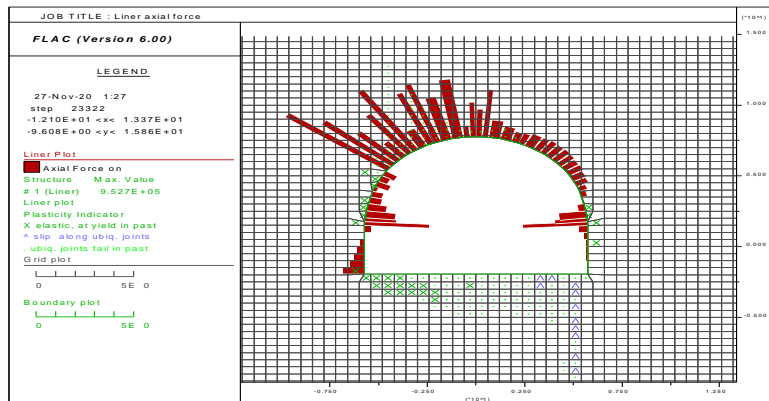
Εικόνα 200. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχόμαζας στο όριο εκσκαφής της ημιδιατομής κλίνουν στο κέντρο της. Η μεγαλύτερη τιμή μετατόπισης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο τρίτο στάδιο και εντοπίζεται στην δεξιά πλευρά της βαθμίδας. Σχηματίζεται μη συμμετρικό παραμορφωσιακό πεδίο.



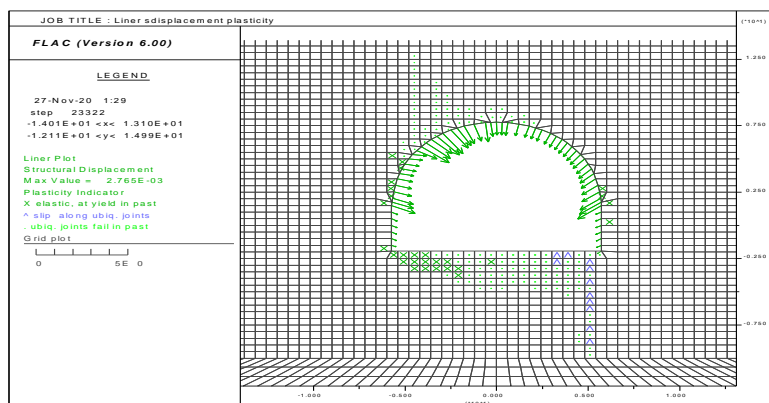
Εικόνα 201. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Στο θόλο παρατηρείται ολίσθηση των ασυνεχειών κλίσης 20°. Επίσης ολισθαίνουν αντιδιαμετρικά ασυνέχειες στην περιοχή κάτω αριστερά από τη βαθμίδα.



Εικόνα 202. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Στο στάδιο αυτό το σκυρόδεμα δέχεται υψηλή αξονική δύναμη αριστερά της ημιδιατομής στο ίδιο σημείο με την τρίτη φάση καθώς αντιδιαμετρικά αστοχούν ζώνες με ασυνέχειες .

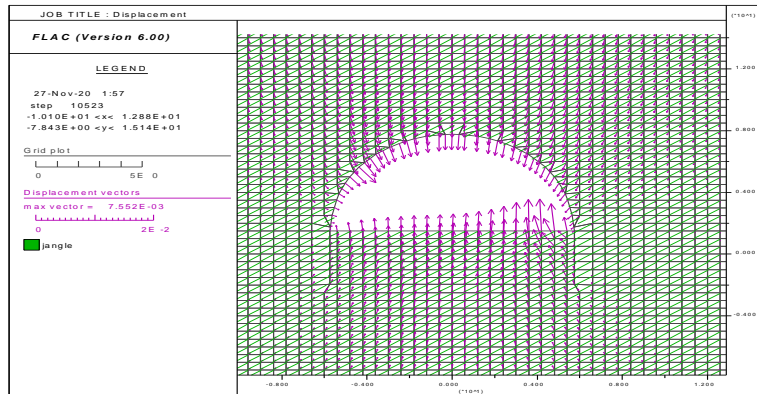


Εικόνα 203. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μεγαλύτερη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στην επαφή ημιδιατομής και βαθμίδας όπου ασκούνται δυνάμεις στους κόμβους στο όριο της εκσκαφής από ζώνες που ολίσθησαν οι ασυνέχειές τους.

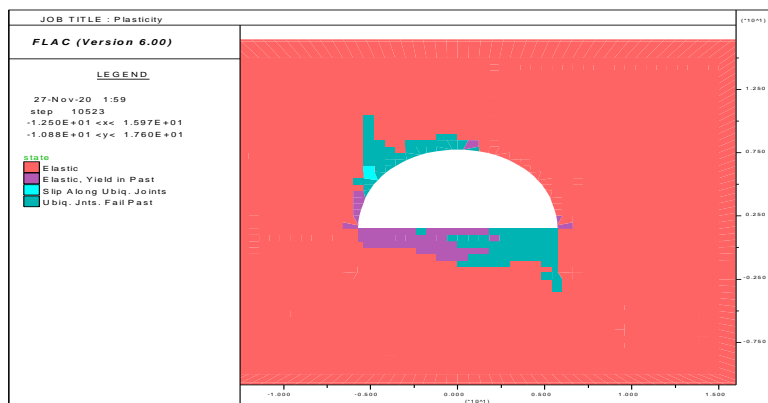
5.2.2.3 Γωνία κλίσης 35°

5.2.2.3.1 3^η φάση προσομοίωσης



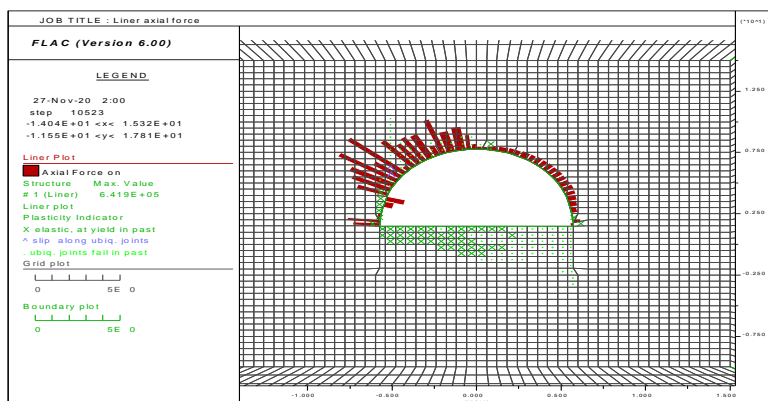
Εικόνα 204. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Οι μετατοπίσεις δείχνουν ότι αναπτύσσεται μη συμμετρικό πεδίο παραμορφώσεων. Τα διανύσματα της μετατόπισης στον αριστερό ώμο της εκσκαφής είναι σχεδόν κάθετα στην κλίση των ασυνεχειών.



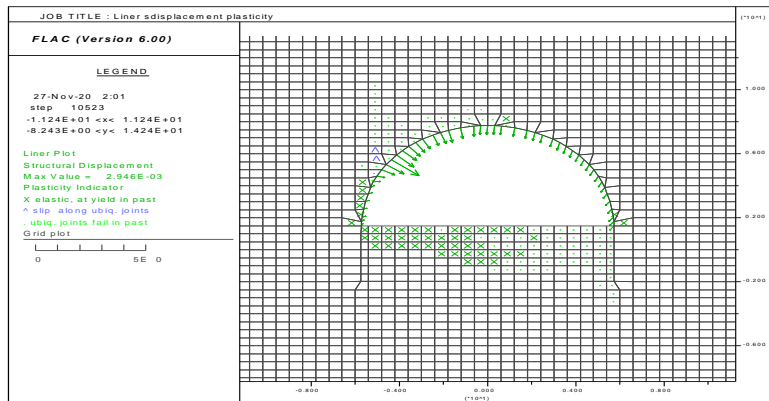
Εικόνα 205. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Στο θόλο δεν παρατηρείται έντονη αστοχία της απομένουσας βραχομάζας (μωβ χρώμα) αλλά κυρίως ολίσθηση των ασυνεχειών (γαλάζιο).



Εικόνα 206. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

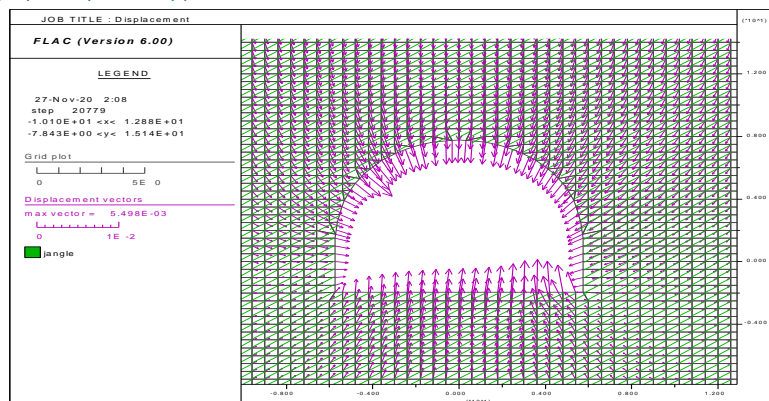
Το σκυρόδεμα δέχεται υψηλή αξονική δύναμη αριστερά στο όριο εκσκαφής της ημιδιατομής για να εξισοροπήσει την ολίσθηση των ασυνεχειών που προκαλεί σύγκλιση της διατομής.



Εικόνα 207. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

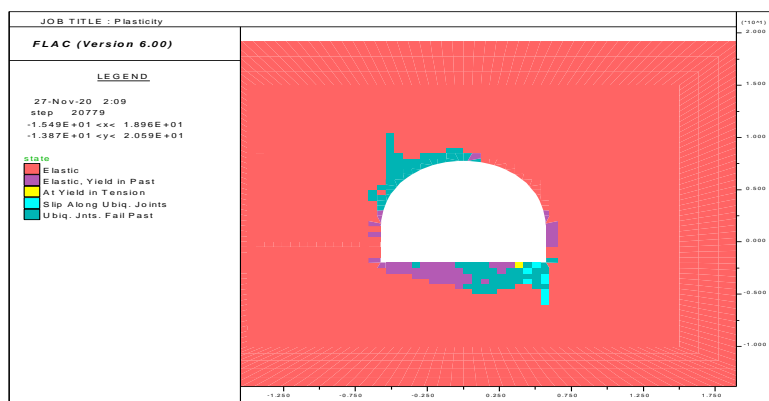
Η μεγαλύτερη μετατόπιση παρατηρείται στο σκυρόδεμα αριστερά της ημιδιατομής καθώς εκεί εντοπίζονται ζώνες των οποίων οι ασυνέχειες ολισθαίνουν ευνοώντας τη σύγκλιση της διατομής.

5.2.2.3.2 5^η φάση προσομοίωσης



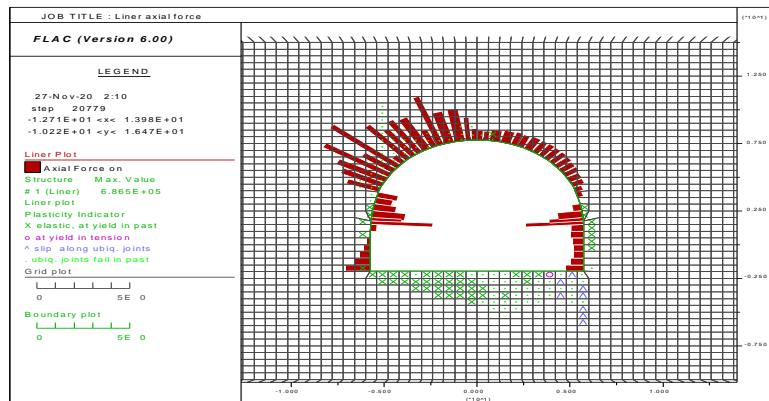
Εικόνα 208. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Αναπτύσσεται μη συμμετρικό πεδίο μετατοπίσεων της βραχομάζας, με τη μέγιστη μετατόπιση στο θόλο να εμφανίζεται στον αριστερό ώμο της άνω ημιδιατομής.



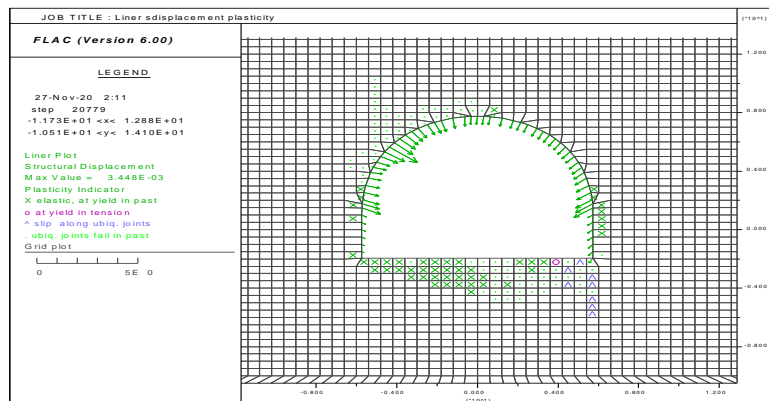
Εικόνα 209. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Παρατηρείται έντονη ζώνη διαρροής στο θόλο στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών. Στη βαθμίδα αστοχεί επίσης η απομένουσα βραχομάζα.



Εικόνα 210. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα δέχεται τη μέγιστη αξονική δύναμη στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής για να την υποστηρίξει καθώς της ασκούν πίεση οι ζώνες από πάνω της με ασυνέχειες που ολισθαίνουν.

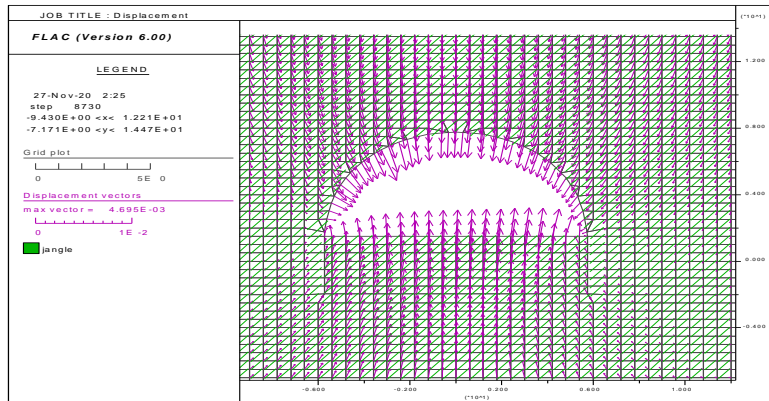


Εικόνα 211. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η εκτενής ολίσθηση των ασυνεχειών κλίσης 35° αριστερά της ημιδιατομής προκαλεί μεγάλη μετατόπιση στο σκυρόδεμα.

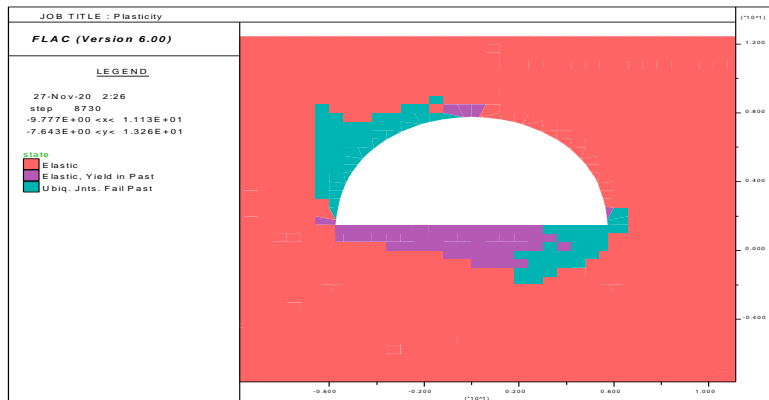
5.2.2.4 Γωνία κλίσης 50°

5.2.2.4.1 3^η φάση προσομοίωσης



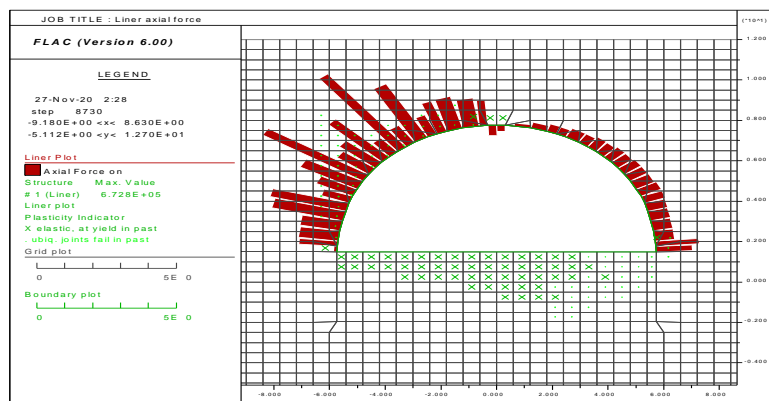
Εικόνα 212. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Τα διανύσματα μετακίνησης κλίνουν στο κέντρο της ημιδιατομής και σχηματίζουν με τη διεύθυνση της ασυνέχειας με κλίση 50° γωνία μεγαλύτερη της ορθής γωνία στη βαθμίδα και μικρότερη από 90° στο θόλο.



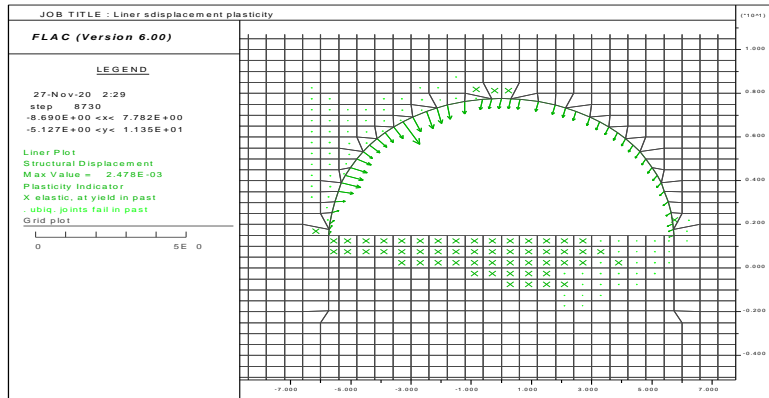
Εικόνα 213. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Στο θόλο αριστερά ολισθαίνουν οι ασυνέχειες και στη βαθμίδα η αστοχία εκδηλώνεται με συνδυασμό διαρροής της απομένουσας βραχομάζας και ολίσθησης των ασυνεχιών δεξιά και αριστερά της αντιστοίχως.



Εικόνα 214. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

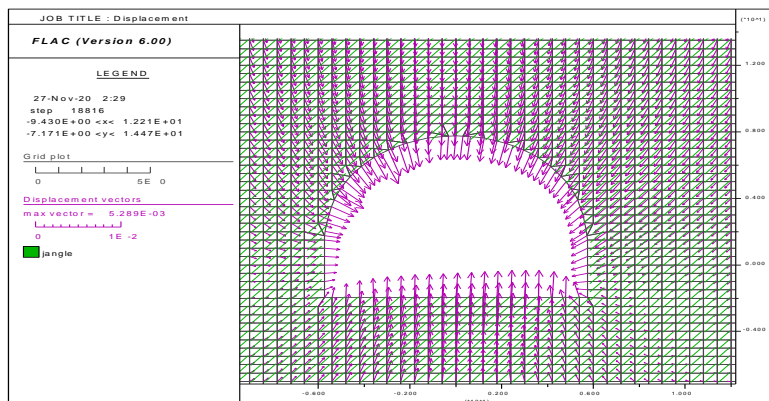
Η ολίσθηση των ασυνεχειών παρασύρει την οροφή οπότε το σκυρόδεμα δέχεται την υψηλότερη αξονική δύναμη αριστερά της άνω ημιδιατομής για να την στηρίξει.



