#### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια ο ευρύτερος τομέας των υπόγειων έργων γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη τόσο στο διεθνή όσο και στον ελληνικό χώρο. Συγκεκριμένα ο τομέας της κατασκευής σηράγγων τείνει σιγά – σιγά να ενσωματωθεί σχεδόν σε κάθε μεγάλο πολιτικό έργο που αφορά σε μεγάλους αυτοκινητοδρόμους είτε των μεγάλων αστικών κέντρων είτε της σύνδεσης επαρχιακών πόλεων. Η λύση της υπόγειας διέλευσης μπορεί να προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων στη χάραξη των έργων όσο και στην πρακτικότητα εξοικονόμησης επιφανειακού χώρου.

Παρόλα αυτά η αβεβαιότητα του υπόγειου χώρου έγκεινται στον τεράστιο αριθμό των ξεχωριστών περιπτώσεων σε ότι αφορά τις συνθήκες που θα συναντηθούν κατά την κατασκευή. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στην κατασκευή σηράγγων επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στη μελέτη σχεδιασμού της διατομής και της υποστήριξης, ακόμα και στην χάραξη του έργου στο σύνολο του.

Το πρόβλημα της ανισοτροπίας μίας βραχομάζας αποτελεί ένα σύνηθες πρόβλημα στην κατασκευή σηράγγων. Η σωστή αξιολόγηση της κατάστασης δύναται να προβλέψει πιθανά προβλήματα συγκλίσεων και επιφόρτισης της υποστήριξης.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετάται η επίδραση του φαινομένου της ανισοτροπίας στην περίπτωση κατασκευής μίας σήραγγας. Δεδομένου της πολυπλοκότητας του προβλήματος αξιοποιήθηκαν υπολογιστικά λογισμικά προσομοίωσης της εκσκαφής σήραγγας, ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένη ανάλυση του προβλήματος της ανισοτροπίας.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σηράγγων στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων». Με αφορμή την ολοκλήρωσή της, εκφράζονται ειλικρινείς ευχαριστίες στον κ. Σοφιανό Αλέξανδρο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, καθώς επίσης και για τις ουσιαστικές συμβουλές του.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Νομικό Παύλο, Λέκτορα Ε.Μ.Π. για την συνεχή και υπομονετική καθοδήγηση του καθ' όλη της διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

i.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου που δημιούργησαν ένα ευχάριστο κλίμα συνεργασίας.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω προς όλους τους κοντινούς μου φίλους για την βοήθεια που μου προσέφεραν όποτε τη χρειάστηκα, ώστε να ολοκληρωθεί με τον καλύτερο τρόπο η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία.

Παπαβασιλείου Στέφανος

Αθήνα, Ιούλιος 2010

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xv
ПЕРІЛНѰН	1
ABSTRACT	5

ΜΕΡΟΣ Α: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
Κεφάλαιο 1. Περί Ανισοτροπίας των Πετρωμάτων	11
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Ανισοτροπία άρρηκτου πετρώματος	14
1.2.1 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά Ανισότροπου Πετρώματος	14
1.2.2 Σχέση Τάσεων – Παραμορφώσεων	17
1.3 Ανισοτροπία Βραχομάζας	22
1.3.1 Επίδραση μιας ασυνέχειας στις τάσεις και τις παραμορφώσει	ς πριν την
αστοχία	23
1.3.2 Παραμορφωσιμότητα Βραχομάζας	26

Κεφάλαιο 2. Κλειστές Λύσεις	
2.1 Ελαστικές Λύσεις για Ανισότροπο Πέτρωμα	35
2.1.1 Εισαγωγή	35
2.1.2 Η Λύση των Hefny & Lo (1999)	36
2.2 Ζώνες Ολίσθησης Ασυνεχειών Γύρω από τη Σήραγγα	39
2.2.1 Γεωμετρική λύση Goodman	39
2.2.2 Αναλυτική Λύση Daemen (1983)	40

MEPO	Σ Β: ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	47
Κεφάλ	αιο 3. Λογισμικό Προσομοίωσης	49
3.1	Εισαγωγή	49
3.2	Λογισμικό Προσομοίωσης FLAC 6.0	50
3.2	2.1 Γενική Περιγραφή Κατασκευής Μοντέλων Προσομοίωσης	51
3.2	2.2 Περιγραφή Μοντέλου Ubiquitous Joint	56
3.3	Περιγραφή Δομικών Στοιχείων Υποστήριξης	59
3.4	Σύγκριση Μοντέλων Προσομοίωσης με Θεωρία Goodman και Daemen.	61
3.5	Σύγκριση FLAC με Λογισμικό ABAQUS 6.9	68
3.5	5.1 Σύγκριση Μετατοπίσεων Μοντέλων Προσομοίωσης	69
MEPO	Σ Γ: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	73
Κεφάλ	αιο 4. Παραμετρικές Αναλύσεις	75
4.1	Εισαγωγή	75
4.2	Επίδραση της Συχνότητας των Ασυνεχειών Εγκάρσια Ισότροπου	
	Πετρώματος	75
4.3	Γενικές Πληροφορίες Κύριων Προσομοιωμάτων	76
4.4	Παράμετροι που Εξετάστηκαν στην Ανάλυση	77
4.5	Περιγραφή Τελικών Μοντέλων Προσομοίωσης	79
4.5	5.1 Παραμετρικές Αναλύσεις με Εσωτερική Πίεση	82
4.5	5.2 Παραμετρικές Αναλύσεις με Υποστήριξη (liner)	82
4.6	Αποτελέσματα Αναλύσεων	83
4.6	δ.1 Προσομοιώματα Επίδρασης Συχνότητας Ασυνεχειών	83
4.6	δ.2 Κύρια Προσομοιώματα χωρίς Υποστήριξη	87
4.6	δ.3 Κύρια Προσομοιώματα με Υποστήριξη (Liner)	96
4.7	Σχολιασμός Διαγραμμάτων Μοντέλων Προσομοίωσης	97
4.7	7.1 Μοντέλα Επίδρασης Συχνότητας των Ασυνεχειών	97

4.7.2 Κύρια Μοντέλα με Εσωτερική Πίεση	97
4.7.3 Μοντέλα με Υποστήριξη (liner)	98

Κεφάλαιο 5. Μελέτη Περίπτωσης: Σήραγγα Καλυδώνας	01
5.1 Εισαγωγή1	01
5.2 Γεωλογικά Στοιχεία Σήραγγας Καλυδώνας (Istria, 2009)1	01
5.2.1 Λιθοστρωματογραφία1	03
5.2.2 Τεκτονική1	05
5.2.3 Μικροτεκτονική1	07
5.2.4 Υδρογεωλογία1	80
5.2.5 Υπόγειο Τμήμα – Περιγραφή Γεωλογικών Συνθηκών1	11
5.2.6 Περιγραφή Ασυνεχειών – Ασυνέχειες σε Βάθος	13
5.2.7 Στόμια Σήραγγας1	16
5.2.8 Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά – Εκσκαψιμότητα Σχηματισμών 1	17
5.3 Γεωτεχνικά Στοιχεία Σήραγγας Καλυδώνας1	18
5.3.1 Αξιολόγηση Γεωτεχνικών Ενοτήτων (Istria, 2009)1	18
5.3.2 Συμπεριφορά της Βραχομάζας1	25
5.3.2.1 Αρχικό Εντατικό Πεδίο1	25
5.3.2.2 Συμπεριφορά της Βραχομάζας (Istria, 2009)1	27
5.3.3 Υδρογεωλογικές Συνθήκες (Istria, 2009)1	28
5.4 Ανάλυση Προσωρινής Υποστήριξης Σήραγγας Καλυδώνας (Istria, 2009)	
	29
5.4.1 Κατηγορίες Υποστήριξης Βραχομάζας (Istria, 2009)1	30
5.4.2 Μέθοδος Εκσκαφής και Υποστήριξης Βραχομάζας (Istria, 2009) 1	32