Εικόνα 215. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

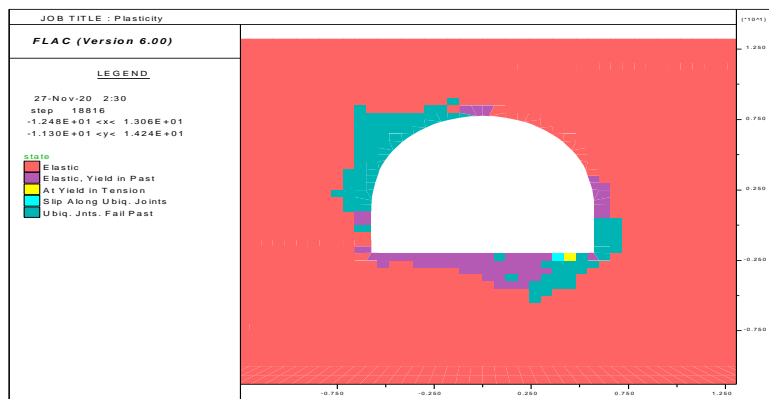
Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής.

5.2.2.4.2 5^η φάση προσομοίωσης



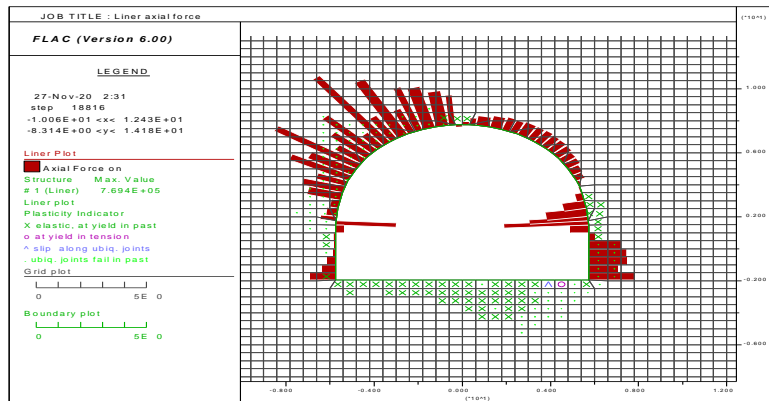
Εικόνα 216. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Οι μετακινήσεις μετά την εκσκαφή της βαθμίδας εκδηλώνονται με παρόμοια κατεύθυνση μ' αυτή στο τρίτο στάδιο και η μέγιστη τιμή ξεπερνάει την αντίστοιχη του τρίτου.



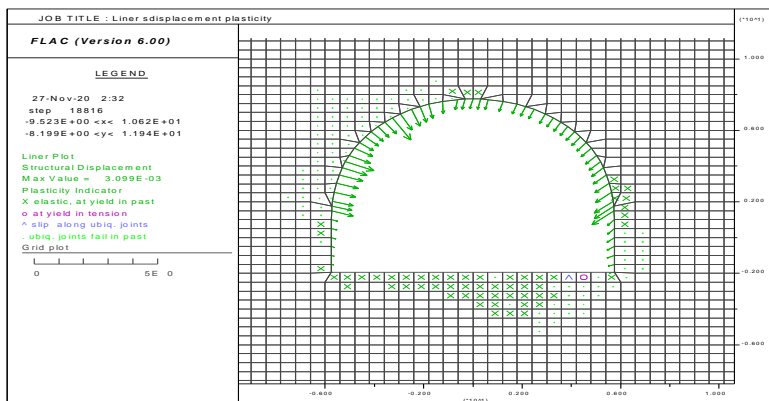
Εικόνα 217. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Δεν παρατηρείται πλαστική ζώνη στην δεξιά πλευρά του θόλου της διατομής. Στην αριστερή ολισθαίνουν οι ασυνέχεις κλίσης 50° και στη βαθμίδα διαρρέει κυρίως η απομένουσα βραχομάζα.



Εικόνα 218. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Η ολίσθηση των ασυνεχειών στη αριστερή πλευρά του θόλου ασκεί δύναμη στους κόμβους του ορίου της εκσκαφής, οπότε το σκυρόδεμα δέχεται υψηλή αξονική δύναμη για να στηρίξει την ημιδιατομή.

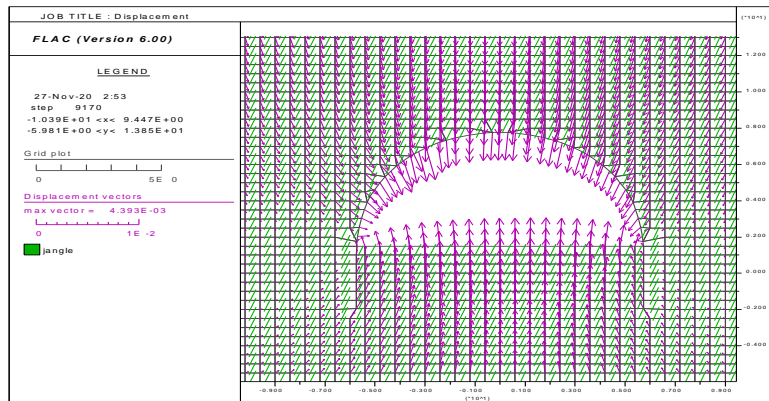


Εικόνα 219. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη μετατόπιση του σκυροδέματος παρατηρείται πλευρικά της ημιδιατομής λόγω της αστοχίας της απομένουσας βραχομάζας από τη μια πλευρά (δεξιά) και της ολίσθησης των ασυνεχειών από την άλλη (αριστερά).

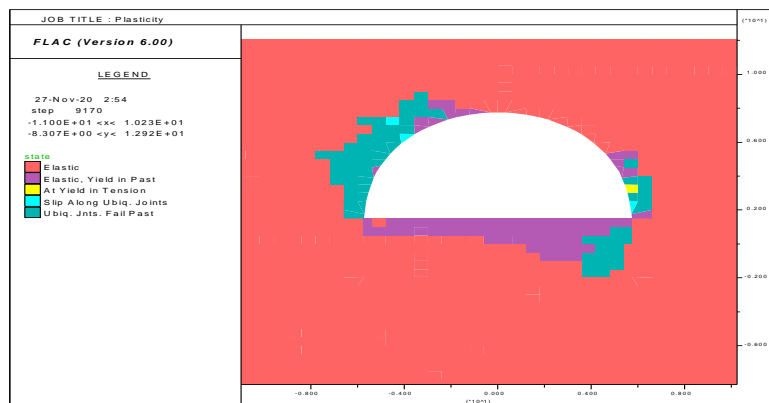
5.2.2.5 Γωνία κλίσης 70°

5.2.2.5.1 3^η φάση προσομοίωσης



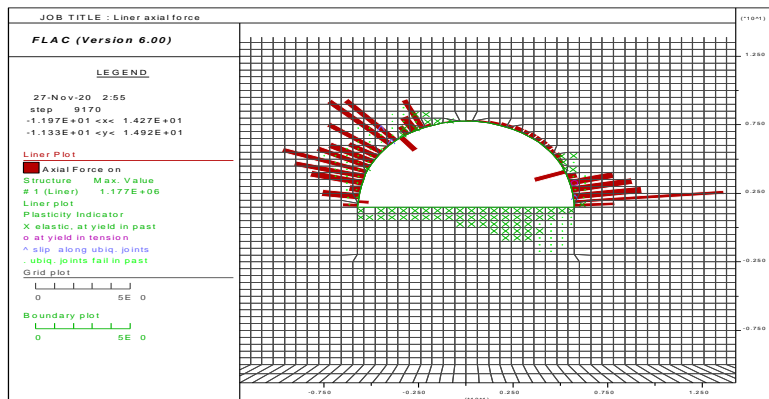
Εικόνα 220. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα μετατόπισης της βραχόμαζας του θόλου κλίνουν στο κέντρο της ημιδιατομής. Εμφανίζεται σχετικά συμμετρικό πεδίο μετατοπίσεων.



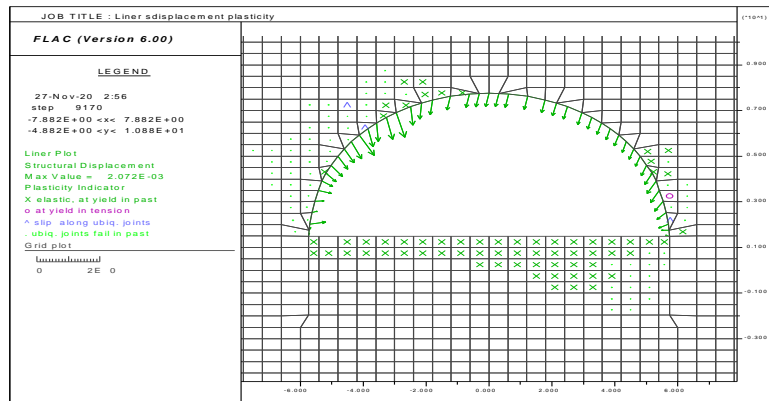
Εικόνα 221. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Παρατηρείται ολίσθηση των ασυνεχειών αριστερά του θόλου και διαρροή της απομένουσας βραχομάζας στη βαθμίδα.



Εικόνα 222. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

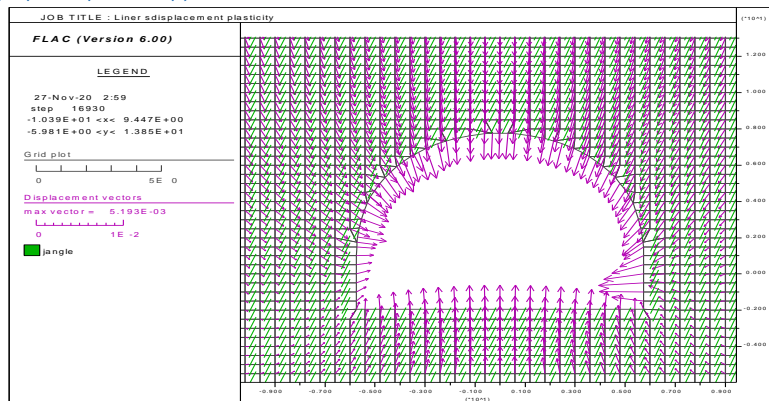
Η μέγιστη αξονική δύναμη αναπτύσσεται στο δεξιό τμήμα στη βάση της ημιδιατομής. Στην ίδια περιοχή εμφανίζεται και το μεγαλύτερο εύρος διαρροής της απομένουσας βραχομάζας.



Εικόνα 223. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

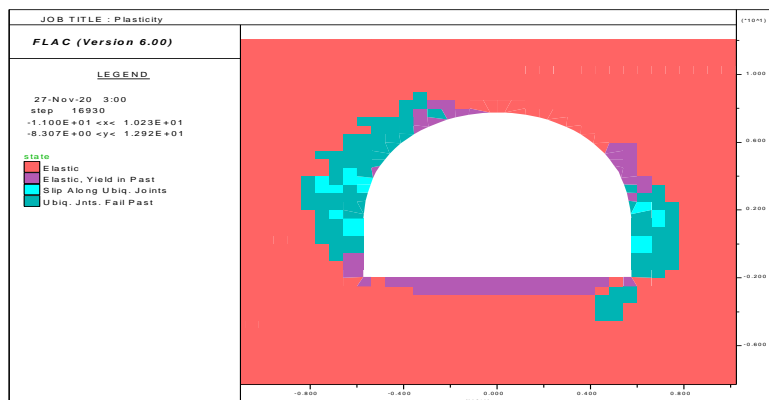
Η μέγιστη μετατόπιση του σκυροδέματος παρατηρείται στην αριστερή πλευρά του θόλου λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών που ασκούν πίεση στην υποστήριξη.

5.2.2.5.2 5^η φάση προσομοίωσης



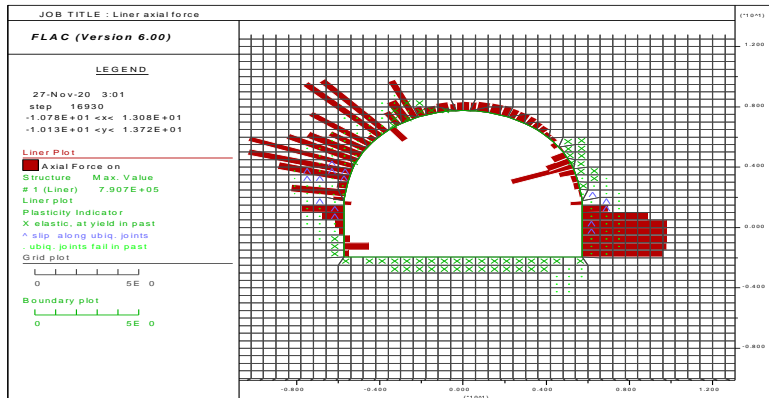
Εικόνα 224. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Προκύπτει υψηλότερη τιμή μέγιστης μετατόπισης σ' αυτό το στάδιο συγκριτικά με το τρίτο. Τα διανύσματα σχηματίζουν γωνία 30° περίπου με τη διεύθυνση των ασυνεχειών κλίσης 70° στο άνω τμήμα της ημιδιατομής. Η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στη δεξιά παρεία της βαθμίδας.



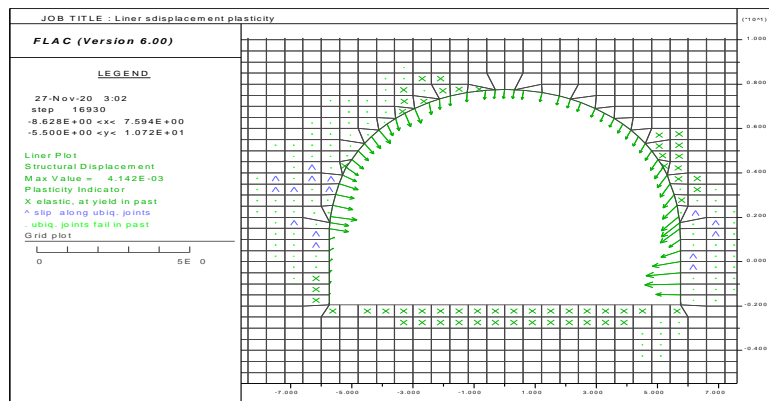
Εικόνα 225. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Υπάρχει διακριτό μέτωπο διαρροής της βραχομάζας αριστερά στο θόλο και στην παρειά της διατομής λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών κλίσης 70°. Επίσης, εμφανίζεται περιοχή ολίσθησης των ασυνεχειών στην δεξιά παρειά της βαθμίδας.



Εικόνα 226. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη αξονική δύναμη ασκείται στο σκυρόδεμα στο αριστερό τμήμα του θόλου λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών στην περιοχή αυτή. Υψηλές αξονικές δυνάμεις δέχεται και το σκυρόδεμα της παρειάς της βαθμίδας.

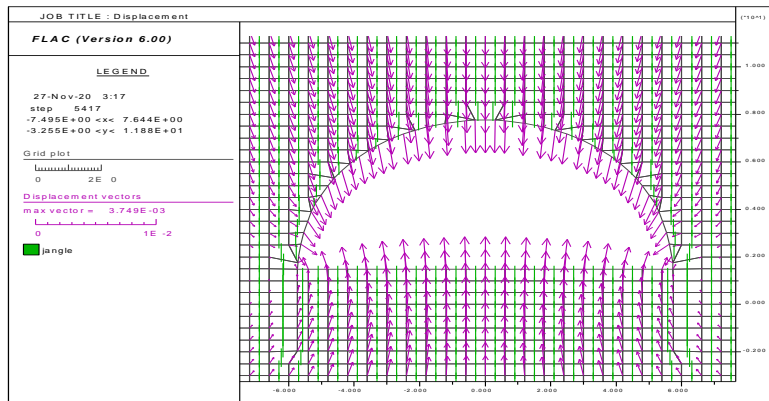


Εικόνα 227. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Υψηλή μετατόπιση στο σκυρόδεμα εντοπίζεται στη δεξιά παρειά στη βαθμίδα καθώς και στο αριστερό τμήμα του θόλου της άνω ημιδιατομής επειδή και στις δύο περιοχές εκτείνεται ολίσθηση ασυνεχιών.

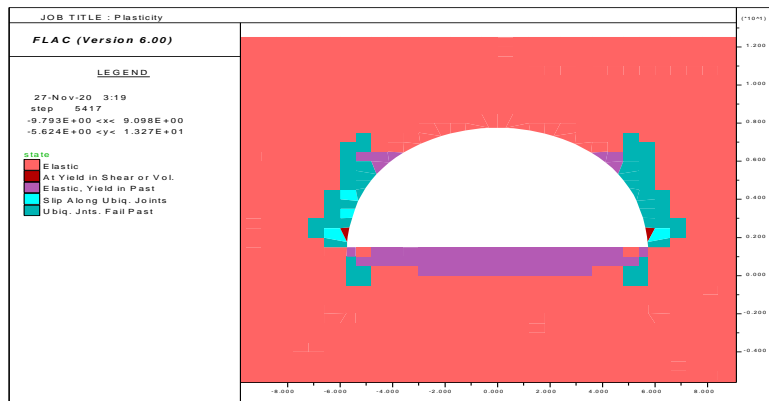
5.2.2.6 Γωνία κλίσης 90°

5.2.2.6.1 3^η φάση προσομοίωσης



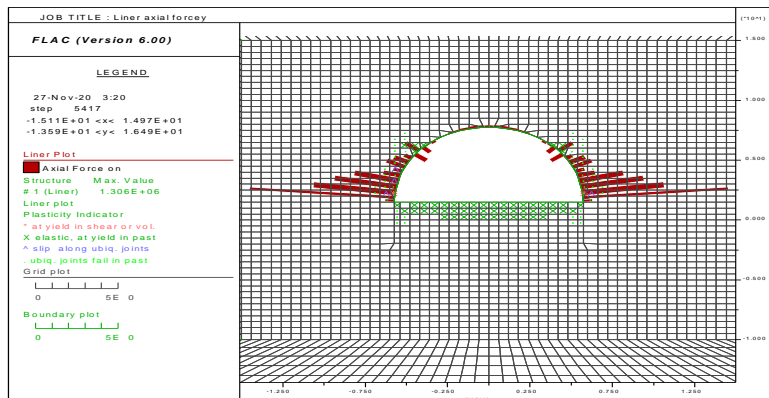
Εικόνα 228. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Εμφανίζεται συμμετρικό πεδίο μετατοπίσεων με τη μέγιστη τιμή στο θόλο να εμφανίζεται στη στέγη. Τα διανύσματα της μετατόπισης έχουν κατεύθυνση παράλληλη με την κλίση των ασυνεχειών ενώ εκείνα της βάσης της ημιδιατομής κλίνουν στην περιφέρειά της.



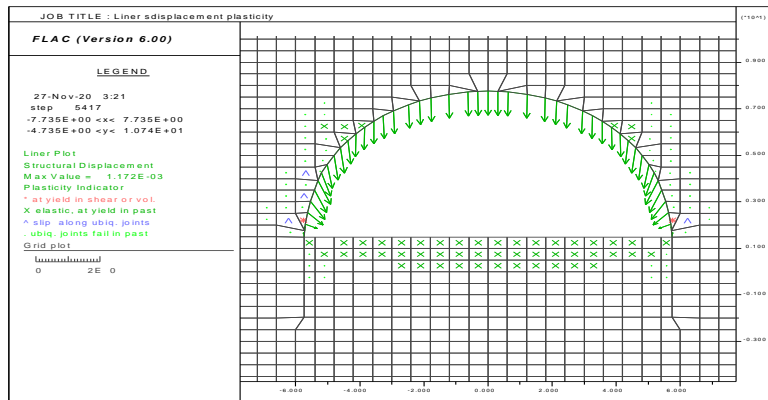
Εικόνα 229. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η διαρροή εκδηλώνεται με ολίσθηση των ασυνεχειών πλευρικά στην ημιδιατομή.



Εικόνα 230. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

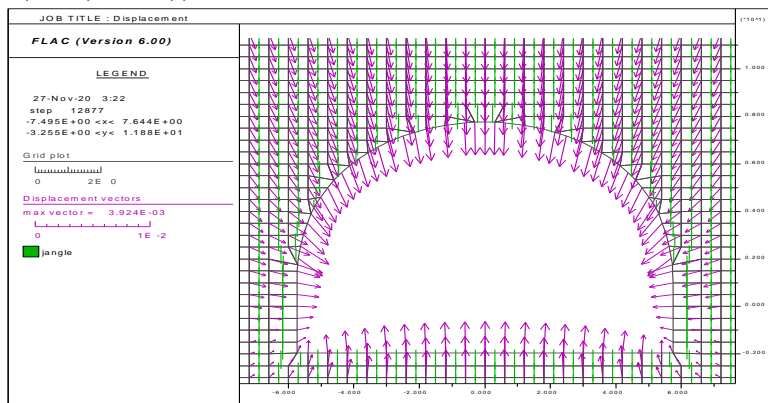
Το σκυρόδεμα δέχεται τη μέγιστη αξονική τάση πλευρικά στη βάση της ημιδιατομής. Η ολίσθηση των ασυνεχειών σε ζώνες περιμετρικά της ημιδιατομής καταλήγει σε μια ζώνη όπου διαρρέει η απομένουσα βραχομάζα.



Εικόνα 231. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

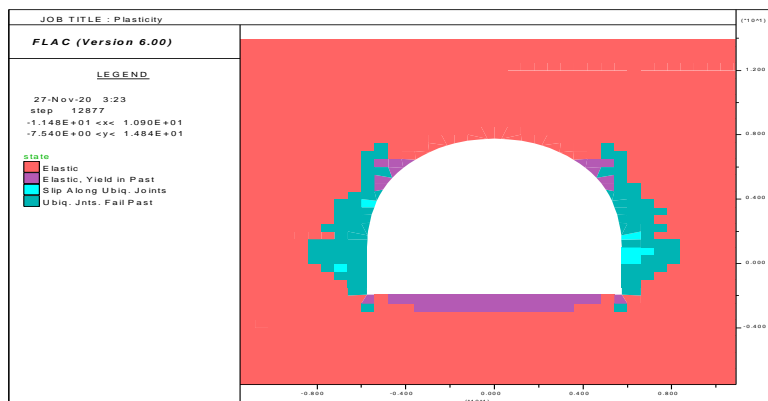
Οι τιμές μετατόπισης στο σκυρόδεμα έχουν παραπλήσιες τιμές περιμετρικά της διατομής.

5.2.2.6.2 5^η φάση προσομοίωσης



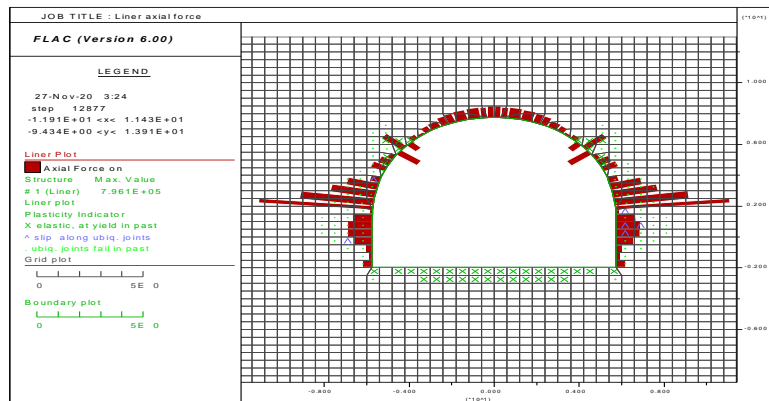
Εικόνα 232. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Η μέγιστη τιμή μετατόπισης έχει υψηλότερη τιμή από την αντίστοιχη στο τρίτο στάδιο καθώς επίσης τα διανύσματα εφαρμόζονται ομοίως με τρίτο στάδιο.



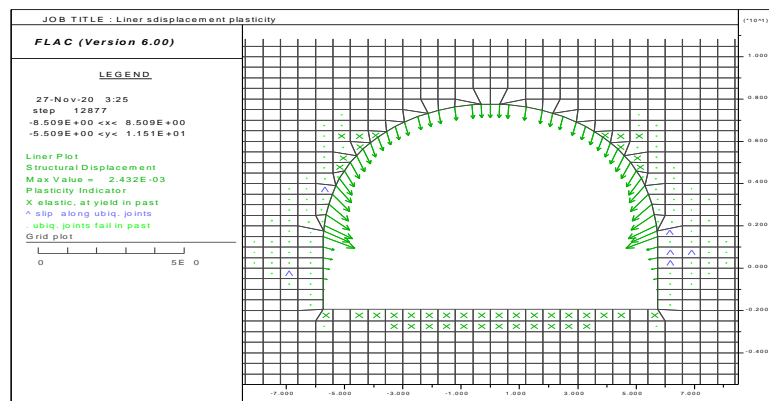
Εικόνα 233. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η διαρροή εκδηλώνεται με ολίσθηση των ασυνεχειών στα πλευρικά τμήματα της άνω ημιδιατομής και στις παρειές της βαθμίδας.



Εικόνα 234. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Υψηλή αξονική δύναμη εμφανίζεται στην ένωση βάσης ημιδιατομής και βαθμίδας λόγω εκτενούς ολίσθησης των ασυνεχειών στην περιοχή.



Εικόνα 235. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Στο σκυρόδεμα η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στην επαφή ημιδιατομής και βαθμίδας.

Πίνακας 10. Πλαστική ζώνη από την προσομοίωση μοντέλου UJ

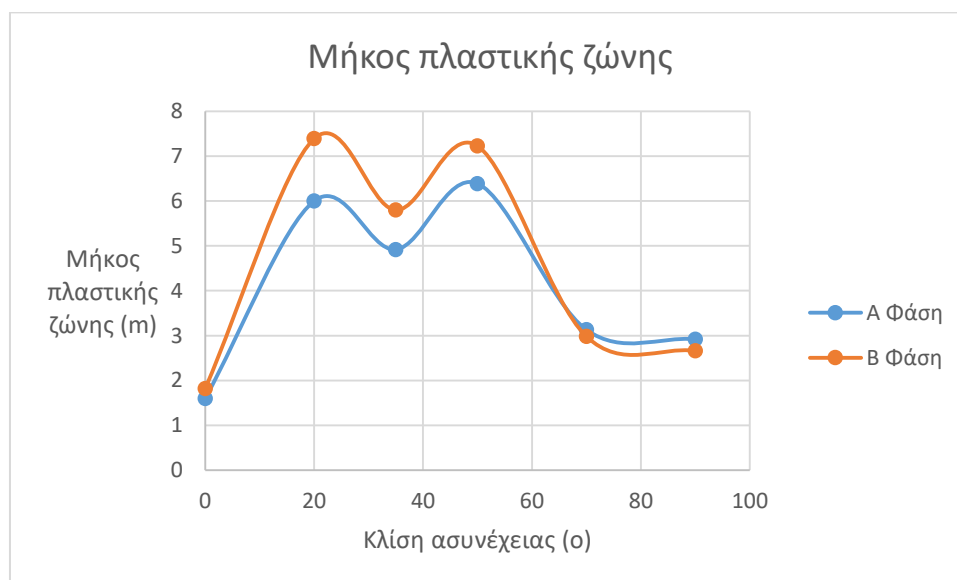
Γωνία κλίσης ασυνέχειας(ο)	Μήκος πλαστικής ζώνης στο θόλο (m)	
	A φάση	B φάση
0°	1.74	1.82
20°	7.02	7.39
35°	4.92	5.80
50°	6.39	7.23
70°	3.13	2.98
90°	2.92	2.66

Πίνακας 11. Αξονική τάση από την προσομοίωση μοντέλου UJ

Γωνία κλίσης ασυνέχειας(ο)	Αξονική τάση στο σκυρόδεμα (MN)	
	A φάση	B φάση
0°	0.4417	0.5943
20°	0.9447	0.9527
35°	0.6419	0.6865
50°	0.6728	0.7694
70°	1.177	0.7907
90°	1.306	0.7961

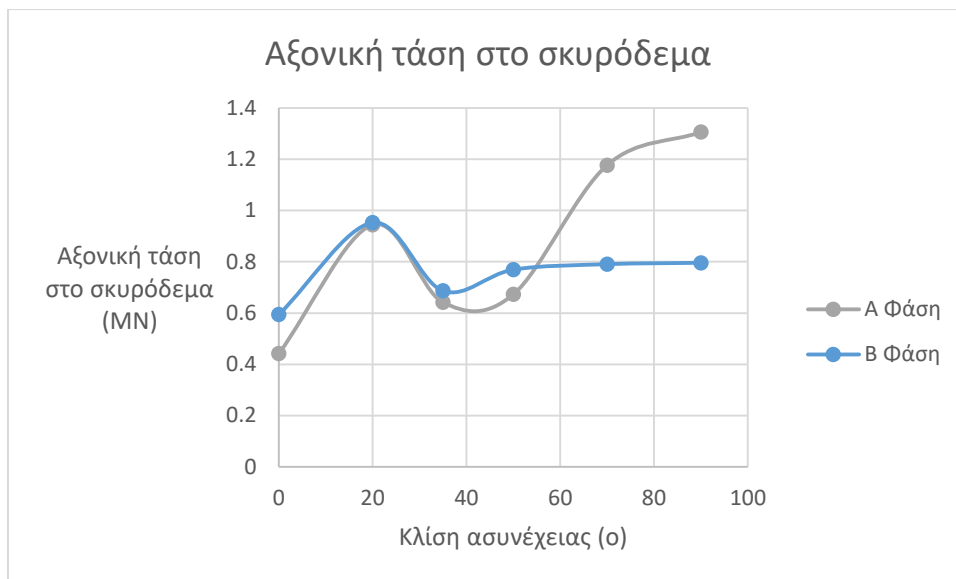
Πίνακας 12. Μετατόπιση στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου UJ

Γωνία κλίσης ασυνέχειας(ο)	Μετατόπιση στο σκυρόδεμα (mm)	
	A φάση	B φάση
0°	1.099	2.067
20°	2.426	2.765
35°	2.946	3.448
50°	2.478	3.099
70°	2.072	4.142
90°	1.172	2.432



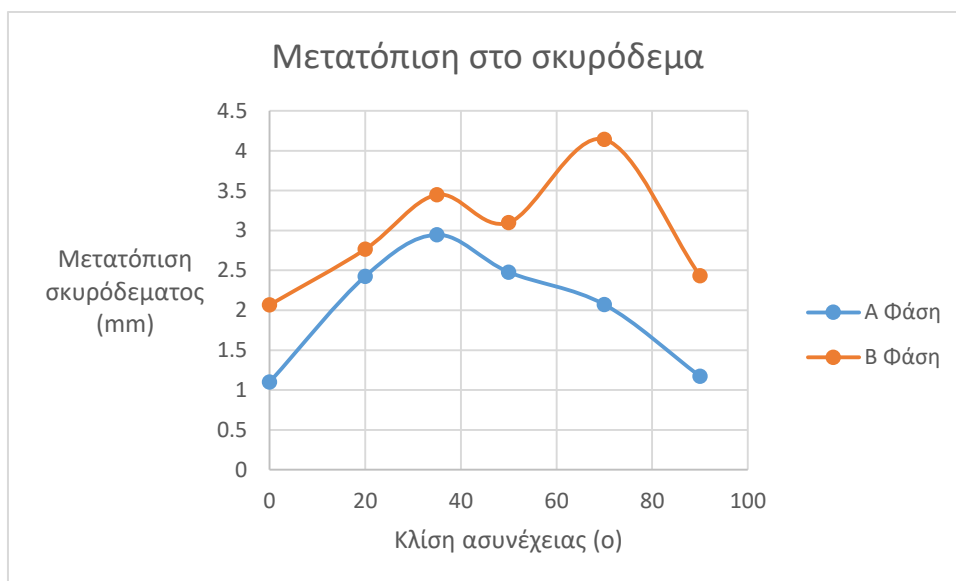
Εικόνα 236. Διάγραμμα πλαστικής ζώνης από την προσομοίωση μοντέλου UJ

Το μήκος της πλαστικής ζώνης στη Β φάση είναι γενικά μεγαλύτερο απ' ότι στην Α. Για ασυνέχειες με γωνία κλίσης 0°-50° το μήκος της πλαστικής ζώνης αυξάνει και στις δύο φάσεις ενώ για γωνία 70° και 90° μειώνεται.



Εικόνα 237. Διάγραμμα αξονικής τάσης από την προσομοίωση μοντέλου UJ

Η αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα έχει υψηλότερη τιμή στη Β φάση συγκριτικά με την Α. Στη Β φάση οι τιμές αξονική δύναμης είναι παρόμοιες για γωνία κλίσης ασυνέχειας 50° -90°.



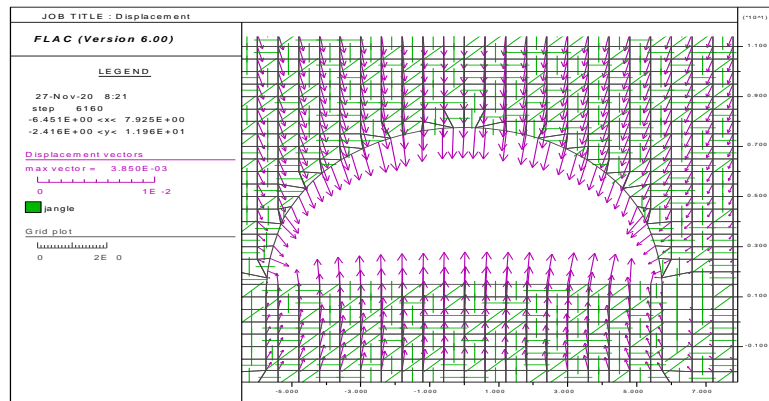
Εικόνα 238. Διάγραμμα μετατόπισης στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου UJ

Η μετατόπιση στο σκυρόδεμα έχει υψηλότερη τιμή στη Β φάση συγκριτικά με την Α. Οι τιμές αυξάνουν για γωνία κλίσης ασυνέχειας 0°-35° και μειώνονται για γωνία 50°-90°.

5.2.3 Προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας Blocky του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI

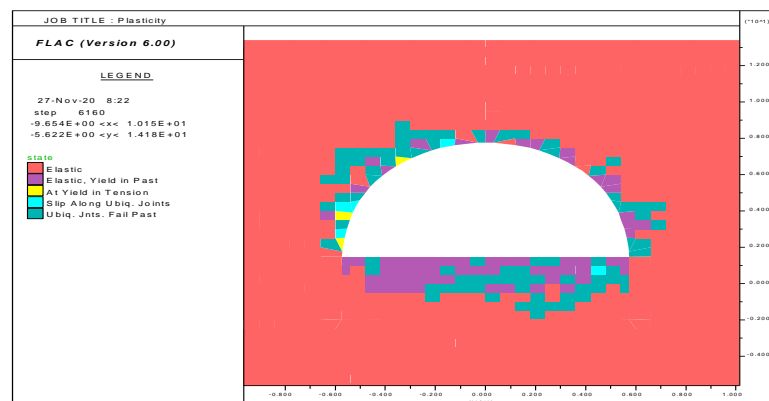
5.2.3.1 Γωνία κλίσης 0°-90°-45°

5.2.3.1.1 3^η φάση προσομοίωσης



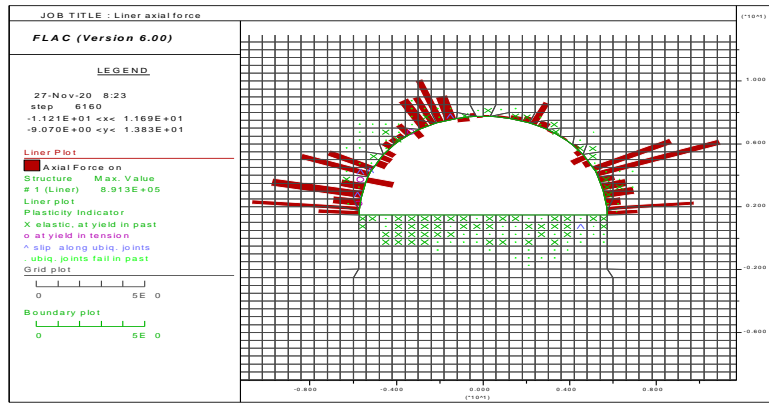
Εικόνα 239. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Παρατηρείται συμμετρική κατανομή των διανυσμάτων της μετατόπισης.



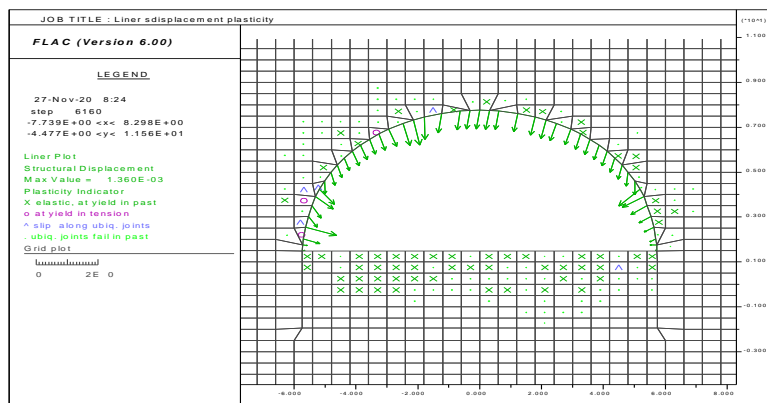
Εικόνα 240. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η διαρροή συμβαίνει κυρίως λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών. Επίσης επιδρά η εφελκυστική αστοχία μερικών ζωνών του άρρηκτου. Σχηματίζεται η εικόνα μίας ομοιόμορφης κατανομής της πλαστικής ζώνης γύρω από το θόλο της άνω ημιδιατομής.



Εικόνα 241. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

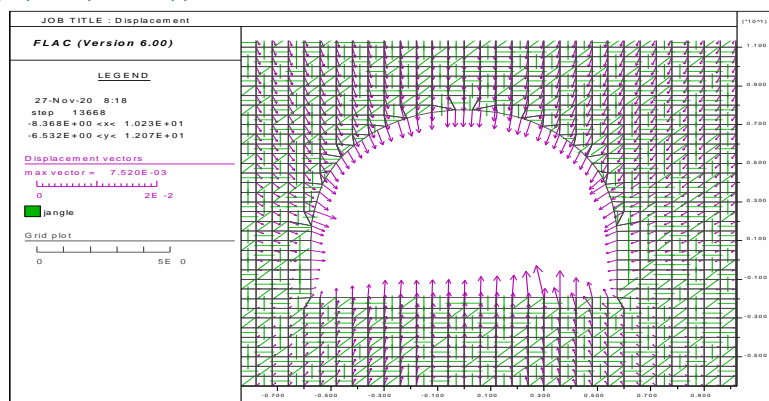
Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο σκυρόδεμα παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα, που επηρεάζεται από τις τοπικές κλίσεις των ασυνεχειών στις γειτονικές με το όριο της εκσκαφής ζώνες περασμένων διαφορών και από τον τρόπο αστοχίας τους (ολίσθηση ασυνεχειών ή αστοχία άρρηκτου πετρώματος).