K	εφάλ	αιο 6. Προσομοίωση Περίπτωσης Σήραγγας Καλυδώνας	137
	6.1	Εισαγωγή	137
	6.2	Παρουσίαση Προσομοιώματος	138
	6.3	Μεθοδολογία Αναλύσεων	139
	6.4	Εισαγωγή Εντατικής Κατάστασης	140
	6.5	Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης	141
	6.6	Περιγραφή Παραμέτρων Προσομοιώματος	141
	6.6	δ.1 Ελαστικό Προσομοίωμα	142
	6.6	5.2 Προσομοίωμα Mohr – Coulomb	142
	6.6	5.3 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint"	143
	6.6	6.4 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας	143
	6.7	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων (Μετατοπίσεις)	144
	6.7	΄.1 Ελαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης	145
	6.7		146
	6.7	.3 Μοντέλο Προσομοίωσης "Ubiquitous Joint"	147
	6.7	Μοντέλο Προσομοίωσης "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας…	148
	6.8	Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μοντέλων Προσομοίωσης	149
	6.8	8.1 Ελαστικό Μοντέλο με Μοντέλο "Ubiquitous Joint"	149
	6.8 Κα	8.2 Μοντέλο Mohr – Coulomb με Μοντέλο "Ubiquitous Joint" σήραγγας λυδώνας	150
	6.9	Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων (Αξονικές Δυνάμεις)	152
	6.9	9.1 Ελαστικό Προσομοίωμα	153
	6.9	9.2 Προσομοίωμα Mohr – Coulomb	157
	6.9	9.3 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint"	161
	6.9	9.4 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας	165
	6.10	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	170

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας	175
ПАРАРТНМА	179
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	185

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Παράδειγμα ανοιγμάτων στην ίδια βραχομάζα (Amadei, 1996)	14
<b>Σχήμα 1.2:</b> Τέλειος σχισμός ορυκτού Αλίτη (ορυκτό άλας)	16
<b>Σχήμα 1.3:</b> Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων γραμμικώς ελαστικού – βισκοπλαστικού πετρώματος στην περίπτωση της μονοαξονικής φόρτισης (Wittke, 1990)	. 18
<b>Σχήμα 1.4:</b> Ορισμός του μέτρου ελαστικότητας Ε (Young's modulus) και του λόγου Poisson v (Wittke, 1990)	. 18
Σχήμα 1.5: Μοντέλα της δομής του άρρηκτου πετρώματος (Wittke, 1990)	. 19
<b>Σχήμα 1.6:</b> Ανισότροπη παραμόρφωση άρρηκτου πετρώματος με επίπεδη δομή (Wittke, 1990)	. 21
<b>Σχήμα 1.7:</b> Ορισμός των ελαστικών σταθερών για εγκάρσια ισότροπο υλικό με επίπεδη δομή (Wittke, 1990)	. 21
<b>Σχήμα 1.8:</b> Η φύση των ασυνεχειών (Wittke, 1990)	23
<b>Σχήμα 1.9:</b> Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης τοπικά στις επιφάνειες επαφής (Wittke, 1990)	. 24
<b>Σχήμα 1.10:</b> Επιρροή της ασυνέχειας στην παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας (Wittke, 1990)	. 26
<b>Σχήμα 1.11:</b> Διακριτή προσομοίωση κλειστής και επίπεδης ασυνέχειας (Wittke, 1990)	. 27
<b>Σχήμα 1.12:</b> Μονοαξονική φόρτιση μάζας πετρώματος με μία μερικώς ανοιχτή ασυνέχεια (Wittke, 1990)	28
<b>Σχήμα 1.13:</b> Παράδειγμα υπολογισμού ελαστικών σταθερών μιας εναλλασσόμενης ακολουθίας πετρώματος και υλικού πλήρωσης (Wittke, 1990).	. 32
<b>Σχήμα 1.14:</b> Παράδειγμα δομής του πετρώματος, των ασυνεχειών και των σχετικών μοντέλων ελαστικής συμπεριφοράς (Wittke, 1990)	33
<b>Σχήμα 2.1:</b> (a) Εξιδανίκευση του προβλήματος κυκλικού ανοίγματος σε	
εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα και (b) περιπτώσεις φορτίσεων (Hefny & Lo, 1999)	. 37

<b>Σχήμα 2.2:</b> Γραφική λύση και μεθοδολογία Goodman (1989)
<b>Σχήμα 2.3:</b> Κυκλικό άνοιγμα σε διαξονικό εντατικό πεδίο (S <sub>h</sub> , S <sub>v</sub> ) με σύστημα ασυνεχειών με αυθαίρετη κλίση (α) και διεύθυνση (Daemen, 1983)
<b>Σχήμα 2.4:</b> Ζώνες ολίσθησης γύρω από κυκλική σήραγγα (Daemen, 1983) 43
<b>Σχήμα 2.5:</b> Ζώνες ολίσθησης (συνεχείς γραμμές) και συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης ασυνεχειών (διακεκομμένες γραμμές) (Daemen, 1983)
<b>Σχήμα 2.6:</b> Ζώνες ολίσθησης σε υδροστατικό πεδίο τάσεων Ρ (Daemen, 1983)
<b>Σχήμα 3.1:</b> Παράμετροι κυκλικού ανοίγματος52
<b>Σχήμα 3.2:</b> Χαρακτηριστικά της βραχομάζας54
<b>Σχήμα 3.3:</b> Επιλογές επίλυσης55
<b>Σχήμα 3.4:</b> Αποτέλεσμα επίλυσης αραιού καννάβου (φ = 40°)
<b>Σχήμα 3.5:</b> Αποτέλεσμα επίλυσης πυκνού καννάβου (φ = 40°)
<b>Σχήμα 3.6:</b> Παρουσία διεύθυνσης ασυνέχειας με κλίση θ σε υλικό Mohr –
Coulomb στο αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων (x,y,x',y') (FLAC, 2008)57
Σχήμα 3.7: Κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας στο λογισμικό (FLAC, 2008) 58
<b>Σχήμα 3.8:</b> Διάγραμμα ροπών κάμψης με θλιπτικές και εφελκυστικές δυνάμεις (FLAC, 2008)
<b>Σχήμα 3.9</b> : Εσωτερική πίεση (Ρ <sub>i</sub> ) ίση με 1.62 MPa62
<b>Σχήμα 3.10</b> : Εσωτερική πίεση (Ρ <sub>i</sub> ) ίση με 1.26 MPa63
<b>Σχήμα 3.11</b> : Εσωτερική πίεση (Ρ <sub>i</sub> ) ίση με 1.08 MPa64
<b>Σχήμα 3.12</b> : Εσωτερική πίεση (Ρ <sub>i</sub> ) ίση με 0.90 MPa65
<b>Σχήμα 3.13</b> : Μηδενική εσωτερική πίεση (Ρ <sub>i</sub> )66
<b>Σχήμα 3.14:</b> Σύγκριση λύσεων Goodman και Daemen
<b>Σχήμα 3.15:</b> Σύγκριση λύσεων Goodman και Daemen
<b>Σχήμα 3.16:</b> Μορφή του προγράμματος ABAQUS (2009)69
<b>Σχήμα 3.17:</b> Διάγραμμα σύγκρισης μετατοπίσεων από αναλύσεις με ABAQUS και FLAC

<b>Σχήμα 3.18:</b> Διάγραμμα απόλυτης διαφοράς (%) μετατοπίσεων από αναλύσεις με ABAQUS και FLAC	71
<b>Σχήμα 3.19α, β:</b> Απεικόνιση των διανυσμάτων της μετατόπισης του ABAQUS και του FLAC, αντίστοιχα	72
<b>Σχήμα 4.1:</b> Ο κάνναβος των μοντέλων προσομοίωσης	80
<b>Σχήματα 4.2 α, β, γ:</b> Επίδραση της συχνότητας των ασυνεχειών στις μετατοπίσεις για μέτρο Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος για Eir = 10, 30 και100 GPa και για τρεις τιμές της ορθής δυστροπίας των ασυνεχειών	84
Σχήματα 4.3α, β, γ: Επίδραση του λόγου των μέτρων Ελαστικότητας στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση στις μετατοπίσεις για μέτρο Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος για Eir = 10, 30 και100 GPa και για τρεις τιμές της ορθής δυστροπίας των ασυνεχειών	. 86
<b>Σχήμα 4.4α, β:</b> Πεδίο μετατοπίσεων γύρω από τη σήραγγα με P <sub>0</sub> = 1 MPa και P <sub>i</sub> = 0, για φ = 30° και 40°	87
<b>Σχήμα 4.5α, β, γ:</b> Πεδίο μετατοπίσεων γύρω από τη σήραγγα με P <sub>0</sub> = 5 MPa και P <sub>i</sub> = 0, για φ = 30° και 40°	87
<b>Σχήμα 4.6α, β, γ:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 1 ΜΡα σε διάφορους λόγους Ρ <sub>i</sub> / Ρ <sub>0</sub>	. 89
<b>Σχήματα 4.7 α, β, γ:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 5 ΜΡα σε διάφορους λόγους Ρ <sub>i</sub> / Ρ <sub>0</sub>	. 90
<b>Σχήμα 4.8α, β, γ:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 10 MPa σε διάφορους λόγους Ρ <sub>i</sub> /Ρ <sub>0</sub>	. 91
<b>Σχήμα 4.9α, β, γ:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 1 ΜΡα σε διάφορους λόγους Ρ <sub>i</sub> / Ρ <sub>0</sub>	. 93
<b>Σχήμα 4.10α, β, γ:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 5 ΜΡα σε διάφορους λόγους Ρ <sub>i</sub> / Ρ <sub>0</sub>	. 94
<b>Σχήμα 4.11α, β, γ:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 10 MPa σε διάφορους λόγους Ρ <sub>i</sub> / Ρ <sub>0</sub>	95
<b>Σχήμα 4.12:</b> Αρχικό εντατικό πεδίο Ρ <sub>0</sub> = 1, 5, 10 MPa	96