Εικόνα 242. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

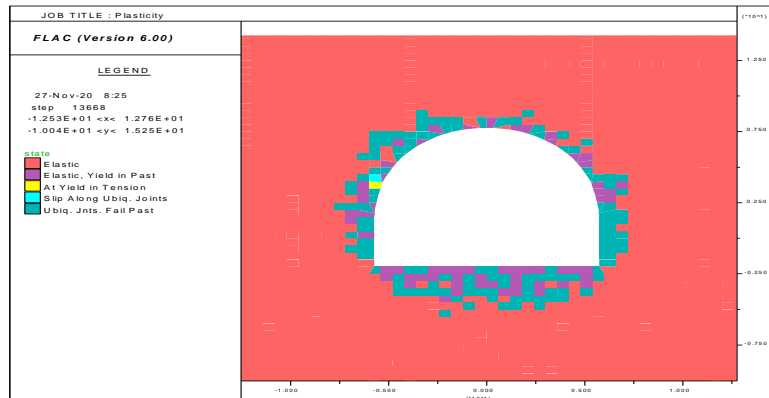
Οι τιμές μετατόπισης στο σκυρόδεμα είναι σχεδόν παραπλήσιες σε όλη την ημιδιατομή και λίγο μεγαλύτερες στα σημεία που το άρρηκτο αστοχεί εφελκυστικά δηλαδή αριστερά της διατομής.

5.2.3.1.2 5^η φάση προσομοίωσης



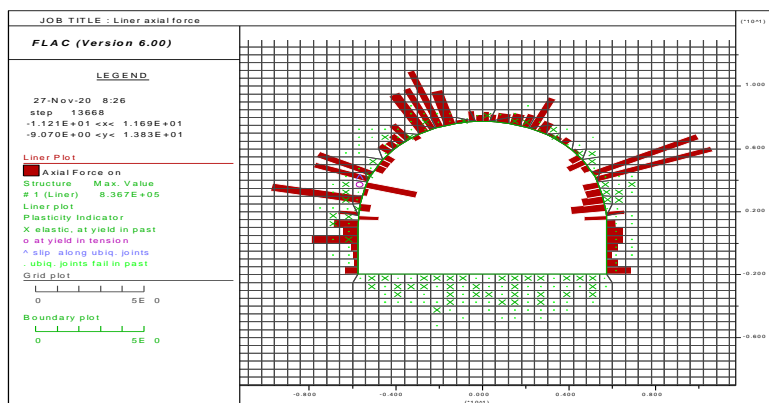
Εικόνα 243. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Στο όριο της εκσκαφής τα διανύσματα μετατόπισης της βραχώμαζας στην ημιδιατομή κλίνουν στο κέντρο της διατομής και της βαθμίδας είναι σχεδόν παράλληλα με την ασυνέχεια δηλαδή κλίσης 0°.



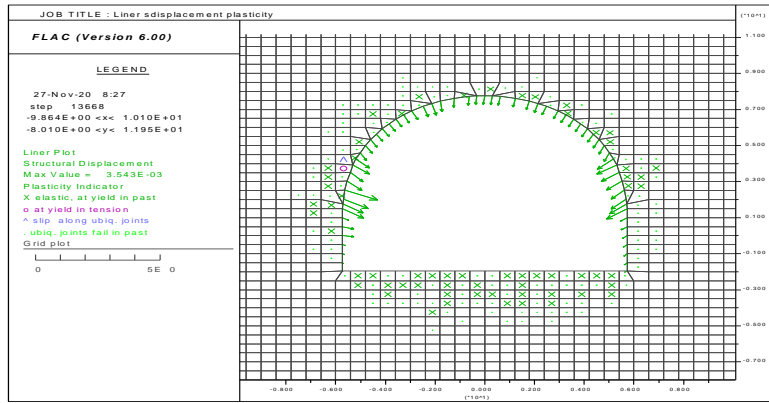
Εικόνα 244. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη εκτείνεται σε ένα σχεδόν σταθερό μήκος γύρω από την ημιδιατομή και την βαθμίδα και οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση ασυνεχειών. Στη περιοχή διαρροής εναλλάσσεται ομοιόμορφα διαρροή του άρρηκτου και ολίσθηση των ασυνεχειών όπως φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 245. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο σκυρόδεμα παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα, που επηρεάζεται από τις τοπικές κλίσεις των ασυνεχειών στις γειτονικές με το όριο της εκσκαφής ζώνες περασμένων διαφορών και από τον τρόπο αστοχίας τους (ολίσθηση ασυνεχειών ή αστοχία άρρηκτου πετρώματος).

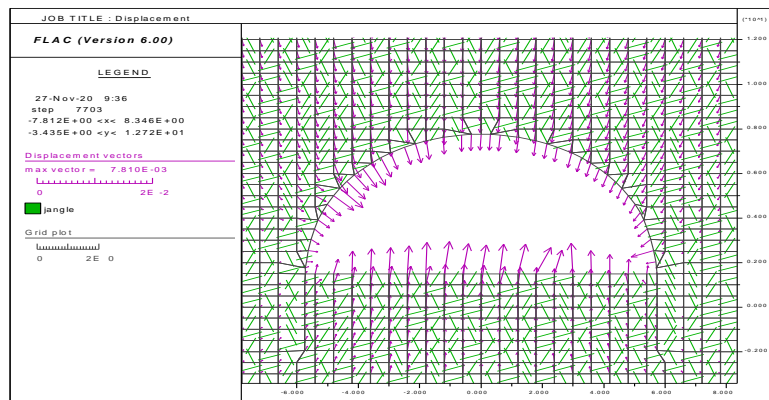


Εικόνα 246. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Οι τιμές μετατόπισης στο σκυρόδεμα είναι σχεδόν παραπλήσιες σε όλη την ημιδιατομή και η μέγιστη εντοπίζεται στην επαφή ημιδιατομής και βαθμίδας. Στην βαθμίδα δεν σημειώνονται έντονες μετατοπίσεις.

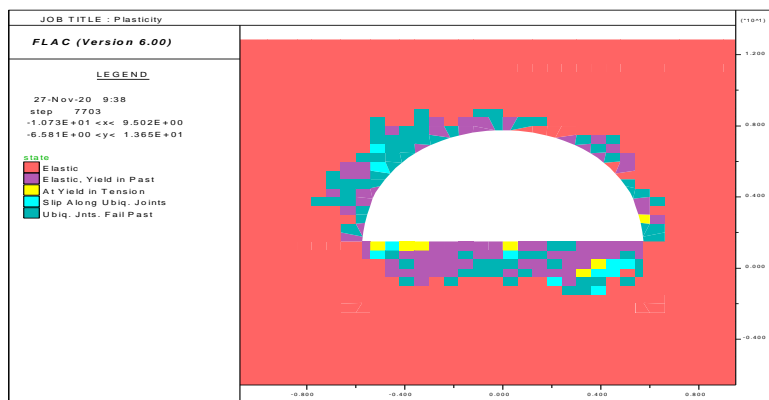
5.2.3.2 Γωνία κλίσης 20°-110°-65°

5.2.3.2.1 3^η φάση προσομοίωσης



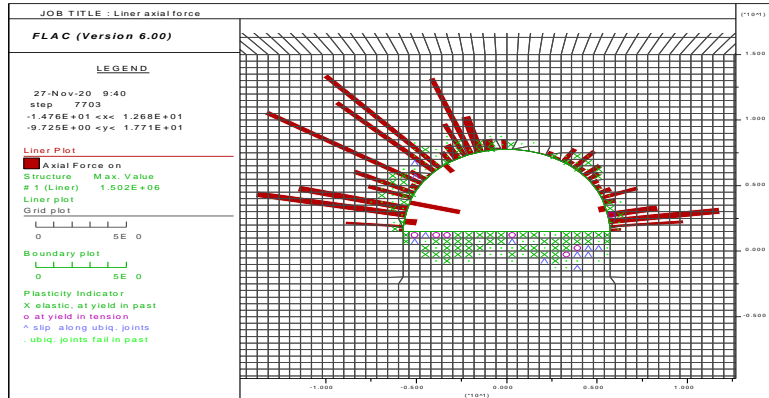
Εικόνα 247. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχώμαζας

Τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχώμαζας στο όριο της εκσκαφής επηρεάζονται τοπικά από τις ασυνέχειες γωνίας κλίσης 20°, σχεδόν εφαπτομενικά στο αριστερό όριο της εκσκαφής.



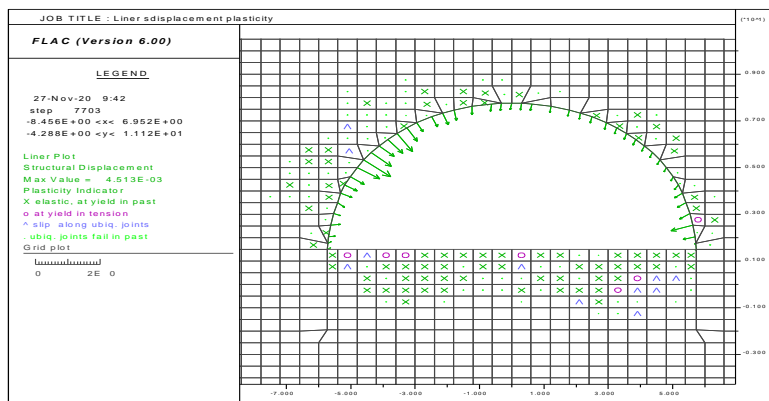
Εικόνα 248. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη στην ημιδιατομή συμπίπτει με τη περιοχή ολίσθησης των ασυνεχειών κυρίως ενώ στην βαθμίδα ταυτίζεται με την περιοχή διαρροής του άρρηκτου, το οποίο σε κάποια ζώνες αστοχεί εφελκυστικά. Αναπτύσσεται περιοχή ολίσθησης ασυνεχειών στον αριστερό ώμο της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής.



Εικόνα 249. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

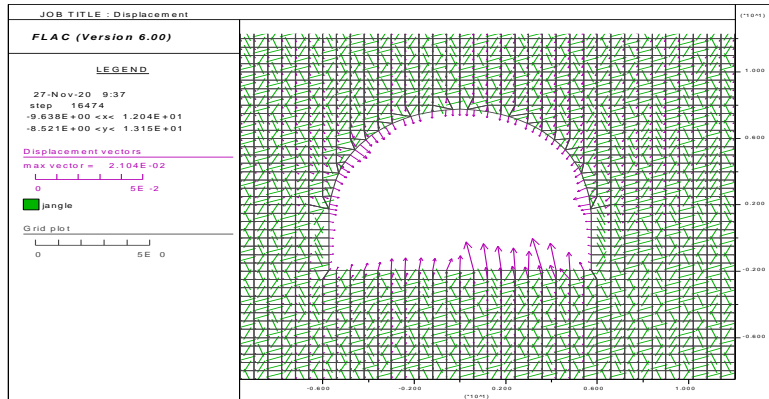
Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής σε περιοχή που διαρρέουν πολλές ζώνες του άρρηκτου.



Εικόνα 250. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

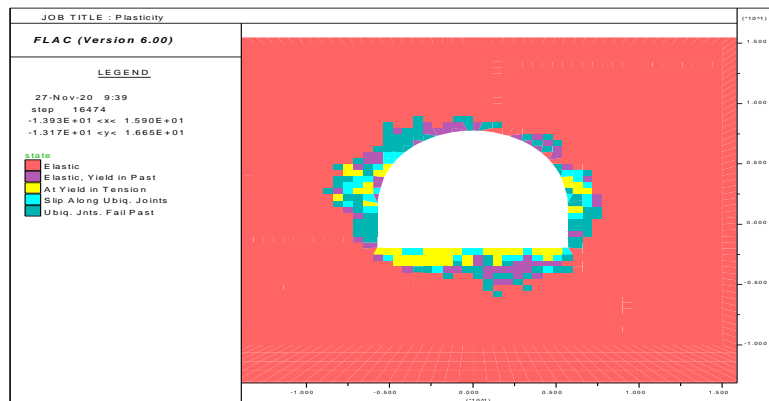
Οι μετατοπίσεις στο σκυρόδεμα είναι έντονες στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής σε περιοχή δηλαδή που η διαρροή οφείλεται σε συνδυασμό ολίσθησης ασυνεχειών και άρρηκτου όπως φαίνεται στην εικόνα.

5.2.3.2.2 5^η φάση προσομοίωσης



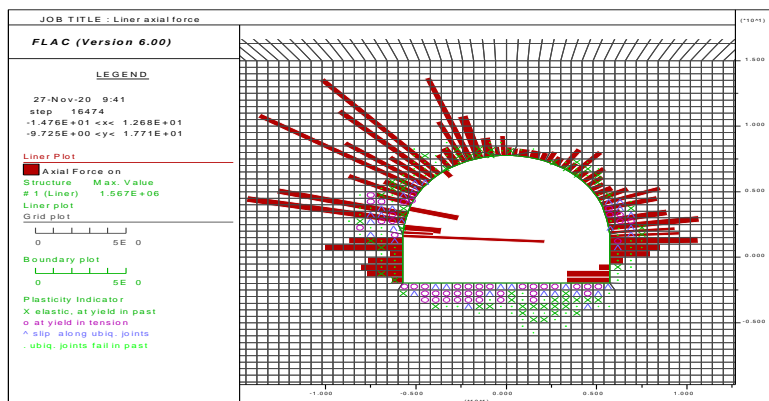
Εικόνα 251. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχόμαζας στο όριο της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής επηρεάζονται τοπικά από την κλίση των ασυνεχειών. Στη βαθμίδα κλίνουν κυρίως προς αριστερά κάθετα στην πρώτη οικογένεια ασυνεχειών της με κλίση 20°.



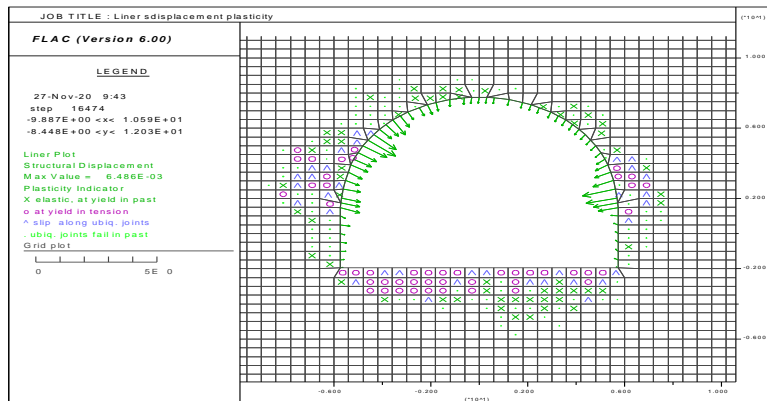
Εικόνα 252. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη έχει μεγαλύτερο μήκος στις πλευρές της ημιδιατομής απ' ότι στη στέγη. Περίπου το ίδιο ποσοστό ζωνών με άρρηκτο πέτρωμα που αστοχεί αλλά και ζωνών με ασυνέχειες που ολισθαίνουν συμμετέχει στη διαρροή. Είναι επίσης έντονος ο οφελκυσμός ειδικά στη βαθμίδα, αλλά και στις παρειές Α και Β φάσης.



Εικόνα 253. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής σε περιοχή που διαρρέουν πολλές ζώνες του άρρηκτου κυρίως εφελκυστικά. Στη διαρροή επιδρά επίσης η εφελκυστική αστοχία του άρρηκτου στη βαθμίδα.

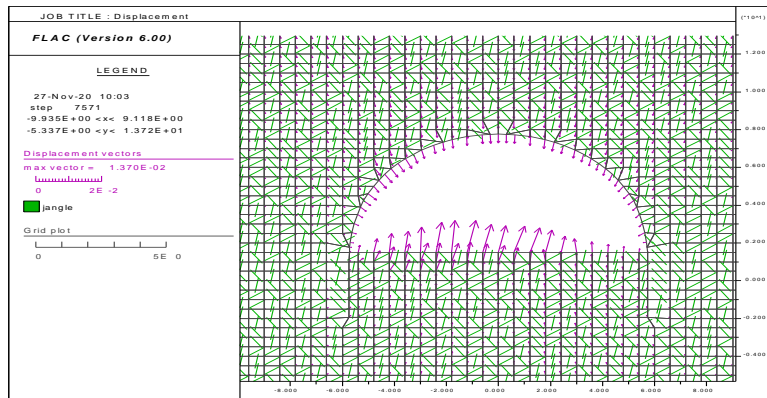


Εικόνα 254. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στο σημείο που ασκείται η μέγιστη αξονική τάση. Επίσης οι τιμές μετατόπισης είναι παραπλήσιες στην ένωση ημιδιατομής και βαθμίδας.

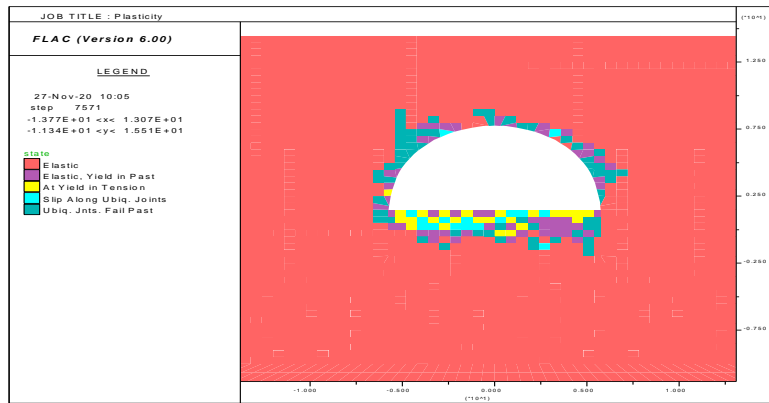
5.2.3.3 Γωνία κλίσης 35°-125°-80°

5.2.3.3.1 3^η φάση προσομοίωσης



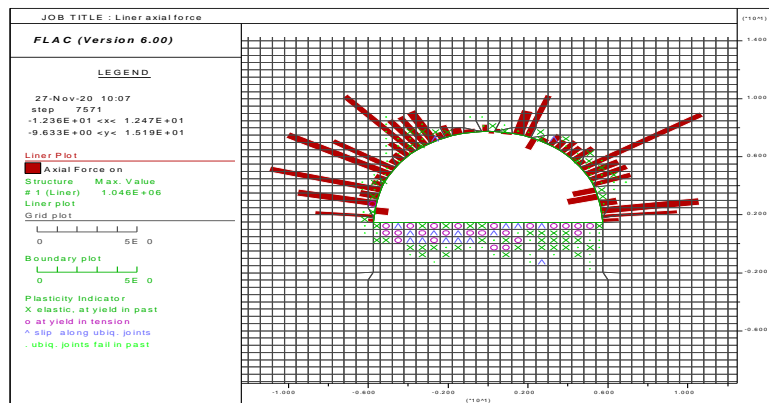
Εικόνα 255. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχόμαζας στο όριο της εκσκαφής της ημιδιατομής σχηματίζουν τόξο γύρω της και συγκλίνουν στο κέντρο της ενώ τα διανύσματα της βαθμίδας κλίνουν δεξιά παράλληλα στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών της, δηλαδή με κλίση 80°.



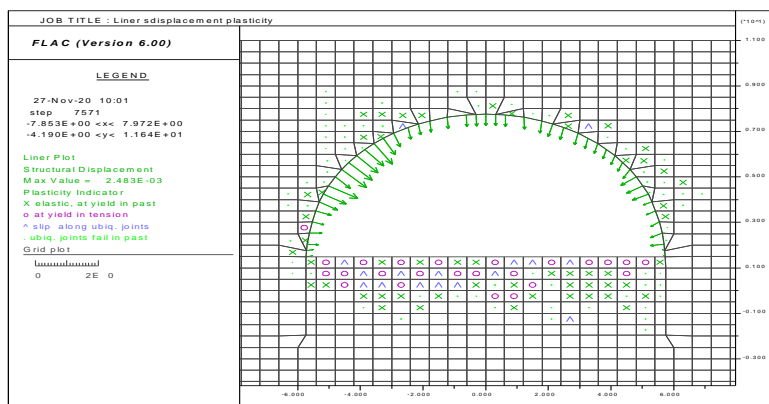
Εικόνα 256. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή οφείλεται στην ολίσθηση των ασυνεχειών και στη βαθμίδα στην διαρροή του άρρηκτου.



Εικόνα 257. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

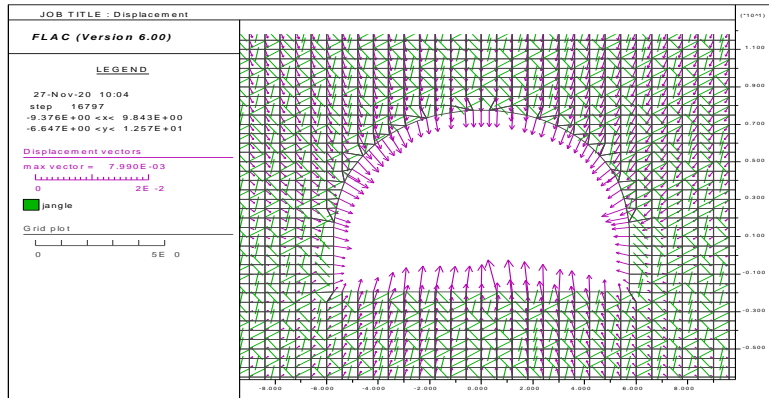
Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε περιοχή που διαρρέουν πολλές ζώνες του άρρηκτου. Στη διαρροή επιδρά επίσης η εφελκυστική αστοχία του άρρηκτου στη βαθμίδα.



Εικόνα 258. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

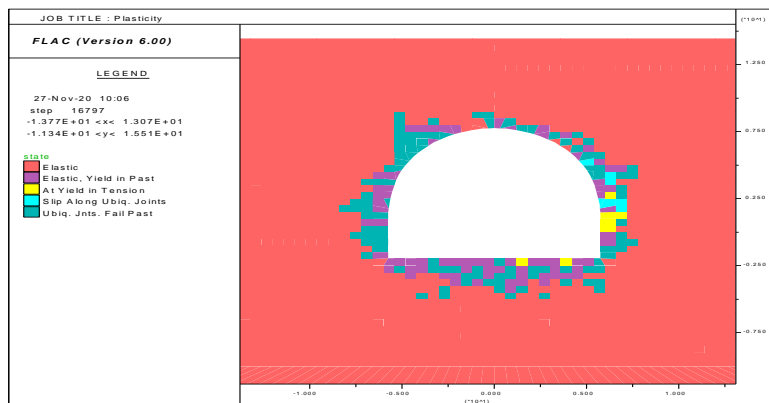
Μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στην αριστερή πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνες που ολισθαίνουν οι ασυνέχειες.

5.2.3.3.2 5^η φάση προσομοίωσης



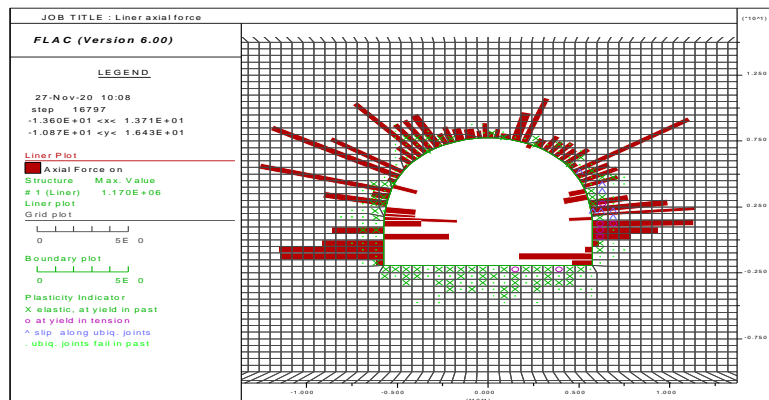
Εικόνα 259. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχόμαζας στο όριο της εκσκαφής της ημιδιατομής σχηματίζουν τόξο γύρω της και συγκλίνουν στο κέντρο της ενώ τα διανύσματα του αριστερού τμήματος της βαθμίδα κλίνουν δεξιά παράλληλα στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών της , δηλαδή με κλίση 80° και του δεξιού παράλληλα στην δεύτερη οικογένεια, δηλαδή με κλίση 125°.



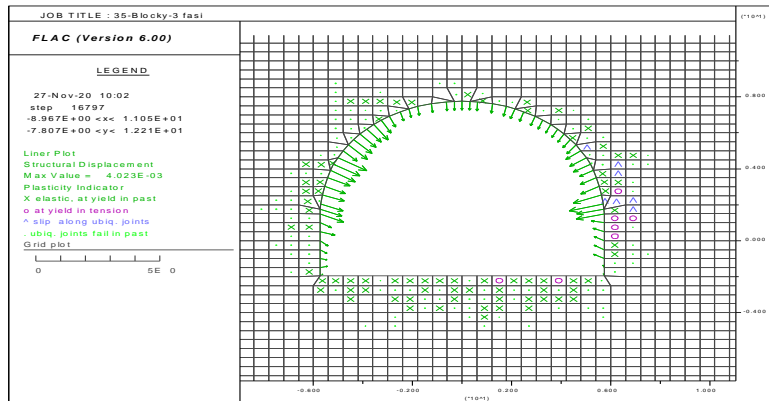
Εικόνα 260. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή και στη βαθμίδα οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση των ασυνεχειών. Στη διαρροή συμμετέχει καθοριστικά η διαρροή του άρρηκτου στο αριστερό τμήμα της ημιδιατομής.



Εικόνα 261. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην αριστερή και δεξιά πλευρά της άνω ημιδιατομής σε ζώνη που ολισθαίνει ασυνέχεια. Η τάση που ασκείται στην αριστερή πλευρά έχει κατεύθυνση παράλληλη στην πρώτη οικογένεια ασυνεχειών, δηλαδή 35° και εκείνη που ασκείται στη δεξιά και έχει παραπλήσια μεγάλη τιμή είναι παράλληλη στη τρίτη οικογένεια ασυνεχειών, δηλαδή κλίσης 80° .

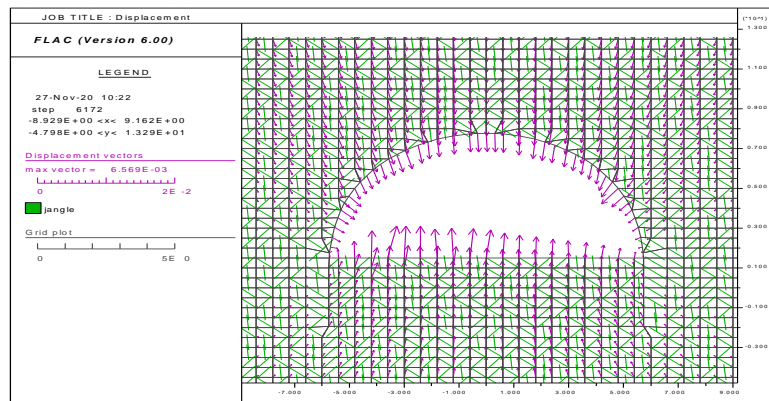


Εικόνα 262. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Έντονες μετατοπίσεις στο σκυρόδεμα παρατηρούνται στα πλευρικά άκρα της ημιδιατομής. Στην επαφή της βαθμίδας με την ημιδιατομή η διάδοση της φόρτισης εκτείνεται από εξωτερικές ζώνες με ασυνέχειες που ολισθαίνουν σε ζώνες έπειτα με άρρηκτο πέτρωμα που διαρρέει και προκαλεί υψηλή μετατόπιση στο σκυρόδεμα όπως φαίνεται στην εικόνα.

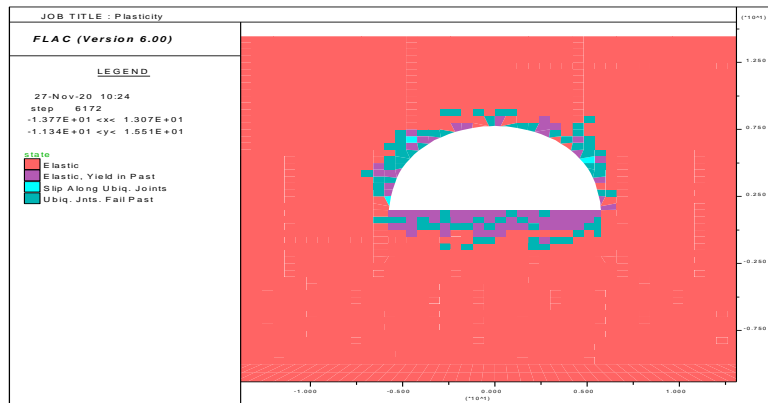
5.2.3.4 Γωνία κλίσης 50° - 140° - 95°

5.2.3.4.1 3^η φάση προσομοίωσης



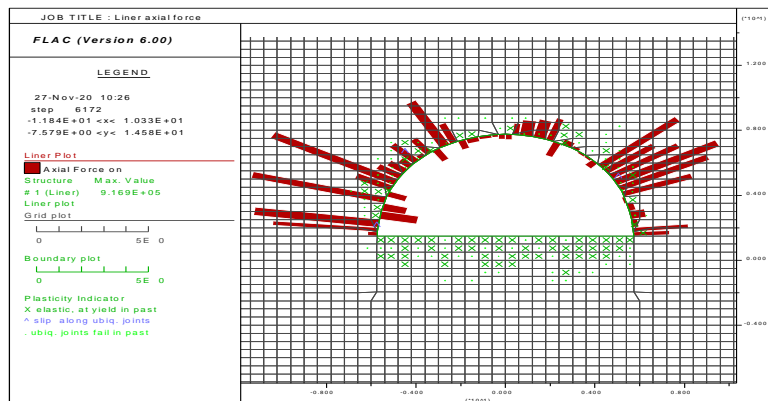
Εικόνα 263. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Τα διανύσματα των μετατοπίσεων της βραχόμαζας στο όριο της εκσκαφής της ημιδιατομής σχηματίζουν τόξο γύρω της και συγκλίνουν στο κέντρο της ενώ τα διανύσματα της βαθμίδας κλίνουν παράλληλα σχεδόν στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών της, δηλαδή με κλίση 80° .



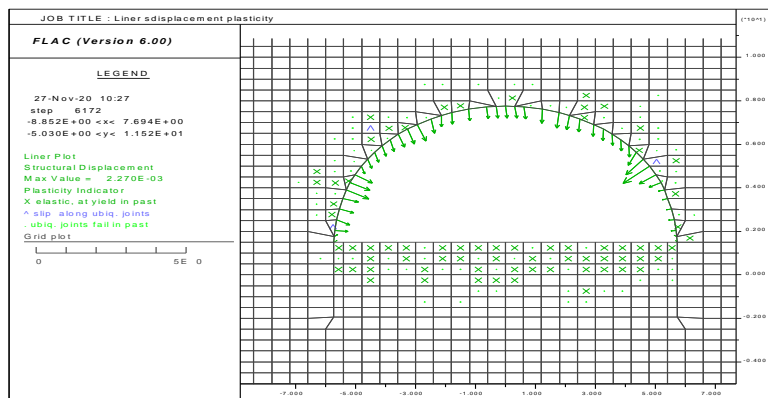
Εικόνα 264. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση των ασυνεχειών και εκείνη της βαθμίδας στην διαρροή του άρρηκτου.



Εικόνα 265. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

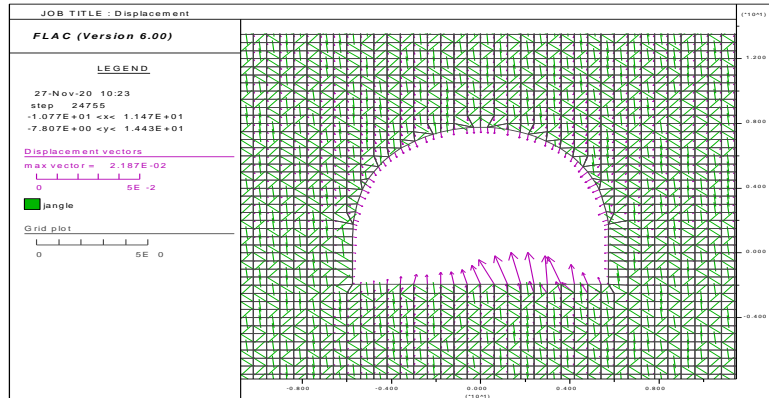
Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνη που ολισθαίνει η ασυνέχειά της.



Εικόνα 266. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

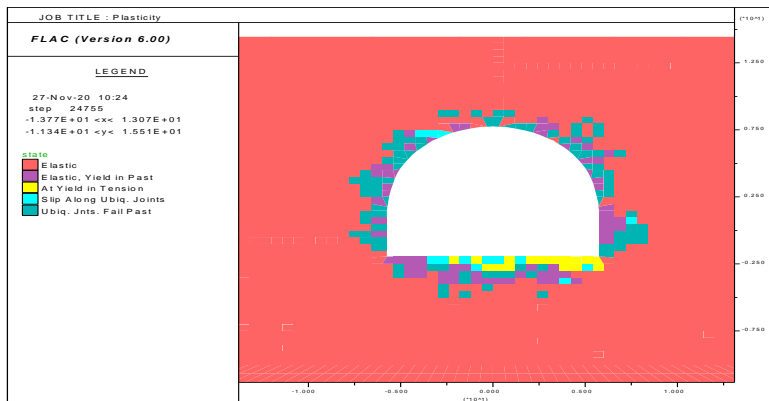
Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα ασκείται στη δεξιά πλευρά της ημιδιατομής. Σ' αυτή τη περιοχή η διαρροή εκδηλώνεται με εναλλαγή ζωνών που διαρρέει το άρρηκτο και με ζώνες που ολισθαίνουν ασυνέχειες όπως φαίνεται στην εικόνα.

5.2.3.4.2 5^η φάση προσομοίωσης



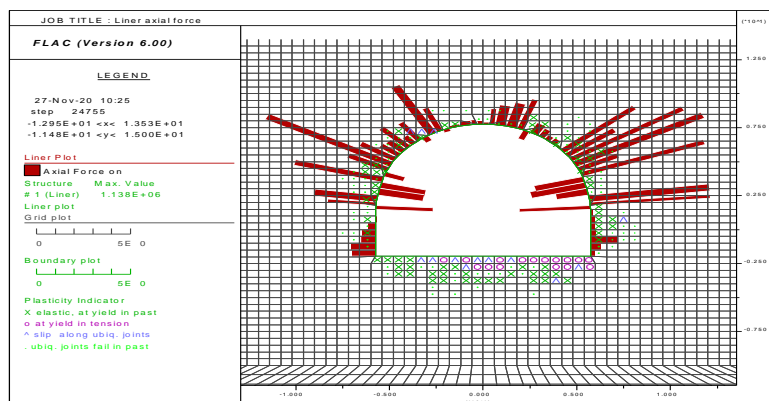
Εικόνα 267. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Τα διανύσματα της μετατόπισης έχουν μικρή τιμή στην οροφή και αποκτούν τη μέγιστη στο αριστερό μέρος της βαθμίδας με κατεύθυνση κάθετη στη πρώτη οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 50°.



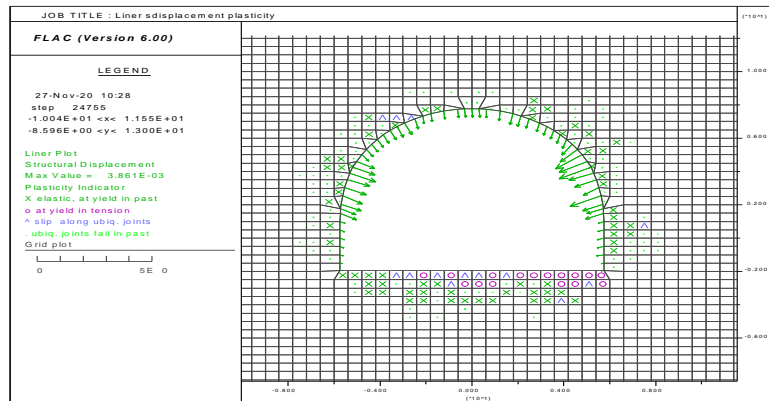
Εικόνα 268. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση των ασυνεχειών όπως επίσης και της βαθμίδας επιπλέον όμως με την εφελκυστική διαρροή του άρρηκτου.



Εικόνα 269. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνες που διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα.

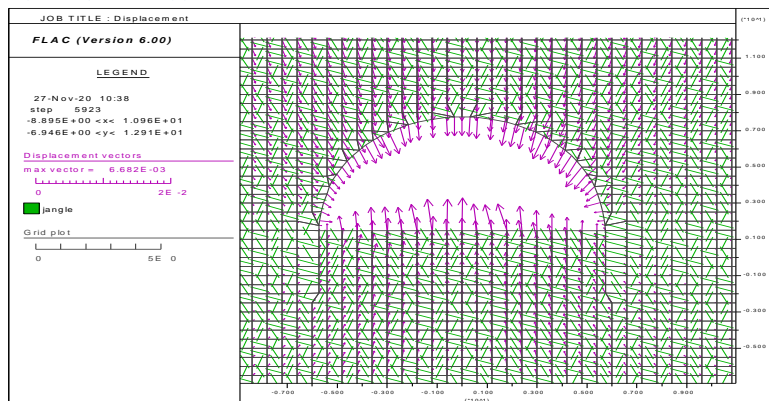


Εικόνα 270. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα ασκείται στη δεξιά πλευρά της ημιδιατομής κυρίως λόγω της διαρροής του άρρηκτου όπως φαίνεται στην εικόνα.