<b>Σχήμα 5.1:</b> Τοπογραφικός χάρτης και θέση σήραγγας, κλίμακα 1:50.000 (Istria, 2009)	. 103
<b>Σχήμα 5.2:</b> Γεωλογικός χάρτης περιοχής, κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε.) (Istria, 2009)	. 105
Εικόνα 5.3: Ασυνέχειες πληρωμένες με ασβεστίτη εντός ψαμμιτών	
διακρίνονται οι μικρές ενδοστρωματικές μεταπτώσεις (Istria, 2009)	. 106
<b>Σχήμα 5.4:</b> Κατανομή του Κ σε σχέση του βάθους ως προς το οριζόντιο μέτρο Ελαστικότητας (Istria, 2009)	. 126
Εικόνα 5.5: Φωτογραφία όπου φαίνεται η ανισότροπη δομή του Φλύσχη (Istria, 2009)	. 135
Εικόνα 5.6: Φωτογραφία όπου φαίνεται το βήμα προχώρησης και το μεταλλικό στοιχείο υποστήριξης (Istria, 2009)	. 136
Σχήμα 6.1: Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων	. 138
<b>Σχήμα 6.2:</b> Λεπτομέρειες καννάβου στην περιοχή της σήραγγας για τη διατομή	. 138
<b>Σχήμα 6.3:</b> Θέσεις καταγραφής μετατοπίσεων	. 144
<b>Σχήματα 6.4α, β:</b> Μετατοπίσεις για κάθε Κ₀ στην άνω ημιδιατομή	. 152
<b>Σχήματα 6.5α, β, γ, δ:</b> Μετατοπίσεις για κάθε Κ₀ στην άνω ημιδιατομή	. 152
<b>Σχήμα 6.6:</b> Αρίθμηση στοιχείου "liner" στη διατομή της υπό ανάλυση σήραγγας	. 153
<b>Σχήμα 6.7:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)	. 154
<b>Σχήμα 6.8:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 88 και 41)	. 154
<b>Σχήμα 6.9:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)	. 155
<b>Σχήμα 6.10:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 88 και 41)	. 155

<b>Σχήμα 6.11:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της	
άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα	
(στοιχείο 88 και 41)	156
<b>Σχήμα 6.12:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 62)	156
<b>Σχήμα 6.13:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)	158
<b>Σχήμα 6.14:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην παρειά κοντά στην θέση εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 85)	158
<b>Σχήμα 6.15:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)	159
<b>Σχήμα 6.16:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην παρειά κοντά στην θέση εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 85)	159
<b>Σχήμα 6.17:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)	160
<b>Σχήμα 6.18:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 64)	160
<b>Σχήμα 6.19:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)	162
<b>Σχήμα 6.20:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)	162
Σχήμα 6.21: Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας	
(στοιχείο 68)	163

<b>Σχήμα 6.22:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας	
με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)	163
<b>Σχήμα 6.23:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της	
άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας	
(στοιχείο 68)	164
<b>Σχήμα 6.24:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας	
με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)	164
<b>Σχήμα 6.25:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της	
άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας	
(στοιχείο 73)	166
<b>Σχήμα 6.26:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της	
βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)	166
<b>Σχήμα 6.27:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της	
άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας	
(στοιχείο 68)	167
<b>Σχήμα 6.28:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας	
με μέγιστη τιμή στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)	167
<b>Σχήμα 6.29:</b> Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της	
άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας	
(στοιχείο 68)	168

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Σύγκριση τιμών μετατοπίσεων προγραμμάτων FLAC και	
ABAQUS	70
Πίνακας 4.1: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις ασυνέχειες	76
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών παραμέτρων που αναλύθηκαν	79
Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών παραμέτρων που αναλύθηκαν	79
<b>Πίνακας 4.4:</b> Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο "Donut"	80
<b>Πίνακας 4.5:</b> Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο "Ubiquitous Joint"	81
Πίνακας 4.6: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για εσωτερική πίεση	82
Πίνακας 4.7: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο "liner"	83
<b>Πίνακας 5.1:</b> Τιμές συντελεστή διαπερατότητας σχηματισμού fi.st (Istria, 2009)	10
<b>Πίνακας 5.2:</b> Τιμές συντελεστή διαπερατότητας σχηματισμού fi.sl,st και fi.sl2 (Istria, 2009)	10
<b>Πίνακας 5.3:</b> Πίνακας ταξινόμησης βραχομάζας RMR σήραγγας δεξιού κλάδου (Istria, 2009)	14
<b>Πίνακας 5.4:</b> Πίνακας ταξινόμησης βραχομάζας RMR σήραγγας αριστερού κλάδου (Istria, 2009)	15
Πίνακας 5.5: Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών (Istria, 2009) 1	17
<b>Πίνακας 5.6:</b> Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας Ι (Istria, 2009)	19
<b>Πίνακας 5.7:</b> Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II <sub>Sa</sub> (Istria, 2009)	20
<b>Πίνακας 5.8:</b> Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II <sub>Sa</sub> (Istria, 2009)	22
<b>Πίνακας 5.9:</b> Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II <sub>sa</sub> (Istria, 2009)	23

<b>Πίνακας 5.10:</b> Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II <sub>si</sub> (Istria, 2009)
<b>Πίνακας 6.1:</b> Περιγραφή εργασιών και συνολικό ποσοστό χαλάρωσης κατά τα στάδια προσομοίωσης με το FLAC140
Πίνακας 6.2: Ιδιότητες για το ελαστικό μοντέλο
Πίνακας 6.3: Ιδιότητες για το μοντέλο Mohr – Coulomb
Πίνακας 6.4: Ιδιότητες για το μοντέλο "Ubiquitous Joint"
<b>Πίνακας 6.5:</b> Ιδιότητες για το μοντέλο "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας
Πίνακας 6.6: Μετατοπίσεις (m) ελαστικού μοντέλου για K <sub>0</sub> = 0.5
Πίνακας 6.7: Μετατοπίσεις (m) ελαστικού μοντέλου για K <sub>0</sub> = 1.0
Πίνακας 6.8: Μετατοπίσεις (m) ελαστικού μοντέλου για K <sub>0</sub> = 1.5
Πίνακας 6.9: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου Mohr – Coulomb για K <sub>0</sub> = 0.5 146
Πίνακας 6.10: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου Mohr – Coulomb για K <sub>0</sub> = 1.0 146
Πίνακας 6.11: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου Mohr – Coulomb για K <sub>0</sub> = 1.5 146
Πίνακας 6.12: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" για K <sub>0</sub> = 0.5 147
Πίνακας 6.13: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" για K <sub>0</sub> = 1.0 147
Πίνακας 6.14: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" για K <sub>0</sub> = 1.5 147
<b>Πίνακας 6.15:</b> Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας για  K <sub>0</sub> = 0.5148
<b>Πίνακας 6.16:</b> Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας για  K <sub>0</sub> = 1.0148
Πίνακας 6.17: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" σήραγγας
Καλυδώνας για  Κ₀ = 1.5148
<b>Πίνακας 6.18:</b> Σύγκριση μετατοπίσεων Ελαστικό με Ubiquitous Joint (K <sub>0</sub> = 0.5)
Πίνακας 6.19: Σύγκριση μετατοπίσεων Ελαστικό με Ubiquitous Joint
(K <sub>0</sub> = 1.0)

Πίνακας 6.20: Σύγκριση μετατοπίσεων Ελαστικό με Ubiquitous Joint	
(K <sub>0</sub> = 1.5)	150
Πίνακας 6.21: Σύγκριση μετατοπίσεων Mohr - Coulomb με Ubiquitous Joint	
με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας (K₀ = 0.5)	151
Πίνακας 6.22: Σύγκριση μετατοπίσεων Mohr - Coulomb με Ubiquitous Joint	
με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας (K₀ = 1.0)	151
Πίνακας 6.23: Σύγκριση μετατοπίσεων Mohr - Coulomb με Ubiquitous Joint	
με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας (K₀ = 1.5)	151
Πίνακας 6.24: Συνοπτικός πίνακας μέγιστων αξονικών δυνάμεων αναλύσεων	169

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την επίδραση της ανισοτροπίας του πετρώματος στη συμπεριφορά μίας σήραγγας κατά τη διάνοιξή της. Καθώς τα περισσότερα πετρώματα επί τόπου εμφανίζονται ως ανισότροπα, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται συχνά από τους συντελεστές σχεδιασμού ενός υπόγειου έργου. Σκοπός της εργασίας είναι η όσο το δυνατόν πληρέστερη αντιμετώπιση του αντικειμένου, στην οποία να περιλαμβάνονται οι διάφορες μορφές επίδρασης της ανισοτροπίας στην κατασκευή.

Η ανισοτροπία των πετρωμάτων οφείλεται αφενός στα εν γένει χαρακτηριστικά τους, όπως είναι ο σχισμός, η στρώση και η σχιστότητα, και αφετέρου στην παρουσία των ασυνεχειών. Τα θέματα αυτά περιγράφονται στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται βιβλιογραφικά το θέμα της επίδρασης της ανισοτροπίας του πετρώματος στις μετατοπίσεις και στις τάσεις γύρω από μία σήραγγα. Περιγράφονται και αξιολογούνται οι υπάρχουσες κλειστές λύσεις τόσο για τις μετατοπίσεις του πετρώματος όσο και για την ολίσθηση των επιπέδων των ασυνεχειών γύρω από τη σήραγγα.

Στην παρούσα εργασία, η μελέτη της επίδρασης της ανισοτροπίας του πετρώματος πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας εξειδικευμένα πακέτα λογισμικού προσομοίωσης γεωτεχνικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα FLAC 2D version 6.0 της Itasca, που συνιστά ένα ευρέως διαδεδομένο κώδικα αριθμητικής ανάλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Επίσης πραγματοποιήθηκε περιορισμένος αριθμός αναλύσεων με το πρόγραμμα ABAQUS, που είναι ένας ισχυρός κώδικας πεπερασμένων στοιχείων. Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται μία συνοπτική περιγραφή των προγραμμάτων αυτών. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση τους με τα αποτελέσματα των κλειστών λύσεων που διερευνήθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο.

Σε επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός παραμετρικών αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού FLAC. Οι παραμετρικές αναλύσεις είχαν ως στόχο την διερεύνηση των κρίσιμων παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό μίας σήραγγας σε ανισότροπο υλικό. Παράμετροι διερεύνησης αποτέλεσαν τόσο οι ιδιότητες του υλικού του άρρηκτου πετρώματος όσο και των ιδιοτήτων των ασυνεχειών, που αποτελούν και το κύριο στοιχείο της ανισοτροπίας του πετρώματος. Τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν αφορούσαν:

- Ελαστικές αναλύσεις διάνοιξης κυκλικής σήραγγας σε εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα
- Ελαστοπλαστικές αναλύσεις σε ανυποστήρικτη κυκλική σήραγγα λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση μεταξύ των επιπέδων των ασυνεχειών
- Ελαστοπλαστικές αναλύσεις όπως παραπάνω σε κυκλική σήραγγα με εσωτερική πίεση
- Ελαστοπλαστικές αναλύσεις όπως παραπάνω σε κυκλική σήραγγα με δακτύλιο υποστήριξης.

Τόσο η περιγραφή των μοντέλων όσο και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων τους περιλαμβάνονται στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας. Στα αποτελέσματα παρατίθενται πλήθος διαγραμμάτων που παρουσιάζουν την επίδραση των παραμέτρων που αξιολογήθηκαν κατά την ανάλυση, τόσο στις μετατοπίσεις που προκαλούνται κατά την εκσκαφή, όσο και στις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο δακτύλιο υποστήριξης της σήραγγας.

Για την παρουσίαση μίας ολοκληρωμένης έρευνας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση ενός πραγματικού προβλήματος ανισοτροπίας από τις υπό κατασκευή σήραγγες της Ελλάδος. Η σήραγγας Καλυδώνας, η οποία αποτελεί μέρος του μεγάλου αυτοκινητοδρόμου «Ιόνια Οδός», αποτελεί ένα υπόγειο τεχνικό έργο στο οποίο οι συνθήκες του πετρώματος αντιστοιχούν σε υλικό με ανισότροπη συμπεριφορά. Οι συνθήκες αυτές καθώς και στοιχεία από την μελέτη και κατασκευή του έργου δίνονται στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας.

Πραγματοποιήθηκε, ακόμη, σημαντικός αριθμός αναλύσεων που περιγράφονται στο έκτο κεφάλαιο, στις οποίες αξιοποιήθηκαν στοιχεία από την πραγματική μελέτη της σήραγγας Καλυδώνας, ούτως ώστε να προσομοιωθεί, όσο είναι αυτό υπολογιστικά δυνατό, η πραγματική κατάσταση των συνθηκών κατασκευής του έργου. Από την ανάλυση προκύπτουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα τόσο για τις μετατοπίσεις που προκαλούνται εξαιτίας της εκσκαφής, όσο και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην υποστήριξη που έχει επιλεχθεί από τη μελέτη. Συμπερασματικά, όπως αναφέρεται στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, προκύπτει ότι η ανισοτροπία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά της σήραγγας κατά τη φάση κατασκευής. Η παρουσία των ασυνεχειών στο πέτρωμα διαφοροποιεί το πρόβλημα και το ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες περιπτώσεις συνθηκών που συναντώνται σε διάφορες περιπτώσεις εκσκαφής σηράγγων. Οφείλει ο κάθε μελετητής να λάβει υπόψη του την παρουσία των ασυνεχειών στο πέτρωμα, καθώς επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα που προκύπτουν τόσο από τις αναλύσεις προσομοίωσης όσο και από την πραγματική εικόνα κατά τη διάνοιξη.

#### ABSTRACT

The following Dissertation is a study on the effect anisotropy of the rock has on a tunnel's behavior during the excavation process. At the point of designing an underground work, all contributors many times face the problem of anisotropy of the rock, as many rocks behave in that exact way. The aim is to deal with the problem as a whole, to the extent that this is possible, including many types of anisotropy effects facing during the construction process.

Anisotropy of the rock is related on the one side to the general characteristics of the rocks, such as schism, layering and schistosity, and on the other, to the presence of discontinuities. All the above mentioned are presented in the first chapter of the work.

In the second chapter, it is described, by the use of bibliography, the issue of anisotropy effect of rocks on displacements and stresses around a tunnel. Closed – form solutions are examined and evaluated, at first concerning displacements of the rock and then the slipping of the joints around the tunnel.

In this Dissertation, the examination of the effect anisotropy of a rock has, is evaluated by the use of specialized software packages for simulation of geotechnical problems. More specifically, FLAC 2D version 6.0 of Itasca has been used. This is a widespread code of numerical analysis with the finite differences method. In addition, a limited number of analyses were performed with the use of ABAQUS program, which is a powerful code of finite elements. The third chapter includes a brief presentation of these programs. Moreover, a comparison between the results of the programs and of the closed – form solutions as presented in the second chapter, is performed.

In the next stage, a large number of parametric analyses were performed using the software FLAC. These parametric analyses were designed in order to investigate the critical parameters that need to be taken into consideration during the designing of a tunnel in anisotropic material. The parameters examined were both the material properties of rock and the properties of discontinuities. The properties of discontinuities are the principal element of rock anisotropy. The models that were designed concerned:

- 1. Elastic analyses of the excavation of a circular tunnel in a transversely isotropic rock
- 2. Elastoplastic analyses of a circular tunnel without support, taking into consideration the slipping of the joints
- 3. Elastoplastic analyses of a circular tunnel, as the above mentioned, with internal pressure
- 4. Elastoplastic analyses of a circular tunnel, as the above mentioned, with a ring type support.