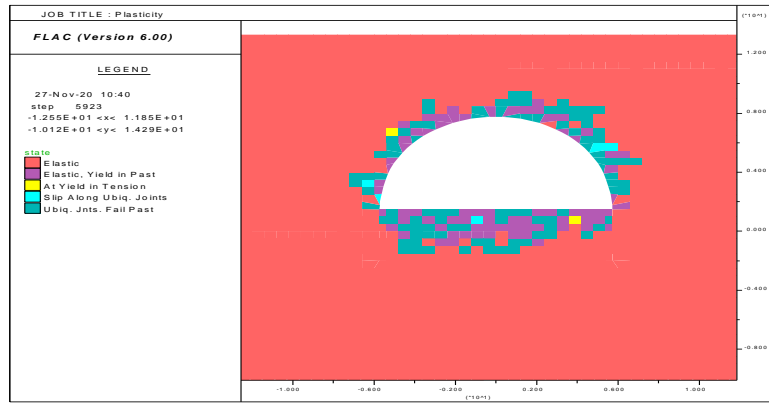
5.2.3.5 Γωνία κλίσης 70°-160°-115°

5.2.3.5.1 3^η φάση προσομοίωσης



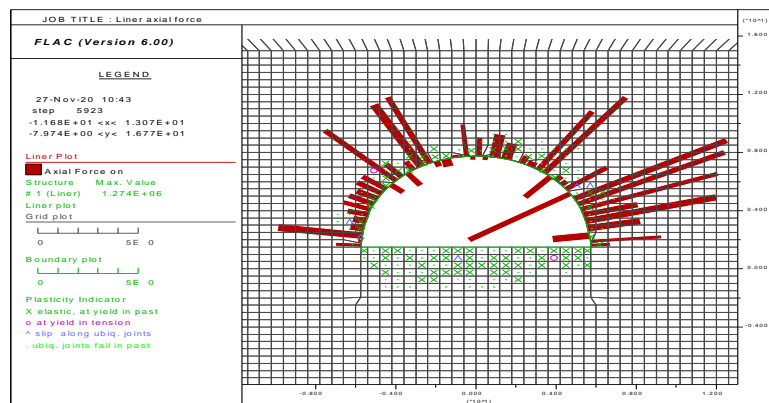
Εικόνα 271. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχόμαζας

Στο όριο εκσκαφής τα διανύσματα της μετατόπισης στην ημιδιατομή έχουν κατεύθυνση προς το κέντρο της ενώ στη βαθμίδα έχουν κατεύθυνση σχεδόν παράλληλη στη τρίτη οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 115°. Στο κέντρο της βάσης βαθμίδα παρατηρείται και το μεγαλύτερο μέτρο μετατόπισης στο σκυρόδεμα.



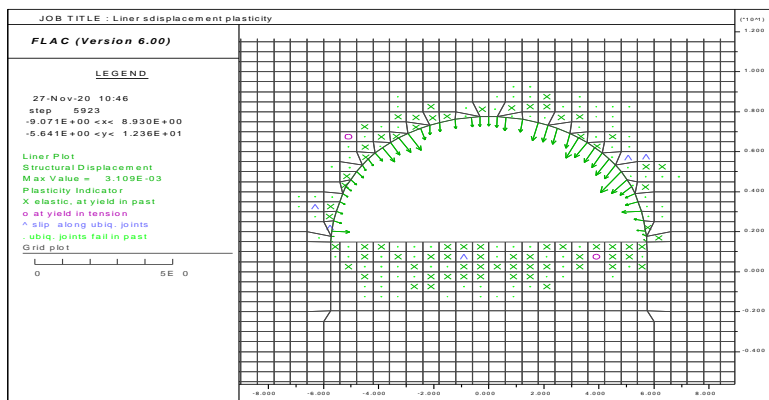
Εικόνα 272. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση των ασυνεχειών (μπλε). Το 40% των ζωνών της περιέχει άρρηκτο πέτρωμα που διαρρέει (μωβ).



Εικόνα 273. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

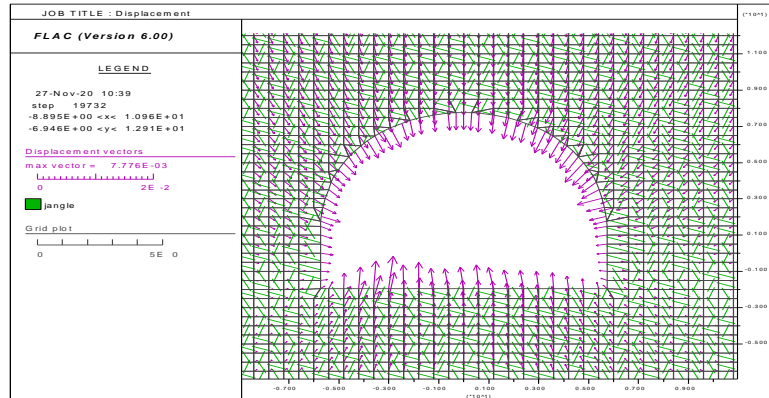
Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής δύναμης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνες που διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα. Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στο σκυρόδεμα επηρεάζεται έντονα τοπικά από την ολίσθηση των ασυνεχειών και την αστοχία του άρρηκτου πετρώματος.



Εικόνα 274. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

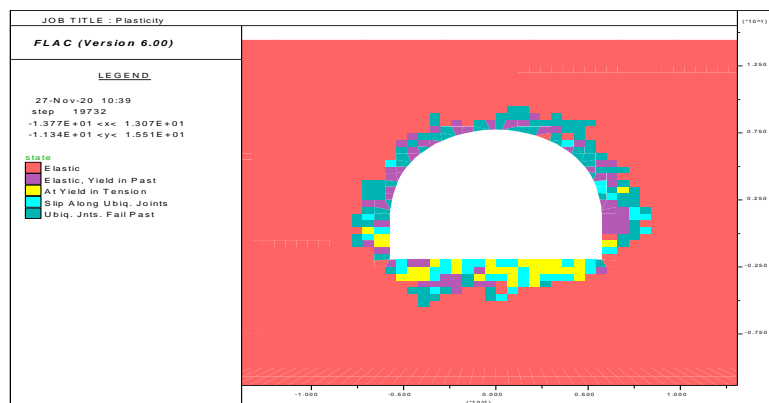
Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα ασκείται στη δεξιά πλευρά της ημιδιατομής. Σ' αυτή τη περιοχή η διαρροή εκδηλώνεται με εναλλαγή ζωνών που διαρρέει το άρρηκτο και με ζώνες που ολισθαίνουν ασυνέχειες όπως φαίνεται στην εικόνα.

5.2.3.5.2 5^η φάση προσομοίωσης



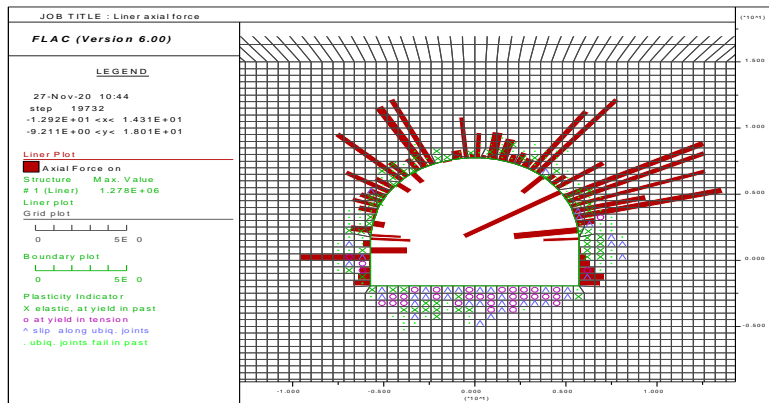
Εικόνα 275. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Στο όριο εκσκαφής τα διανύσματα της μετατόπισης στην ημιδιατομή έχουν κατεύθυνση προς το κέντρο της ενώ στη βαθμίδα έχουν κατεύθυνση σχεδόν παράλληλη στη τρίτη οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 115°. Στο δεξίο τμήμα της βάσης της βαθμίδας παρατηρείται και το μεγαλύτερο μέτρο μετατόπισης στο σκυρόδεμα.



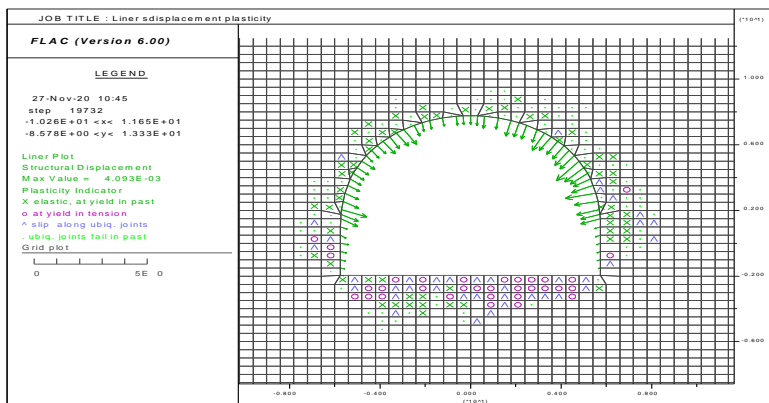
Εικόνα 276. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση των ασυνεχειών (μπλε) και εκείνη της βαθμίδας οφείλεται κυρίως στην εφελκυστική αστοχία του άρρηκτου (κίτρινο). Η εικόνα της διαρροής δείχνει μία σχεδόν ισότροπη αστοχίας περιμετρικά της διατομής.



Εικόνα 277. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνες που διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα.

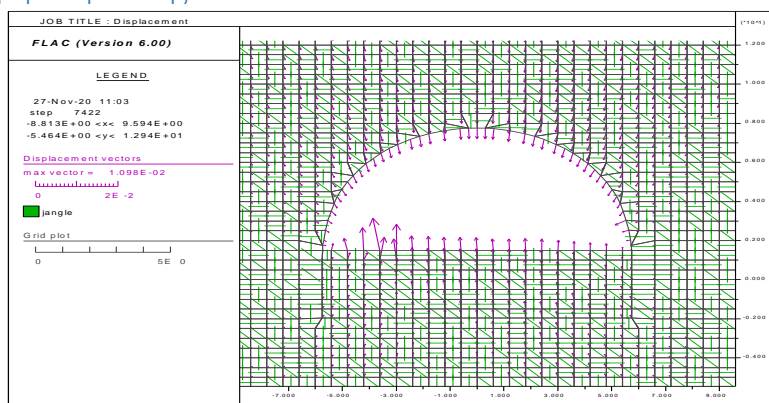


Εικόνα 278. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στο δεξιό τμήμα της ημιδιατομής με κατεύθυνση παράλληλη στην πρώτη οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 70°. Επίσης στην βαθμίδα δεν εντοπίζονται μεγάλες τιμές μετατόπισης.

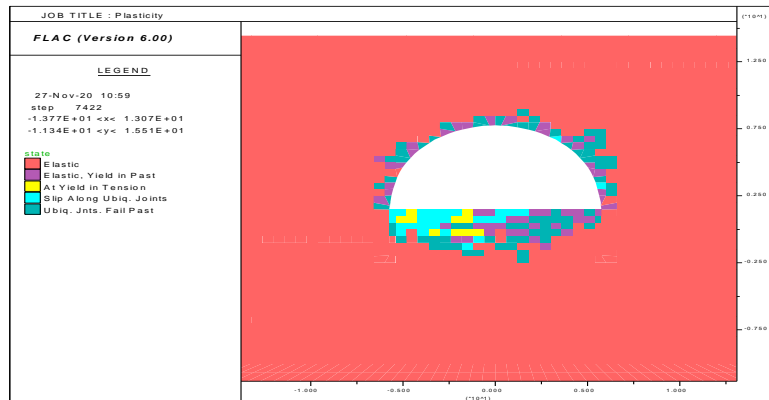
5.2.3.6 Γωνία κλίσης 90°-180°-135°

5.2.3.6.1 3^η φάση προσομοίωσης



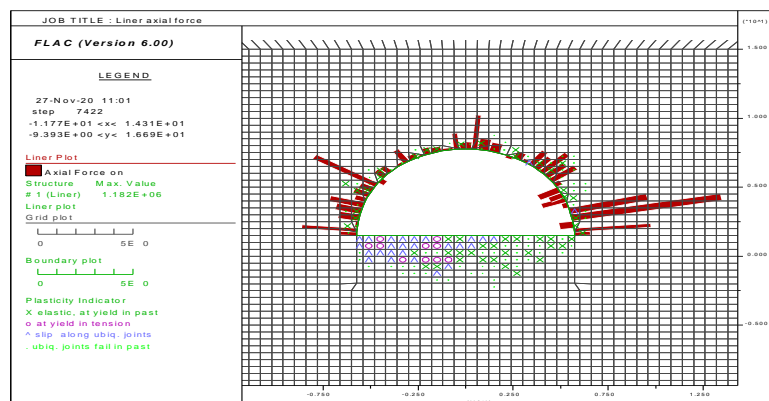
Εικόνα 279. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Στο όριο εκσκαφής οι μετακινήσεις στο θόλο σχηματίζουν τόξο κλίνοντας στο κέντρο και της βαθμίδας είναι παράλληλες στην 1^η οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 90°, με εξαίρεση ένα διάνυσμα με μεγάλη τιμή μετατόπισης που είναι παράλληλο στη 3^η οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 135°. Τα περισσότερα διανύσματα μετατόπισης βραχόμαζας στη περιοχή κάτω από τη βαθμίδα έχουν τη κατεύθυνση της 1^{ης} οικογένειας και του θόλου είναι παράλληλα στη 3^η με κλίση 135°.



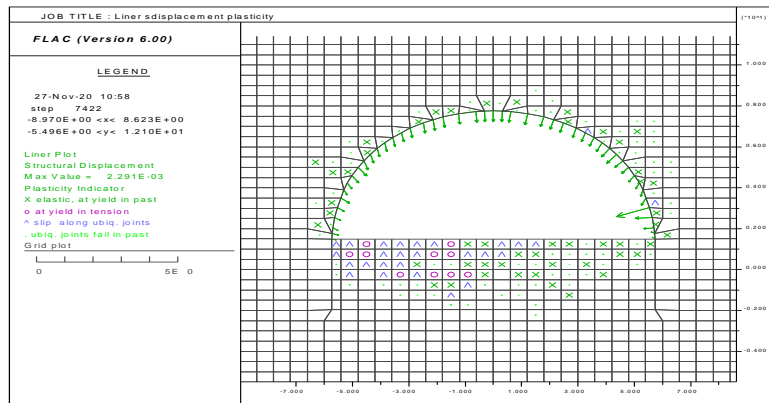
Εικόνα 280. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη που εκτείνεται στην ημιδιατομή έχει μικρό μήκος σε σχέση με την βαθμίδα. Η διαρροή οφείλεται κυρίως στην ολίσθηση των ασυνεχειών (μπλε) και λιγότερο στην αστοχία του άρρηκτου (μωβ).



Εικόνα 281. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

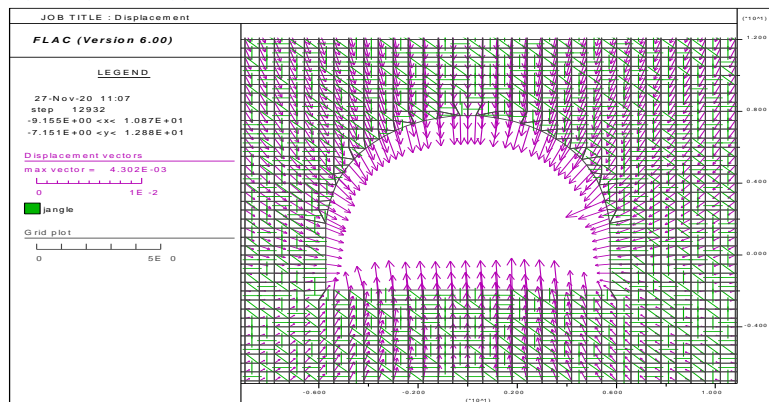
Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνες που διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα. Η μέγιστη τάση έχει κατεύθυνση κάθετη στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών που έχει κλίση 115°.



Εικόνα 282. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

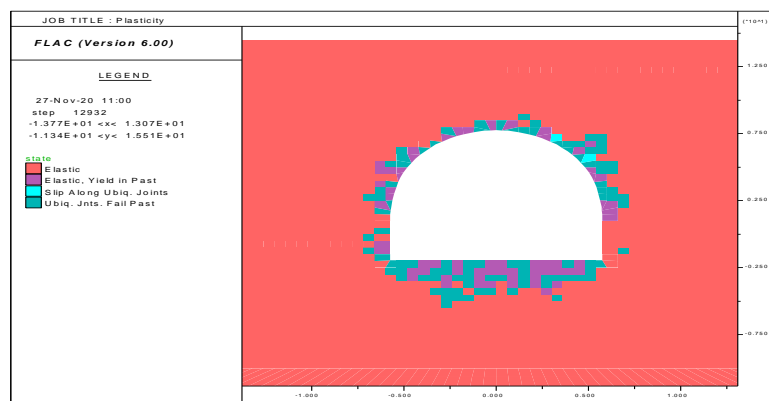
Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στο δεξιό τμήμα της ημιδιατομής με κατεύθυνση κάθετη στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 135°.

5.2.3.6.2 5^η φάση προσομοίωσης



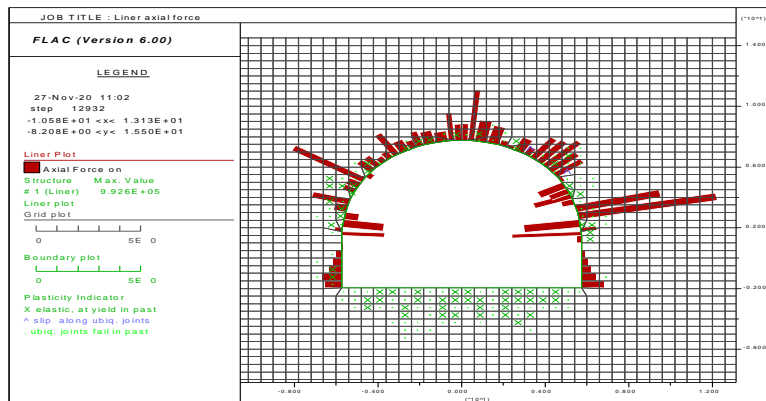
Εικόνα 283. Διανύσματα μετατοπίσεων βραχομάζας

Στο όριο εκσκαφής οι μετακινήσεις στο θόλο σχηματίζουν τόξο κλίνοντας στο κέντρο και της βαθμίδας είναι παράλληλες στην 1^η οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 90° με μέγιστη μετατόπιση στην επαφή βαθμίδας και ημιδιατομής. Τα περισσότερα διανύσματα μετατόπισης βραχομάζας στη περιοχή κάτω από τη βαθμίδα έχουν τη κατεύθυνση της 3^{ης} οικογένειας ασυνεχειών δηλαδή κλίσης 135° από τη δεξιά πλευρά και κάθετη σ' αυτήν από την αριστερή.



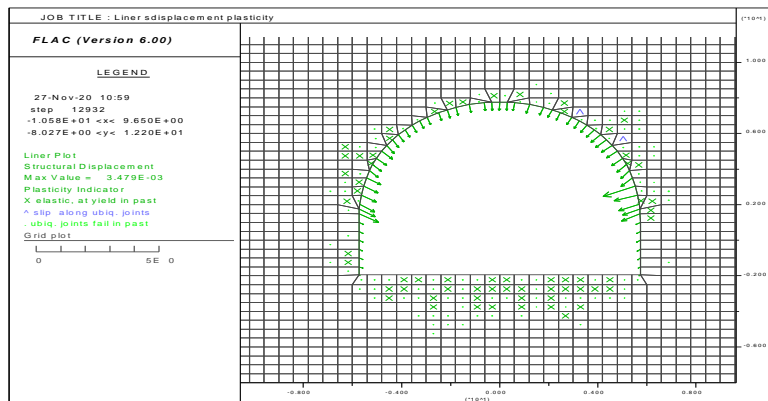
Εικόνα 284. Πλαστικοποίηση ζωνών μοντέλου

Η πλαστική ζώνη έχει μεγαλύτερο μήκος στην ημιδιατομή παρά στην βαθμίδα με επίδραση στις ολίσθησης ασυνεχειών κυρίως στη διαρροή.



Εικόνα 285. Κατανομή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα

Παρατηρείται υψηλή τιμή αξονικής τάσης στο σκυρόδεμα στην δεξιά πλευρά της ημιδιατομής σε ζώνες που διαρρέει το άρρηκτο πέτρωμα. Η μέγιστη τάση έχει κατεύθυνση κάθετη στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών που έχει κλίση 115°.