Both the description of the model and the annotation of the results are included in the fourth chapter of the Dissertation. The results are plotted to a number of charts that present the effect of the parameters evaluated during the analysis on displacements that are caused by excavation and on the axial stresses that develop on the ring – type support of the tunnel.

In order to present a full research, the simulation of a real problem of anisotropy was chosen to be made. This simulation was about an under construction tunnel project in Greece. "Kalydona" tunnel, which is part of the large highway called "Ionia Odos", is an underground work in which the conditions of the rock faced correspond to material of anisotropic behaviour. These conditions faced, as well as data from the designing and construction studies of the work, are presented in the fifth chapter.

A significant number of analyses are performed, all described in the sixth chapter, in which real data from the designing study have been used in order to simulate, as far as this is computably allowed, the real conditions of the construction of the work. From this analysis interesting results have been produced concerning the displacements caused by excavation, as well as the axial stresses developing on the ring – type support of the tunnel, which is chosen from the designing study.

In conclusion, as mentioned in the last chapter of the dissertation, it is shown that during the excavation process, anisotropy influences to a great degree the behaviour of the tunnel. The presence of rock discontinuities differentiates and separates the problem from the rest cases of conditions faced during the excavation of a tunnel. Each engineer who designs such a project must take into account the presence of rock discontinuities, because they lead to significant changes in the results obtained from both the simulation analysis and the real picture during the construction of the tunnel.

ΜΕΡΟΣ Α: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

## Κεφάλαιο 1

# Περί Ανισοτροπίας των Πετρωμάτων

#### 1.1 Εισαγωγή

Πολλά πετρώματα κοντά στην επιφάνεια της Γης παρουσιάζουν καλά καθορισμένα δομικά στοιχεία υπό μορφή της διαστρωμάτωσης (stratification), της φύλλωσης (foliation), της σχιστότητας (fissuring) και των διακλάσεων (jointing). Το αποτέλεσμα εκατομμυρίων χρόνων μηχανικής, χημικής και θερμικής καταπόνησης που υφίστανται τα πετρώματα επέφερε τη σημερινή ανισότροπη και ετερογενή μορφή τους (Amadei, 1996).

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

Η ανισοτροπία μπορεί να εντοπιστεί σε διάφορες κλίμακες στη βραχομάζα ξεκινώντας από την ανισοτροπία των κρυστάλλων των ορυκτών, τη μικροδομή σε δοκίμια που εξετάζονται στο μικροσκόπιο, την ανισοτροπία στην κλίμακα του εργαστηρίου μέχρι και σε μεγέθη που συναντώνται σε έργα μηχανικού.

Η ανισοτροπία είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των σχιστοποιημένων μεταμορφωμένων πετρωμάτων, όπως λόγου χάρη ο γνεύσιος, ο φυλλίτης και ο

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

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

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

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

Τα πετρώματα που αναφέρθηκαν παραπάνω και παρουσιάζουν εμφανή χαρακτηριστικά ανισότροπης συμπεριφοράς έχουν ταξινομηθεί ως Κατηγορία Β (Class B) από τον Barla (1974). Ως Κατηγορία Α (Class A) των ανισότροπων πετρωμάτων αποτελούν τα πετρώματα εκείνα που παρόλη την εμφανή ισοτροπία παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ανισοτροπίας.

Η ανισοτροπία αποτελεί σημαντικό στοιχείο στα πολιτικά έργα, στα μεταλλευτικά έργα και στην μηχανική των πετρελαίων. Στη λίστα που ακολουθεί (Amadei, 1996) αναφέρονται ορισμένα έργα στα οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό, στα οποία η ανισοτροπία αποτελεί σημαντικό στοιχείο.

12

#### Πολιτικά και Μεταλλευτικά Έργα

- Σταθεροποίηση υπόγειων εκσκαφών
- Διάτρηση και ανατίναξη
- Σταθεροποίηση επιφανειακών εκσκαφών
- Σταθεροποίηση θεμελιώσεων
- Ροή ρευστών στη βραχομάζα

#### Μηχανική Πετρελαίων

- Ευστάθεια και απόκλιση γεωτρήσεων
- Παραμόρφωση και αντοχή των τοιχωμάτων της γεώτρησης
- Θραύση και επέκταση στο περιβάλλον πέτρωμα
- Ροή ρευστών

Η σημασία και η επίδραση της ανισοτροπίας των πετρωμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σχετικό μέγεθος του προβλήματος σε σχέση με το μέγεθος δομικών χαρακτηριστικών του πετρώματος, όπως λόγου χάρη η των διαστρωμάτωση, το πάχος των στρωμάτων και η απόσταση των ασυνεχειών. Ακόμη, το είδος της ανισοτροπίας δύναται να διαφέρει από τη μία κλίμακα στην άλλη. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1, όπου δύο κυκλικά ανοίγματα διανοίγονται στην ίδια βραχομάζα που τέμνεται από μία οικογένεια ασυνεχειών με απόσταση 30 cm. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών είναι ισότροπο. Στην περίπτωση Α, το άνοιγμα είναι μικρό με διάμετρο 5 mm. Για την περίπτωση αυτή το μέγεθος του ανοίγματος είναι πολύ μικρό σε σχέση με την απόσταση των ασυνεχειών και η βραχομάζα δύναται να προσομοιωθεί για πρακτικό σκοπό ως συνεχής και ισότροπη. Στην περίπτωση Β παρόλα αυτά, το άνοιγμα έχει διάμετρο 3 m. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η βραχομάζα δύναται να προσομοιωθεί ως ασυνεχής και ανισότροπη. Εφόσον υποτεθεί σε διαφορετική περίπτωση ότι το άρρηκτο πέτρωμα μεταξύ των ασυνεχειών είναι ανισότροπο, τότε και στην περίπτωση Α και στην περίπτωση Β πρέπει να ληφθεί υπόψη η δομή του πετρώματος στην προσομοίωση της εκσκαφής. Στην περίπτωση Α η ανισοτροπία του άρρηκτου πετρώματος είναι σημαντική, ενώ στην περίπτωση Β η επιρροή των ασυνεχειών στην ανισοτροπία του πετρώματος είναι κρίσιμη.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα ανοιγμάτων στην ίδια βραχομάζα (Amadei, 1996)

Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η βραχομάζα με μία οικογένεια ασυνεχειών με αποστάσεις 30 cm (1 ft).

Το παραπάνω παράδειγμα παρουσιάζει τη διαφορετικότητα της στρατηγικής που πρέπει να ακολουθηθεί για την προσομοίωση προβλημάτων της ίδιας βραχομάζας, αλλά σε διαφορετική κλίμακα κατασκευής.

#### 1.2 Ανισοτροπία άρρηκτου πετρώματος

#### 1.2.1 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά Ανισότροπου Πετρώματος

#### Σχισμός

Με προσεκτική παρακολούθηση ενός δείγματος πετρώματος γίνεται η διαπίστωση ότι αυτό αποτελείται από σωματίδια ή κόκκους, οι οποίοι διακρίνονται ανάλογα με τη μορφή τους, το μέγεθος και το χρώμα τους, καθώς και από άλλες ιδιότητες σε κόκκους διαφόρων ειδών.

Στις περιπτώσεις που ένα σώμα χαρακτηρίζεται ως ομογενές, σημαίνει ότι σε όλα τα σημεία του έχει τις ίδιες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Τα ομογενή εκείνα σώματα, τα οποία αποτελούν τους κόκκους των πετρωμάτων είναι τα ορυκτά.

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα πολλών κρυσταλλικών σωμάτων είναι ο σχισμός (Παπαγεωργάκης, Κουμαντάκης, 1984). Δηλαδή είναι η διάσπαση, υπό την επίδραση μιας μηχανικής καταπόνησης (θλίψης, εφελκυσμού, κρούσης), κατά επίπεδα εντελώς καθορισμένα και υπακούοντα τη συμμετρία του κρυστάλλου. Η

τελειότητα και η θέση των επιπέδων του σχισμού εξαρτώνται από την κρυσταλλική δομή.

Ο κρύσταλλος σχίζεται παράλληλα προς ορισμένα δικτυωτά επίπεδα και μάλιστα εκείνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τους ασθενέστερους δεσμούς.

Σε μερικά ορυκτά υπάρχει μία διεύθυνση σχισμού και σε άλλα παρουσιάζονται δύο ή περισσότερες ισότιμες ή ανισότιμες διευθύνσεις.

Οι μαρμαρυγίες π.χ. χαρακτηρίζονται από τελειότατο σχισμό και γι' αυτό διαχωρίζονται σε λεπτότατα φύλλα. Όταν τα ορυκτά αυτά παρουσιάζονται σε σχετικώς παχιά συσσωματώματα μέσα σε σκληρά πετρώματα, τότε η στίλβωση των πετρωμάτων αυτών είναι δύσκολη, γιατί κατά τη διαδικασία της στίλβωσης αποσπώνται εύκολα μικρά φύλλα των μαρμαρυγιών εξαιτίας του σχισμού.

Ο ασβεστίτης επίσης παρουσιάζει σχισμό τέλειο κατά τις τρεις έδρες του ρομβόεδρου και σ' αυτή την ιδιότητα κυρίως οφείλει το μάρμαρο, το οποίο αποτελείται από κρυστάλλους ασβεστίτη, την αξία του σαν υλικό κατασκευής γλυπτών τέχνης.

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

Ο σχισμός των ορυκτών δεν πρέπει να συγχέεται με την ιδιότητα της σχιστότητας των πετρωμάτων.

Για τα ορυκτά που στερούνται σχισμού, όταν εκείνα καταπονηθούν μηχανικά θραύονται, αντί να σχίζονται και γίνεται λόγος περί θραύσης. Κατά τη θραύση δημιουργούνται επιφάνειες θραύσης, οι οποίες μπορεί να είναι κογχώδεις (χαλαζίας), ανώμαλες (τουρμαλίνης), σκληθροειδείς (ακτινόλιθος), αγκιστροειδείς αυτοφυής χαλκός), κλπ..

15



Σχήμα 1.2: Τέλειος σχισμός ορυκτού Αλίτη (ορυκτό άλας)

#### • Στρώση

Τα ιζηματογενή πετρώματα διατάσσονται στο χώρο κατά σειρές (πακέτα) στρωμάτων. Στρώμα (λεπτό ή παχύ) είναι μία λιθολογική ενότητα με μεγάλη έκταση που η κάτω και η πάνω επιφάνεια της (δάπεδο και οροφή) είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και στην οποία ο πετρογραφικός χαρακτήρας δε μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου ή και καθόλου.

Πολλές φορές συμβαίνει να παρατηρείται σε μία τομή σειράς στρωμάτων ρυθμική εναλλαγή στρώσεων διαφόρων πετρωμάτων, π.χ. ασβεστόλιθων και μαργών, αργίλων και ψαμμιτών, ψαμμιτών και ασβεστόλιθων, μαργών και αργίλων. Δηλαδή μπορεί να υπάρξουν όλοι οι συνδυασμοί των γνωστών πετρωμάτων.

Αυτονόητο είναι ότι η εναλλαγή των διάφορων πετρωμάτων κατά στρώματα έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή των ιδιοτήτων των πετρωμάτων σε κάθε αλλαγή.

Αυτή η δομή κατά στρώματα παρατηρείται, γιατί όπως είναι φανερό κατά την ιζηματογένεση διακόπτεται η απόθεση του Α υλικού (λ.χ. αργίλων) και συνεχίζεται η απόθεση του Β υλικού (λ.χ. κροκάλων).

Η στρώση συνεπώς χαρακτηρίζει τα ιζηματογενή πετρώματα και μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα επίπεδο οριζόντιο ή κεκλιμένο που τέμνει το πέτρωμα στη φυσική του θέση, δηλαδή το «βράχο» σε μεγάλη έκταση (Φυτρολάκης, 1985). Με
άλλα λόγια στο επίπεδο στρώσης σταματά η συνέχεια της δομής του βράχου σε όλη την έκτασή της. Γι' αυτό ακριβώς η στρώση αποτελεί επιφάνεια ολικής ασυνέχειας του πετρώματος στη φυσική τους θέση.

#### • Σχιστότητα

Είναι η ιδιότητα που παρουσιάζουν πολλά πετρώματα να αποχωρίζονται εύκολα σε πλάκες λόγω στρώσεως ή παράλληλου ιστού, που έχει προκύψει από την επίδραση κατευθυνόμενης πίεσης πάνω στο πέτρωμα (Παπαγεωράκης, Κουμαντάκης, 1984). Η πίεση αυτή μπορεί να είναι τεκτονική ή να οφείλεται στο βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων. Κάτω από την πίεση αυτή και με μία σχετική αύξηση της θερμοκρασίας το πέτρωμα αποκτά πλαστικότητα, τα επιμήκη και φυλλώδη ορυκτά αναδιατάσσονται στο πέτρωμα, έτσι ώστε ο μεγαλύτερος άξονας τους να είναι κάθετος προς τη διεύθυνση της πιέσεως (πιο σταθερή θέση) (Φυτρολάκης, 1985). Μ' αυτή τη διαδικασία δημιουργούνται τα σχιστολιθικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν τη μέγιστη αντοχή σε θλίψη όταν η διεύθυνση των φορτίων είναι κάθετη προς τα επίπεδα σχιστότητας και την ελάχιστη όταν τα φορτία εφαρμόζονται με γωνία 45° ± φ / 2 προς αυτά, όπου φ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος. Τα πετρώματα με πολύ σαφή σχιστότητα ονομάζονται σχιστόλιθοι. Σ' αυτούς, είτε επικρατούν φυλλώδη ορυκτά, είτε οι ορυκτοί κόκκοι λόγω πιέσεων έχουν πάρει πλακώδη έως φυλλώδη μορφή. Γενικά τα επίπεδα σχιστότητας αποτελούν επιφάνειες ασυνέχειας, αλλά όχι τόσο επικίνδυνες όσο άλλες (Παπαγεωράκης, Κουμαντάκης, 1984). Αυτό εξαρτάται και από το είδος και το βαθμό αποσάθρωσης του πετρώματος. Σε μία πτυχή η σχιστότητα είναι συνήθως παράλληλη προς το αξονικό επίπεδο. Πρέπει να τονιστεί πάντως ότι είναι δυνατόν σε μία βραχώδη μάζα ή και σε ένα δείγμα πετρώματος να συνυπάρχουν στρώση και σχιστότητα που είτε συμπίπτουν είτε óχι.

#### 1.2.2 Σχέση Τάσεων – Παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 1.3 δίνεται η σχέση ενός γραμμικώς ελαστικού πετρώματος και τάσεων – παραμορφώσεων υπό συνθήκες μονοαξονικής φόρτισης. Όταν το φορτίο φτάσει μία συγκεκριμένη μέγιστη τιμή – η οποία στην περίπτωση της δοκιμής μονοαξονικής σύνθλιψης είναι ίση με την τιμή της μονοαξονικής αντοχής σ<sub>c</sub>, αλλά σε γενικές γραμμές είναι μία συνάρτηση της κατάστασης των τάσεων και περιγράφεται από το κριτήριο αστοχίας, τότε αναπτύσσονται μη ελαστικές και μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις (Wittke, 1990). Αυτές μπορούν να αυξηθούν χωρίς όριο και να οδηγήσουν σε αστοχία του πετρώματος που ασκείται το φορτίο (Σχήμα 1.3) ή να παραμείνουν περιορισμένες όταν μία νέα κατάσταση ισορροπίας μπορέσει να καταστεί δυνατή μέσω ανακατανομής των τάσεων μέσα στο πέτρωμα.



Σχήμα 1.3: Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων γραμμικώς ελαστικού – βισκοπλαστικού πετρώματος στην περίπτωση της μονοαξονικής φόρτισης (Wittke, 1990)



**Σχήμα 1.4:** Ορισμός του μέτρου ελαστικότητας Ε (Young's modulus) και του λόγου Poisson v (Wittke, 1990)

Το δομικό μοντέλο που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τη δομή του άρρηκτου πετρώματος υιοθετείται σαν αρχικό σημείο για την περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς.