Εικόνα 286. Διανύσματα μετατοπίσεων στο σκυρόδεμα

Η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στο δεξιό τμήμα της ημιδιατομής με κατεύθυνση κάθετη στην τρίτη οικογένεια ασυνεχειών κλίσης 135°.

Στους επόμενους πίνακες και στα αντίστοιχα διαγράμματα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων αναφορικά με το βάθος της πλαστικής ζώνης περίξ της διατομής, τη μέγιστη αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα και τις μετατοπίσεις της επένδυσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Πίνακας 13. Πλαστική ζώνη από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY

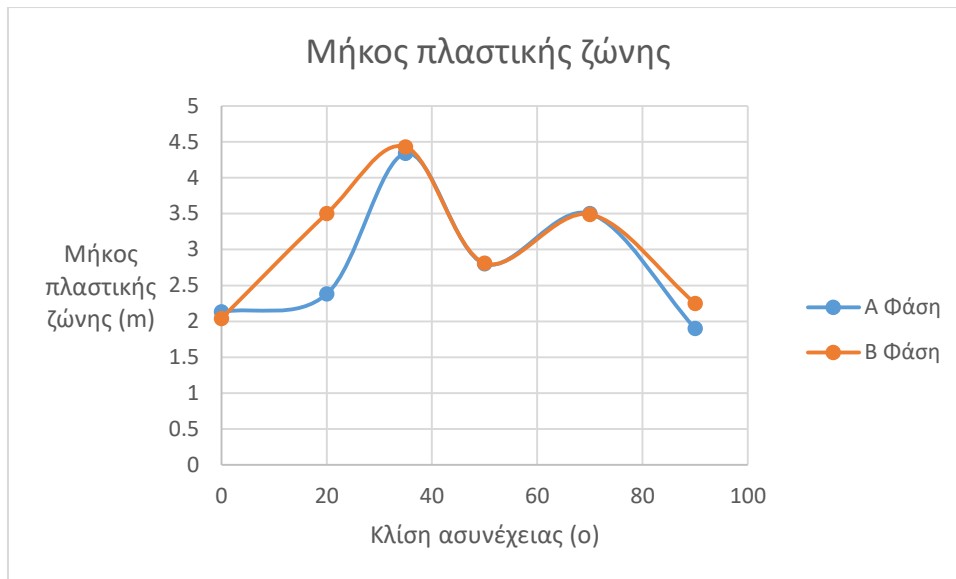
Μοντέλο	Μήκος πλαστικής ζώνης στο θόλο (m)	
	Α Φάση	Β Φάση
0° - Blocky	2.13	2.04
20° - Blocky	2.38	3.50
35° - Blocky	4.34	4.43
50° - Blocky	2.80	2.81
70° - Blocky	3.5	3.49
90° - Blocky	1.90	2.25

Πίνακας 14. Αξονική τάση από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY

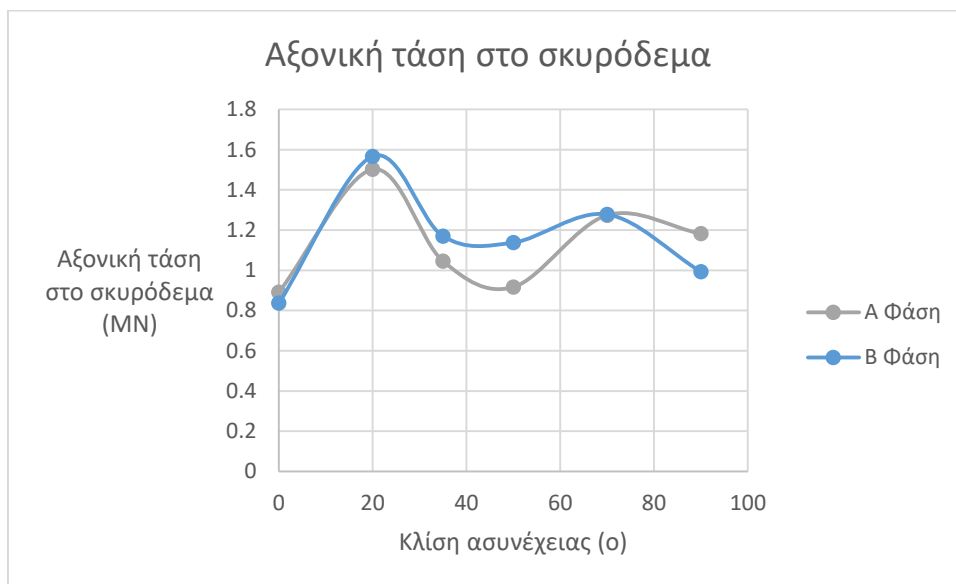
Μοντέλο	Αξονική τάση στο σκυρόδεμα (MN)	
	Α Φάση	Β Φάση
0° - Blocky	0.8913	0.8367
20° - Blocky	1.502	1.567
35° - Blocky	1.046	1.17
50° - Blocky	0.9169	1.138
70° - Blocky	1.274	1.278
90° - Blocky	1.182	0.9926

Πίνακας 15. Μετατόπιση στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY

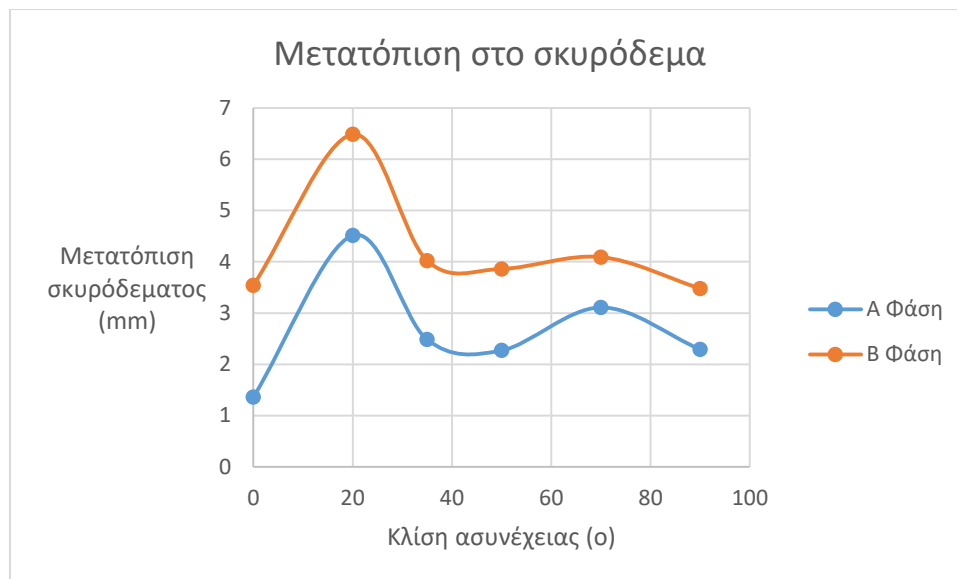
Μοντέλο	Μετατόπιση στο σκυρόδεμα (mm)	
	Α Φάση	Β Φάση
0° - Blocky	1.36	3.543
20° - Blocky	4.513	6.486
35° - Blocky	2.483	4.023
50° - Blocky	2.27	3.861
70° - Blocky	3.109	4.093
90° - Blocky	2.291	3.479



Εικόνα 287. Διάγραμμα πλαστικής ζώνη από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY



Εικόνα 288. Διάγραμμα αξονικής τάσης από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY



Εικόνα 289. Διάγραμμα μετατόπισης στο σκυρόδεμα από την προσομοίωση μοντέλου BLOCKY

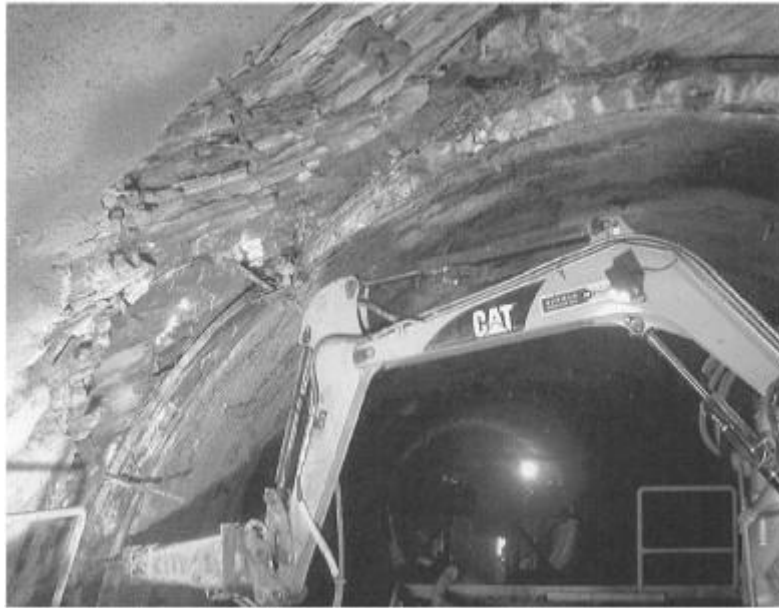
5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.3.1 Προσομοίωση με θεώρηση της βραχομάζας ως ισοδύναμο συνεχές μέσο

- Το μοντέλο MC θα αποτελέσει το μοντέλο αναφοράς για σύγκριση με τα επόμενα.
- Καθώς μεταβαίνουμε από το στάδιο εκσκαφής και υποστήριξης της άνω ημιδιατομής (Α Φάση) σ' αυτό της βαθμίδας (Β Φάση) αυξάνει το μήκος της πλαστικής ζώνης στην περιοχή του θόλου.
- Η μέγιστη αξονική δύναμη στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της Α φάσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αξονική δύναμη μετά την εκσκαφή της Β φάσης. Ταυτόχρονα όμως μέρος της αξονικής δύναμης της Α φάσης αναλαμβάνεται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της βαθμίδας.
- Οι μετατοπίσεις στο σκυρόδεμα είναι υπερδιπλάσιες στο τέλος της πέμπτης φάσης από αυτές της τρίτης.

5.3.2 Προσομοίωση σήραγγας με μία οικογένεια εμμενουσών ασυνεχειών

- Από την απεικόνιση των διανυσμάτων μετατοπίσεων της βραχομάζας προκύπτει ότι με την παρουσία της μίας οικογένειας εμμενουσών ασυνεχειών στο αριθμητικό μοντέλο, μέσω του καταστατικού μοντέλου ubiquitous joint, αναπτύσσεται μη συμμετρικό πεδίο μετατόπισης γύρω από τη σήραγγα. Επιπλέον, οι μετατοπίσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο όριο της εκσκαφής, καθώς επηρεάζονται από την παρουσία των ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις στο θόλο της άνω ημιδιατομής αυξάνονται στην περιοχή που οι ασυνέχειες εφάπτονται στο σύνορο της εκσκαφής, ενώ τα διανύσματα της μέγιστης μετατόπισης τείνουν να έχουν διεύθυνση κάθετα στο επίπεδο των ασυνεχειών. Το αποτέλεσμα αυτό συμβαδίζει με τις παρατηρήσεις κατά τη διάνοιξη σηράγγων, καθώς συχνά εμφανίζεται μη συμμετρική.



Εικόνα 290. Ασύμμετρη παραμόρφωση σε σήραγγα σε στρωσιγενή ασβεστόλιθο (Fortsakis et al. 2012)

- Τόσο στην Α όσο και στη Β φάση εκσκαφής η διαρροή εκδηλώνεται κυρίως με ολίσθηση των ασυνεχειών. Το βάθος της ολίσθησης των ασυνεχειών εντός της βραχομάζας αυξάνει στις περιοχές όπου τα επίπεδα των ασυνεχειών εφάπτονται στο όριο της εκσκαφής. Το μέγιστο βάθος της περιοχής ολίσθησης παρατηρείται για γωνίες κλίσεις 20° έως 50° και μειώνεται για γωνίες κλίσης 70° και 90° . Για ασυνέχειες κλίσης 0° η ολίσθηση παρατηρείται στην περιοχή της στέψης, ενώ για γωνία κλίσης 90° στις παρειές της βαθμίδας, παραπέμποντας σε λυγισμό των κατακόρυφων στρωμάτων. Για γωνίες κλίσης 20° - 70° το μέγιστο βάθος ολίσθησης εμφανίζεται στην αριστερή πλευρά της άνω ημιδιατομής. Η διαρροή επηρεάζεται μερικώς από την αστοχία της απομένουσας βραχομάζας η οποία εμπλέκεται στην αστοχία για γωνίες 20° - 70° και ειδικά στις 20° και 70° διαρρέει και εφελκυστικά.
- Η αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα έχει σε κάθε μοντέλο υψηλότερη τιμή στη Β φάση συγκριτικά με την Α. Στη Α φάση οι τιμές αξονικής δύναμης είναι παρόμοιες για γωνία κλίσης ασυνέχειας 50° - 90° . Στην Α φάση η μέγιστη αξονική δύναμη ασκείται για γωνία κλίσης ασυνέχειας στο άνω μέρος της ημιδιατομής. Για γωνία 20° - 70° η μέγιστη αξονική δύναμη παρατηρείται αριστερά της ημιδιατομής και για ασυνέχεια 90° στην επαφή της βάσης της ημιδιατομής και βαθμίδας πριν γίνει εκσκαφή σ' αυτήν. Στη Β φάση η αξονική δύναμη εντοπίζεται για γωνία κλίσης ασυνέχειας 0° στην οροφή και για γωνία 20° - 35° αριστερά της ημιδιατομής. Για γωνία 50° - 70° αναπτύσσεται αξονική δύναμη όχι μόνο δεξιά αλλά και αριστερά της ημιδιατομής και ειδικά στην βαθμίδα. Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές της αξονικής δύναμης είναι τοπικά σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ισότροπου μοντέλου με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.
- Η μετατόπιση στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει υψηλότερη τιμή στη Β φάση συγκριτικά με την Α. Στην Α φάση οι τιμές αυξάνουν για γωνία κλίσης ασυνέχειας 0° - 35° και μειώνονται για γωνία 50° - 90° . Στη Β φάση η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στην επαφή ημιδιατομής και βαθμίδας για γωνίες κλίσης

ασυνέχειας 0° - 50° και 90° . Στις 70° η μετατόπιση συμβαίνει έντονα στην αριστερή πλευρά της βαθμίδας.

5.3.3 Προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας Blocky

Είναι γενικά αποδεκτό ότι χωρική κατανομή των επιπέδων ασυνέχειας δε μία διακλασμένη βραχομάζα καθορίζει τη μηχανική της συμπεριφορά κατά την εκσκαφή. Επακριβής αναπαράσταση της χωρικής κατανομής των ασυνεχειών στη βραχομάζα είναι δυνατή μόνο με κώδικες ασυνεχούς μέσου όπως για παράδειγμα οι κώδικες UDEC και 3DEC της Itasca σε δύο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα. Εν τούτοις, αυτοί οι κώδικες έχουν αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και απαιτούν να είναι γνωστά δεδομένα εισαγωγής που δύσκολα μπορούν να αποκτηθούν, όπως για παράδειγμα η ορθή και διατμητική δυστροπία των ασυνεχειών.

Η αναπαράσταση της δομής της βραχομάζας με ένα κώδικα συνεχούς μέσου είναι πρακτικά αδύνατη. Μία προσέγγιση, που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, είναι οι ασυνέχειες της βραχομάζας να ενσωματωθούν στις ζώνες πεπερασμένων διαφορών με τη μορφή ενός καταστατικού μοντέλου, που θα διακρίνει εάν για το συγκεκριμένο προσανατολισμό της ενσωματωμένης στη ζώνη ασυνέχειας, σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό και το μέγεθος του εντατικού πεδίου, θα ολισθήσει η ασυνέχεια ή εάν θα αστοχήσει το άρρηκτο πέτρωμα. Προφανώς η μεθοδολογία αυτή συνιστά μία προσεγγιστική αναπαράσταση της δομής της βραχομάζας, και σε αυτό το πλαίσιο αξιολογούνται και τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων αυτής της ενότητας.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι, η διαρροή της βραχομάζας περίξ του ανοίγματος, επηρεάζεται από τον τοπικό προσανατολισμό των ασυνεχειών ο οποίος καθορίζει εάν θα συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια, αστοχία άρρηκτου πετρώματος ή και τα δύο. Όπως φαίνεται και από την κατανομή των ασυνεχειών στο μοντέλο, κυριαρχεί η τυχαιότητα του προσανατολισμού τους (με εξαιρέσεις όπως αναφέρθηκε νωρίτερα), παράγοντας ένα σχετικά ομοιόμορφα δομημένο μοντέλο. Έτσι, στα περισσότερα μοντέλα η ζώνη διαρροής (πλαστική ζώνη) είναι σχετικά ομοιόμορφη γύρω από τη σήραγγα, ενώ μπορεί να εκτείνεται τοπικά βαθύτερα λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών. Τα ποσοστά συμμετοχής της αστοχίας του άρρηκτου υλικού στη διαρροή ποικίλουν μεταξύ των διαφόρων μοντέλων. Σημαντικό στοιχείο θεωρείται ότι εμφανίζονται και εφελκυστικές αστοχίες άρρηκτου πετρώματος, οι οποίες δεν εμφανίζονται στην αντίστοιχη προσομοίωση με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Παρά τη σχετικά ομοιόμορφη διαρροή γύρω από τη σήραγγα, η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία και φαίνεται να καθορίζεται από τον τοπικό προσανατολισμό της ασυνέχειας στην γειτονική ζώνη καθώς και από τον τρόπο αστοχίας της ζώνης. Οι τοπικές τιμές των αξονικών δυνάμεων που προκύπτουν είναι κατά πολύ μεγαλύτερες (έως και περίπου τριπλάσιες) από την αντίστοιχη μέγιστη αξονική δύναμη που προκύπτει στο μοντέλο με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Το πεδίο των μετατοπίσεων γύρω από το άνοιγμα παρουσιάζεται σχετικά συμμετρικό, με τοπικές εξαιρέσεις που καθορίζονται από τον τοπικό προσανατολισμό των ασυνεχειών. Αναφορικά με τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε για την επίλυση των αριθμητικών μοντέλων διακλασμένης βραχομάζας σημειώνεται ότι ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε για την επίλυση του μοντέλου ισότροπης βραχομάζας με το κριτήριο Mohr-Coulomb.

Θα μπορούσε συμπερασματικά να ειπωθεί ότι, η χρησιμοποιούμενη προσέγγιση δίνει αποτελέσματα ενδιάμεσα από τις προσεγγίσεις συνεχούς και ασυνεχούς μέσου, με ορισμένες ενδείξεις κινηματικού τύπου αστοχιών εάν αυτές θεωρηθεί ότι συνδέονται με τοπικά αυξημένες τιμές των μετατοπίσεων της βραχομάζας. Εντούτοις, ο μηχανισμός αστοχίας είναι πολύπλοκος και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση πριν από την εφαρμογή αυτής της προσέγγισης στην πράξη.

6 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε ανισότροπη διακλασμένη βραχομάζα με αριθμητικές προσομοιώσεις πεπερασμένων διαφορών με τον κώδικα FLAC 2D. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αναλυτική επίλυση προσδιορισμού της αντοχής της βραχομάζας με ασυνέχειες, με βάση τη θεωρία του μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας, καθώς και με τις εμπειρικές εκτιμήσεις με βάση τη γεωτεχνική ταξινόμηση GSI και το κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.