Όταν σε άρρηκτο πέτρωμα με τυχαία δομή του πετρώματος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5a εφαρμόζεται μονοαξονικό ή πολυαξονικό φορτίο χαμηλότερο της αντοχής του πετρώματος, προκαλούνται ελαστικές παραμορφώσεις ανεξάρτητες της διεύθυνσης φόρτισης. Οι δύο παράμετροι που ορίζονται στο Σχήμα 1.4, το μέτρο ελαστικότητας Ε και ο λόγος Poisson v, επαρκούν για την περιγραφή της γραμμικώς ελαστικής σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων. Το μέτρο διάτμησης G είναι συνάρτηση του Ε και του v:

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \tag{1.1}$$



Σχήμα 1.5: Μοντέλα της δομής του άρρηκτου πετρώματος (Wittke, 1990)

Οι τάσεις και οι ορθές και διατμητικές παραμορφώσεις σε ένα καρτεσιανό σύστημα αξόνων (x,y,z) σχετίζονται με το νόμο του Hooke από τις σταθερές της ελαστικότητας Ε και ν. Δίνεται η Σχέση 1.2:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \tag{1.2}$$

όπου:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$$
(1.3)

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_{x}, \epsilon_{y}, \epsilon_{z}, y_{xy}, y_{yz}, y_{zx}\}^{\mathrm{T}}$$
(1.4)

$$[D] =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{E(1-v)}{1-v-2v^2} & \frac{Ev}{1-v-2v^2} & \frac{Ev}{1-v-2v^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Ev}{1-v-2v^2} & \frac{E(1-v)}{1-v-2v^2} & \frac{Ev}{1-v-2v^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Ev}{1-v-2v^2} & \frac{Ev}{1-v-2v^2} & \frac{E(1-v)}{1-v-2v^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2(1+v)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2(1+v)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2(1+v)} \end{bmatrix}$$

Στην περίπτωση ενός μοντέλου άρρηκτου πετρώματος με επίπεδη δομή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4b, η υπόθεση της ισότροπης ελαστικής συμπεριφοράς μπορεί να αποτελέσει μη αποδεκτή απλοποίηση. Το άρρηκτο πέτρωμα με επίπεδη δομή, λόγου χάρη ο σχιστόλιθος, εμφανίζει αξιόλογα μεγαλύτερη συμπιεστότητα κάθετα στη δομή της σχιστότητας παρά παράλληλα σε αυτή. Η συμπεριφορά τάσεων – παραμορφώσεων παρόλα αυτά είναι ισοτροπική στο επίπεδο της σχιστότητας (Σχήμα 1.6).

Η περιγραφή τέτοιας συμπεριφοράς στην ελαστική περιοχή απαιτεί πέντε ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές. Η σχετική συμπεριφορά τάσεων – παραμορφώσεων αναφέρεται ως εγκάρσια ισότροπη. Είναι σύνηθες να υιοθετούνται τα μέτρα ελαστικότητας του Young E<sub>1</sub> και E<sub>2</sub> για την διεύθυνση παράλληλα και κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας, αντίστοιχα, το μέτρο διάτμησης G<sub>2</sub> για τη διατμητική φόρτιση στο επίπεδο ισοτροπίας και οι δύο λόγοι του Poisson v<sub>1</sub> και v<sub>2</sub>.

Οι πέντε ελαστικές σταθερές μπορούν να εξηγηθούν με τη βοήθεια του Σχήματος 1.7, όπου σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x´,y´,z´), ο άξονας z´ συμπίπτει με τη διεύθυνση της μέγιστης παραμορφωσιμότητας και οι άξονες x´ και y´ βρίσκονται στο επίπεδο ισοτροπίας. Οι σταθερές ελαστικότητας μπορούν να ληφθούν από τις τάσεις και τις ορθές και διατμητικές παραμορφώσεις του τριδιάστατου στοιχείου σύμφωνα με το Σχήμα 1.7.



**Σχήμα 1.6:** Ανισότροπη παραμόρφωση άρρηκτου πετρώματος με επίπεδη δομή (Wittke, 1990)



Σχήμα 1.7: Ορισμός των ελαστικών σταθερών για εγκάρσια ισότροπο υλικό με επίπεδη δομή (Wittke, 1990)

Στην περίπτωση της εγκάρσιας ισοτροπίας τα διανύσματα {σ} και {ε} σχετίζονται μεταξύ τους μέσω του μητρώου δυστροπίας D´, σύμφωνα με τη Σχέση 1.5

$$\{\sigma'\} = [D']\{\varepsilon'\} \tag{1.5}$$

όπου,

$$[D'] = \begin{bmatrix} E_1 \frac{1 - nv_2^2}{(1 + v_1)m} & E_1 \frac{v_1 + nv_2^2}{(1 + v_1)m} & E_1 \frac{v_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \frac{v_1 + nv_2^2}{(1 + v_1)m} & E_1 \frac{1 - nv_2^2}{(1 + v_1)m} & E_1 \frac{v_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \frac{v_2}{m} & E_1 \frac{v_2}{m} & E_2 \frac{1 - v_1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E_1}{2(1 + v_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

όπου,

$$n = \frac{E_1}{E_2} \kappa \alpha m = (1 - v_1 - 2nv_2^2)$$

#### 1.3 Ανισοτροπία Βραχομάζας

Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων της βραχομάζας είναι ιδιαίτερα σημαντική για διερεύνηση ευστάθειας, καθώς και για το σχεδιασμό κατασκευών στο πέτρωμα. Ακόμα και σε περιπτώσεις υπόγειων ανοιγμάτων με σχετικά μικρό ύψος υπερκειμένων, η βραχομάζα συνήθως αποτελεί το μέσο που αναλαμβάνει τα φορτία, υποβοηθούμενο από τα στοιχεία υποστήριξης. Ομοίως, σε καταστάσεις όπου συγκεντρωμένα φορτία εφαρμόζονται στο βραχώδες υπόβαθρο, όπως λόγου χάρη στις περιπτώσεις των τοξωτών φραγμάτων, η βραχομάζα αποτελεί τον κρίσιμο παράγοντα της όλης κατασκευής. Τυχόν παραμορφώσεις στο βραχώδες υπόβαθρο οδηγούν σε επιφόρτιση του φράγματος και αντιστρόφως, με συνέπεια η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων της κατασκευής να είναι σημαντική.

Η περιπλοκότητα της δομής της βραχομάζας καθιστά εξαιρετικά δύσκολο να αναπτυχθεί ένα ενιαίο μοντέλο που να περιγράφει τη συμπεριφορά τάσεων –

22

παραμορφώσεων των διάφορων τύπων των πετρωμάτων, κατάλληλο για το σχεδιασμό κατασκευών.

## 1.3.1 Επίδραση μιας ασυνέχειας στις τάσεις και τις παραμορφώσεις πριν την αστοχία

Οι ασυνέχειες παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην παραμόρφωση όσο και στην αντοχή της βραχομάζας. Ακόμη και μία μεμονωμένη ασυνέχεια επηρεάζει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις της γειτονικής βραχομάζας. Κάποιοι τύποι ασυνεχειών που χαρακτηρίζονται ως τυπικοί σύμφωνα με τον τρόπο που επηρεάζουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Η φύση των ασυνεχειών (Wittke, 1990)

Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται στο a) ασυνέχεια με εμμονή, επίπεδη, λεία ή τραχιά, κλειστή, b) ασυνέχεια με εμμονή, επίπεδη, τραχιά, ανοιχτή, c) ασυνέχεια με εμμονή, ανώμαλη, κλειστή ή ανοιχτή, d) ασυνέχεια με εμμονή, με υλικό πλήρωσης, e) ασυνέχεια διακοπτόμενη από γέφυρες του πετρώματος, κλειστή και στο f) ασυνέχεια διακοπτόμενη από το πέτρωμα, ανοιχτή ή με υλικό πλήρωσης.

Οι ασυνέχειες που συχνά συναντώνται στη φύση μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εικονιζόμενες παραπάνω, με ένα βαθμό απλοποίησης. Οι ανοιχτές ασυνέχειες με εμμονή (Σχήμα 1.8b) εξαιρούνται αφού πρέπει πρώτα να

κλείσουν για να μπορέσουν να μεταφέρουν φορτία. Έπειτα μπορούν να αντιστοιχηθούν με τα Σχήματα 1.8a, b ή c.

Οι κλειστές και σφιχτές ασυνέχειες δεν επηρεάζουν έντονα την κατανομή των τάσεων στο περιβάλλον πέτρωμα και στην παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή, ανεξαρτήτως της φύσης της επιφάνειας (επίπεδη, λεία ή τραχιά, Σχήμα 1.8a, ανώμαλη, Σχήμα 1.8c) ή της εμμονής που παρουσιάζουν (Σχήμα 1.8e).