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:

Συνολικά προετοιμάστηκαν και επιλύθηκαν οι παρακάτω σειρές αριθμητικών μοντέλων:

- 1^η Σειρά (UJ1-coarse): προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας με δύο οικογένειες ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους. Το αριθμητικό μοντέλο έχει αραιό κάναβο ζωνών πεπερασμένων διαφορών. Σε όλες τις ζώνες του αριθμητικού μοντέλου καθορίζεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιλύονται δέκα (10) μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών (από 0° έως 90° για την 1^η οικογένεια ασυνεχειών) και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη θεωρητική λύση με βάση το συνδυασμό μεμονωμένων επιπέδων αδυναμίας.
- 2^η Σειρά (UJ1-fine): Ομοίως με προηγούμενη σειρά σε πυκνό κάναβο για τη διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας του κανάβου στην τιμή της υπολογιζόμενης αριθμητικά αντοχής.
- 3^η Σειρά (UJ2-non-persistent): προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας με μία οικογένεια μη εμμενουσών (non-persistent) ασυνεχειών. Στις ζώνες του αριθμητικού μοντέλου ανατίθεται εναλλάξ το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint, με ασυνέχεια συγκεκριμένης γωνίας κλίσης, με το καταστατικό μοντέλο ισότροπου πετρώματος Mohr-Coulomb. Διερευνάται έτσι η δυνατότητα του αριθμητικού μοντέλου να προσομοιώσει την επίδραση της παρουσίας γεφυρών άρρηκτου πετρώματος μεταξύ των ασυνεχειών. Επιλύονται δέκα (10) αριθμητικά μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις μη εμμενουσών ασυνεχειών (από 0° έως 90°) και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη θεωρητική λύση μεμονωμένου επιπέδου αδυναμίας με παρουσία γεφυρών άρρηκτου πετρώματος.

- 4^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse): προσομοίωση τριαξονικής θλίψης βραχομάζας της κατηγορίας Blocky του διαγράμματος του γεωλογικού δείκτη αντοχής GSI. Η βραχομάζα έχει τρεις οικογένειες ασυνεχειών, εκ των οποίων οι δύο είναι κάθετες μεταξύ τους. Η τρίτη οικογένεια ασυνεχειών, η οποία στην σχετική περιγραφή της δομής βραχομάζας κατά την ταξινόμηση GSI θεωρείται ότι έχει παράταξη παράλληλη με το επίπεδο, μεταφέρεται στην αριθμητική προσομοίωση στο επίπεδο με ενδιάμεση των άλλων δύο οικογενειών ασυνεχειών κλίση. Σε όλες τις ζώνες τις ζώνες του μοντέλου ανατίθεται καταστατικό μοντέλο Ubiquitous joint με τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επιλύονται δέκα (10) αριθμητικά μοντέλα με διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών (από 0ο έως 90ο για την 1η οικογένεια ασυνεχειών) και η αντοχή του αριθμητικού μοντέλου συγκρίνεται με την αντοχή που προκύπτει από το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας Hoek-Brown.
- 5^η Σειρά (UJ3-Blocky-coarse):): Ομοίως με προηγούμενη σειρά σε πυκνό κάναβο για τη διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας του κανάβου στην τιμή της υπολογιζόμενης αριθμητικά αντοχής.

Προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Από τη 3^η Σειρά- προσομοίωση μη εμμενουσών ασυνεχειών παρατηρήθηκε ότι η αναλυτική λύση υπολογίζει χαμηλότερες τιμές αντοχής από την αριθμητική επίλυση. Η διαφορά αυτή μπορεί τουλάχιστον μερικώς να αποδοθεί στις διαφορές του συντελεστή w , που θεωρείται για την εφαρμογή της αναλυτικής λύσης ($w=0.5$), και της γεωμετρικής σχέσης του μήκους που καταλαμβάνουν οι ζώνες ασυνεχειών με τις ζώνες που αντιπροσωπεύουν το άρρηκτο πέτρωμα στο μοντέλο του κώδικα FLAC. Παρατηρείται επίσης ότι η αριθμητική λύση αποκλίνει από την αναλυτική στα μοντέλα με μια οικογένεια μη εμμενουσών ασυνεχειών για γωνία κλίσης 40° και 50°. Η αντοχή από το FLAC είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε θεωρητικά. Εντούτοις, η αριθμητική και η αναλυτική λύση δίνουν κοντινά αποτελέσματα, τουλάχιστον στην περιοχή γωνιών κλίσης των ασυνεχειών για τις οποίες προκύπτει η χαμηλότερη αντοχή του αριθμητικού δοκιμίου. Οπότε προκύπτει ότι η αριθμητική προσομοίωση μίας οικογένειας μη εμμενουσών ασυνεχειών με το καταστατικό μοντέλο Ubiquitous Joint συγκρίνεται ικανοποιητικά με την αναλυτική λύση.
- Από την 1^η και 2^η Σειρά- Προσομοίωση δύο οικογενειών ασυνεχειών κάθετων μεταξύ τους προέκυψε ανισοτροπία τόσο από την αναλυτική επίλυση με τη θεωρία μεμονωμένων επιπέδων αδυναμίας όσο και με την αριθμητική. Η αντοχή του ρωγματομένου δοκιμίου μεταβάλλεται με τη μεταβολή της γωνίας κλίσης του πρώτου επιπέδου αδυναμίας. Επίσης, προκύπτει ότι δεν υπάρχει διαφορά στα αποτελέσματα μεταξύ των μοντέλων με αραιό και πυκνό κάναβο. Από τη σύγκριση της αναλυτικής λύσης με τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτει καλή συσχέτιση των τιμών αντοχής για περιοχές γωνιών κλίσης του 1^{ου} επιπέδου ασυνέχειας 30° έως 60° και ιδιαίτερα στην περιοχή γωνιών που το ρωγματομένο δοκίμιο παρουσιάζει την ελάχιστη αντοχή. Για αυτές τις γωνίες κλίσεις, όπως προκύπτει από την εικόνα της διαρροής των μοντέλων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί κυρίως με ολίσθηση στα επίπεδα των ασυνεχειών, που συνάδει με τις προβλέψεις της αναλυτικής λύσης.

- Από την σύγκριση των δύο πρώτων σειρών με την Τρίτη: Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκλίνουν για τιμές της γωνίας κλίσης εκτός των περιοχών που αναφέρθηκαν παραπάνω, και ειδικότερα για γωνίες κλίσης 10° , 20° , 70° , 80° . Όπως προκύπτει από την εικόνα της διαρροής των μοντέλων, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί με σημαντική συμμετοχή της διαρροής του άρρηκτου πετρώματος, καθώς τα πιθανά επίπεδα ολίσθησης κατά μήκος των ασυνεχειών διακόπτονται από την παρουσία ζωνών με διαφορετικής κλίσης ασυνέχειες. Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας δεν λαμβάνεται υπόψη από τη θεωρία του μεμονωμένου αδυναμίας, εκτός και εάν οι ασυνέχειες θεωρηθούν μη εμμένουσες και ληφθούν υπόψη οι γέφυρες άρρηκτου πετρώματος. Οι γέφυρες άρρηκτου πετρώματος μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω του συντελεστή w , που εκφράζει το λόγο του μήκους των ιχνών των ασυνεχειών προς το μήκος των γεφυρών άρρηκτου πετρώματος επάνω στο εξεταζόμενο επίπεδο ολίσθησης. Όπως παρατηρείται από αυτό, οι αριθμητικά υπολογιζόμενες τιμές της αντοχής συμπίπτουν με τις αναλυτικά υπολογιζόμενες για μη εμμένουσες ασυνέχειες με συντελεστή $w=0.5$. Συνάγεται συνεπώς το συμπέρασμα ότι η προσομοίωση με το μοντέλο ubiquitous joint έχει τη δυνατότητα να αναπαραστήσει ικανοποιητικά τη μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας με δύο κάθετες μεταξύ τους οικογένειες ασυνεχειών, καθώς και να αποδώσει την ανισοτροπία της βραχομάζας.
- Από την 4^η Σειρά: Blocky προκύπτει ότι η βραχομάζα έχει ανισότροπη συμπεριφορά, με ελάχιστη τιμή αντοχής για γωνίες κλίσεις 40° - 50° . και μέγιστη τιμή για γωνίες 0° και 90° . Από την εφαρμογή του κριτηρίου Hoek-Brown, για ισότροπη βραχομάζα δομής “BLOCKY” και κατάστασης επιφάνειας ασυνεχειών “FAIR”, με εκτιμώμενη τιμή $GSI=55$ παρατηρείται ότι η αντοχή που προκύπτει αποτελεί χονδρικά ένα μέσο όρο της αντοχής των αριθμητικών μοντέλων. Συνάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι, η αριθμητική προσομοίωση δίνει τιμές αντοχής συμβατές με την αντοχή που προκύπτει από τις εμπειρικές εκτιμήσεις.
- Τέλος, εφαρμόστηκε το μοντέλο UJ για τη μελέτη της συμπεριφοράς βραχομάζας κατά τη διάνοιξη πραγματικής σήραγγας της Αγίας Κυριακής. Από την απεικόνιση των διανυσμάτων μετατοπίσεων της βραχομάζας προκύπτει ότι με την παρουσία της μίας οικογένειας εμμενουσών ασυνεχειών στο αριθμητικό μοντέλο, μέσω του καταστατικού μοντέλου ubiquitous joint, αναπτύσσεται μη συμμετρικό πεδίο μετατόπισης γύρω από τη σήραγγα. Επιπλέον, οι μετατοπίσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο όριο της εκσκαφής, καθώς επηρεάζονται από την παρουσία των ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, οι μετατοπίσεις στο θόλο της άνω ημιδιατομής αυξάνονται στην περιοχή που οι ασυνέχειες εφάπτονται στο σύνορο της εκσκαφής, ενώ τα διανύσματα της μέγιστης μετατόπισης τείνουν να έχουν διεύθυνση κάθετα στο επίπεδο των ασυνεχειών. Το αποτέλεσμα αυτό συμβαδίζει με τις παρατηρήσεις κατά τη διάνοιξη σήραγγων, καθώς συχνά εμφανίζεται μη συμμετρική. Τόσο στην Α όσο και στη Β φάση εκσκαφής η διαρροή εκδηλώνεται κυρίως με ολίσθηση των ασυνεχειών. Το βάθος της ολίσθησης των ασυνεχειών εντός της βραχομάζας αυξάνει στις περιοχές όπου τα επίπεδα των ασυνεχειών εφάπτονται στο όριο της εκσκαφής. Το μέγιστο βάθος της περιοχής ολίσθησης παρατηρείται για γωνίες κλίσεις 20° έως 50° και μειώνεται για γωνίες κλίσης 70° και 90° . Για ασυνέχειες κλίσης 0° η ολίσθηση παρατηρείται στην περιοχή της στέψης, ενώ για γωνία κλίσης 90° στις παρειές της βαθμίδας, παραπέμποντας σε λυγισμό των κατακόρυφων στρωμάτων. Για γωνίες

κλίσης 20° - 70° το μέγιστο βάθος ολίσθησης εμφανίζεται στην αριστερή πλευρά της άνω ημιδιατομής. Η διαρροή επηρεάζεται μερικώς από την αστοχία της απομένουσας βραχομάζας η οποία εμπλέκεται στην αστοχία για γωνίες 20° - 70° και ειδικά στις 20° και 70° διαρρέει και εφελκυστικά. Η αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα έχει σε κάθε μοντέλο υψηλότερη τιμή στη Β φάση συγκριτικά με την Α. Στη Α φάση οι τιμές αξονικής δύναμης είναι παρόμοιες για γωνία κλίσης ασυνέχειας 50° - 90° . Στην Α φάση η μέγιστη αξονική δύναμη ασκείται για γωνία κλίσης ασυνέχειας στο άνω μέρος της ημιδιατομής. Για γωνία 20° - 70° η μέγιστη αξονική δύναμη παρατηρείται αριστερά της ημιδιατομής και για ασυνέχεια 90° στην επαφή της βάσης της ημιδιατομής και βαθμίδας πριν γίνει εκσκαφή σ' αυτήν. Στη Β φάση η αξονική δύναμη εντοπίζεται για γωνία κλίσης ασυνέχειας 0° στην οροφή και για γωνία 20° - 35° αριστερά της ημιδιατομής. Για γωνία 50° - 70° αναπτύσσεται αξονική δύναμη όχι μόνο δεξιά αλλά και αριστερά της ημιδιατομής και ειδικά στην βαθμίδα. Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές της αξονικής δύναμης είναι τοπικά σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ισότροπου μοντέλου με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Η μετατόπιση στο κέλυφος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει υψηλότερη τιμή στη Β φάση συγκριτικά με την Α. Στην Α φάση οι τιμές αυξάνουν για γωνία κλίσης ασυνέχειας 0° - 35° και μειώνονται για γωνία 50° - 90° . Στη Β φάση η μέγιστη μετατόπιση στο σκυρόδεμα παρατηρείται στην επαφή ημιδιατομής και βαθμίδας για γωνίες κλίσης ασυνέχειας 0° - 50° και 90° . Στις 70° η μετατόπιση συμβαίνει έντονα στην αριστερή πλευρά της βαθμίδας.

- Από την προσομοίωση με θεώρηση βραχομάζας Blocky προέκυψε ότι η χωρική κατανομή των επιπέδων ασυνέχειας σε μία διακλασμένη βραχομάζα καθορίζει τη μηχανική της συμπεριφορά κατά την εκσκαφή. Επακριβής αναπαράσταση της χωρικής κατανομής των ασυνεχειών στη βραχομάζα είναι δυνατή μόνο με κώδικες ασυνεχούς μέσου όπως για παράδειγμα οι κώδικες UDEC και 3DEC της Itasca σε δύο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα. Εν τούτοις, αυτοί οι κώδικες έχουν αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και απαιτούν να είναι γνωστά δεδομένα εισαγωγής που δύσκολα μπορούν να αποκτηθούν, όπως για παράδειγμα η ορθή και διατμητική δυστροπία των ασυνεχειών. Η αναπαράσταση της δομής της βραχομάζας με ένα κώδικα συνεχούς μέσου είναι πρακτικά αδύνατη. Μία προσέγγιση, που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, είναι οι ασυνέχειες της βραχομάζας να ενσωματωθούν στις ζώνες πεπερασμένων διαφορών με τη μορφή ενός καταστατικού μοντέλου, που θα διακρίνει εάν για το συγκεκριμένο προσανατολισμό της ενσωματωμένης στη ζώνη ασυνέχειας, σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό και το μέγεθος του εντατικού πεδίου, θα ολισθήσει η ασυνέχεια ή εάν θα αστοχήσει το άρρηκτο πέτρωμα. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι, η διαρροή της βραχομάζας περίξ του ανοίγματος, επηρεάζεται από τον τοπικό προσανατολισμό των ασυνεχειών ο οποίος καθορίζει εάν θα συμβεί ολίσθηση στην ασυνέχεια, αστοχία άρρηκτου πετρώματος ή και τα δύο. Στα περισσότερα μοντέλα η ζώνη διαρροής (πλαστική ζώνη) είναι σχετικά ομοιόμορφη γύρω από τη σήραγγα, ενώ μπορεί να εκτείνεται τοπικά βαθύτερα λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών. Τα ποσοστά συμμετοχής της αστοχίας του άρρηκτου υλικού στη διαρροή ποικίλουν μεταξύ των διαφόρων μοντέλων. Σημαντικό στοιχείο θεωρείται ότι εμφανίζονται και εφελκυστικές αστοχίες άρρηκτου πετρώματος, οι οποίες δεν εμφανίζονται στην αντίστοιχη προσομοίωση με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Παρά τη σχετικά ομοιόμορφη διαρροή γύρω από τη σήραγγα, η κατανομή των αξονικών

δυνάμεων στην επένδυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία και φαίνεται να καθορίζεται από τον τοπικό προσανατολισμό της ασυνέχειας στην γειτονική ζώνη καθώς και από τον τρόπο αστοχίας της ζώνης. Οι τοπικές τιμές των αξονικών δυνάμεων που προκύπτουν είναι κατά πολύ μεγαλύτερες (έως και περίπου τριπλάσιες) από την αντίστοιχη μέγιστη αξονική δύναμη που προκύπτει στο μοντέλο με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Το πεδίο των μετατοπίσεων γύρω από το άνοιγμα παρουσιάζεται σχετικά συμμετρικό, με τοπικές εξαιρέσεις που καθορίζονται από τον τοπικό προσανατολισμό των ασυνεχειών και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε για την επίλυση των αριθμητικών μοντέλων διακλασμένης βραχομάζας ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε για την επίλυση του μοντέλου ισότροπης βραχομάζας με το κριτήριο Mohr-Coulomb.

- Συμπερασματικά η χρησιμοποιούμενη προσέγγιση δίνει αποτελέσματα ενδιάμεσα από τις προσεγγίσεις συνεχούς και ασυνεχούς μέσου, με ορισμένες ενδείξεις κινηματικού τύπου αστοχιών εάν αυτές θεωρηθεί ότι συνδέονται με τοπικά αυξημένες τιμές των μετατοπίσεων της βραχομάζας. Εντούτοις, ο μηχανισμός αστοχίας είναι πολύπλοκος και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση πριν από την εφαρμογή αυτής της προσέγγισης στην πράξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Lavoie, T. (2010) An analytical geomechanical upscaling approach for modeling jointed rock mass behaviour using ubiquitous joints. Master Thesis, University of British Columbia
2. Καλλέργης Γ., Κούκης Γ. (1985), Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις: Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα 1985
3. Α. Σοφινός, Π. Νομικός (2008). “Προχωρημένη Μηχανική των Πετρωμάτων”, Σημειώσεις διαλέξεων, ΕΜΠ – ΔΠΜΣ ΣΚΥΕ
4. Ντουνιάς Γ, Δέδε Β, Νταλής Δ, Μαντζιάρης Π. (2006). Μελέτη και Κατασκευή της Σήραγγας Αγίας Κυριακής στην Ε.Ο. Άρτας -Τρικάλων. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
5. Δασκάλου Ε.Μ. (2007). Διάνοιξη σήραγγας Αγ. Κυριακής. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ.
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>)
6. Itasca S.A. (2009). UDEC: Universal Distinct Elements Code, User’s Manual. Minneapolis, Minnesota 2009.
7. Itasca S.A. (2008). FLAC2D: Fast Lagrangian Analysis of Continua, User’s Manual. Minneapolis, Minnesota 2008.
8. 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
9. Kazakidis, V. N., & Diederichs, M. S. (1993). Understanding jointed rock mass behaviour using a ubiquitous joint approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 30(2), 163–172. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90709-M](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90709-M)
10. Li, G., Li, H., Kato, H., & Mizuta, Y. (2003). Application of ubiquitous joint model in numerical modeling of hilltop mines in Japan. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(6), 951–956.
11. Sainsbury, B., Pierce, M., & Mas Ivars, D. (2008). *Simulation of rock-mass strength anisotropy and scale effects using a Ubiquitous Joint Rock Mass (URJM) model*. August.
12. Wang, T. T., & Huang, T. H. (2009). A constitutive model for the deformation of a rock mass containing sets of ubiquitous joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.09.011>
13. Wittke, W. (2014). Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). In *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)* (Vol. 9783433030). <https://doi.org/10.1002/9783433604281>
14. Στόγια Μ.Ε. (2018). Αροθμητικός και αναλυτικός υπολογισμός της αντοχής ανισότροπης βραχομάζας. Διπλωματική εργασία. Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ.
15. Fortsakis P., Nikas K., Marinos V., Marinos P. (2012) *Anisotropic behaviour of stratified rock masses in tunnelling*, *Engineering Geology*, 141–142, pp 74-83, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.05.001>.