Όταν η επιφάνεια των ασυνεχειών είναι τραχιά και ανώμαλη, τότε δεν είναι και τελείως κλειστές (Σχήμα 1.8b, c). Στην περίπτωση αυτή οι τάσεις μεταφέρονται μέσω της περιορισμένης επαφής των επιφανειών. Η φόρτιση σε διάτμηση ή συμπίεση μπορεί να οδηγήσει σε τοπική συγκέντρωση τάσεων. Η αστοχία των προεξοχών της τραχύτητας της ασυνέχειας μπορεί να οδηγήσει σε επαφή μεγαλύτερης επιφάνειας (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9: Ανάπτυξη πλαστικής ζώνης τοπικά στις επιφάνειες επαφής (Wittke, 1990)

Τόσο η θραύση της τραχύτητας όσο και το κλείσιμο των ανοιχτών περιοχών οδηγούν στη παραμόρφωση της μάζας του πετρώματος που περιέχει μία τραχεία, μερικώς ανοιχτή ασυνέχεια.

Όταν το μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus) του υλικού πλήρωσης μιας ασυνέχειας είναι μικρό, σε σχέση με εκείνο του άρρηκτου πετρώματος η συμπιεστότητα κάθετα στη διεύθυνση της ασυνέχειας μπορεί να αυξάνεται σημαντικά (Σχήμα 1.8d). Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα συμπίεσης ενός τέμαχους πετρώματος (Σχήμα 1.10). Η ύπαρξη μιας ασυνέχειας με εμμονή, πληρωμένης με υλικό, πάχους 5 mm, η οποία μεταφέρει ολόκληρο το φορτίο, οδηγεί σε 50 % μεγαλύτερη συμπιεστότητα (Σχήμα 1.10b) σε σχέση με ένα τέμαχος χωρίς ασυνέχεια (Σχήμα 1.10a). Όταν η φόρτιση είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ασυνέχειας (Σχήμα 1.10c) η παραμορφωσιμότητα δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Παρόλο που οι παραμορφώσεις στο άρρηκτο πέτρωμα και το υλικό πλήρωσης είναι οι ίδιες, οι τάσεις κατανέμονται ανάλογα με το μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus) αντίστοιχα.

Οι τάσεις μπορούν να μεταφερθούν από το άρρηκτο πέτρωμα στο υλικό πλήρωσης στην περίπτωση του διατμητικού φορτίου, το οποίο είναι παράλληλο στη διεύθυνση της ασυνέχειας, με βασική προϋπόθεση να μην ξεπεραστεί η αντοχή του υλικού πλήρωσης (Σχήμα 1.10d). Εξαιτίας του μικρού μέτρου Διάτμησης του υλικού πλήρωσης, οι διατμητικές παραμορφώσεις αυξάνονται. Όταν όμως η διατμητική τάση δρα σε επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ασυνέχειας, τότε οι τιμές της διατμητικής τάσης στον άρρηκτο βράχο και το υλικό πλήρωσης του τέμαχους χωρίς ασυνέχεια (Σχήμα 1.10e).

Στην περίπτωση των ανοιχτών και των πληρωμένων με υλικό ασυνεχειών του Σχήματος 1.8f, οι οποίες διακόπτονται από γέφυρες του πετρώματος, πρέπει πρώτα απ' όλα να ληφθούν υπόψη οι ασυνέχειες που είναι ανοιχτές. Υπάρχει μεγάλη επιρροή στην κατανομή των τάσεων δεδομένου ότι το κενό που υπάρχει στις ασυνέχειες δεν μεταφέρει τάσεις. Συνεπώς οι τάσεις πρέπει να στραφούν γύρω της περιοχής της ανοιχτής ασυνέχειας, όπως ακριβώς πραγματοποιείται και στην περίπτωση της κατασκευής ενός υπόγειου ανοίγματος.



**Σχήμα 1.10:** Επιρροή της ασυνέχειας στην παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας (Wittke, 1990)

Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζεται η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας στις ακόλουθες: a) μονοαξονική φόρτιση χωρίς ασυνέχεια, b) μονοαξονική φόρτιση με μία ασυνέχεια κάθετη στη φόρτιση, με υλικό πλήρωσης, πάχους 5 mm, c) μονοαξονική φόρτιση με μία ασυνέχεια παράλληλη στη φόρτιση, d) διατμητική φόρτιση με μία ασυνέχεια, με υλικό πλήρωσης, παράλληλη στην επιφάνεια που ασκείται διατμητική φόρτιση, με υλικό πλήρωσης, e) διατμητική φόρτιση με μία ασυνέχεια, με υλικό πλήρωσης, e) διατμητική φόρτιση με μία ασυνέχεια, με υλικό πλήρωσης, κάθετη στην επιφάνεια που ασκείται διατμητική φόρτιση, κάθετη στην επιφάνεια που ασκείται διατμητική φόρτιση.

## 1.3.2 Παραμορφωσιμότητα Βραχομάζας

• Συμπεριφοράς Τάσεων – Παραμορφώσεων της Βραχομάζας

Για να πραγματοποιηθεί μία ρεαλιστική περιγραφή της συμπεριφοράς των τάσεων – παραμορφώσεων μιας βραχομάζας με ασυνέχειες, πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεγάλη παραμορφωσιμότητα και η μικρή αντοχή των ασυνεχειών, μαζί με την παραμορφωσιμότητα και αντοχή του άρρηκτου πετρώματος. Ένας τρόπος να επιτευχθεί η περιγραφή είναι να προσομοιωθεί η επίδραση της κάθε μιας ασυνέχειας στη βραχομάζα, μαζί με την παραμορφωσιμότητα και την αντοχή της, ξεχωριστά (διακριτά) σε ένα μοντέλο. Αυτό είναι εφικτό με αναλύσεις με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων, όπου υπάρχουν ξεχωριστά στοιχεία που προσομοιώνουν το άρρηκτο πέτρωμα και τις ασυνέχειες. Η ακρίβεια με την οποία ένα μοντέλο απεικονίζει τις πραγματικές συνθήκες εξαρτάται από την ακρίβεια εισαγωγής των δεδομένων για τις ασυνέχειες και το άρρηκτο πετρώμα.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα, το οποίο παρουσιάζει σε συντομία τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση των ασυνεχειών της βραχομάζας.

Στην περίπτωση μιας οικογένειας κλειστών ασυνεχειών, επίπεδων, είτε ομαλών είτε τραχιών, χωρίς διάβρωση κατά μήκος των επιφανειών (Σχήμα 1.8a), η παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας, υπό φορτίο συμπίεσης ή διατμητικό φορτίο, δεν επηρεάζεται εφ' όσον δεν ξεπερνιέται η διατμητική αντοχή της. Οι ίδιες ελαστικές σταθερές συνεπώς ισχύουν και σε μια διακριτή προσομοίωση τέτοιων ασυνεχειών με τα πεπερασμένα στοιχεία, όπως ισχύει για το άρρηκτο πέτρωμα και τη βραχομάζα (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11: Διακριτή προσομοίωση κλειστής και επίπεδης ασυνέχειας (Wittke, 1990)

Τέτοιες ασυνέχειες ανοίγουν υπό εφελκυστική φόρτιση. Το προκύπτον πλάτος του ανοίγματος μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του κριτηρίου αστοχίας της ασυνέχειας. Οι μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις που προκαλούνται με την υπέρβαση της διατμητικής δύναμης των μεμονωμένων ασυνεχειών μπορούν να

ληφθούν με τον ίδιο τρόπο χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του κριτηρίου αστοχίας για την διατμητική αστοχία.

Ακόμη και τα μικρά φορτία που εφαρμόζονται στις ασυνέχειες που δεν είναι πλέον εντελώς κλειστές λόγω της τραχύτητας, μπορούν να οδηγήσουν σε τοπική πλαστικοποίηση στα σημεία της επαφής (Σχήμα 1.9). Εάν επρόκειτο να πραγματοποιηθεί μια μονοαξονική δοκιμή συμπίεσης σε ένα τέμαχος πετρώματος που περιέχει μια τέτοια κάθετη ασυνέχεια στη φόρτιση, θα προέκυπτε μια κυρτή σχέση τάσεων – παραμορφώσεων ως συνέπεια τις πολλαπλών τοπικών αστοχιών (Σχήμα 1.12). Μια τέτοια συμπεριφορά τάσεων – παραμορφώσεων σε μια ασυνέχεια σε ένα διακριτό μοντέλο μπορεί είτε να περιγραφεί από έναν μη γραμμικό καταστατικό νόμο είτε να αναπαρασταθεί με την προσέγγιση της μη γραμμική σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων σε μία γραμμική σχέση. Σε τελευταία ανάλυση, το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) που περιγράφει την περιοχή της ασυνέχειας, εξισώνεται με το τέμνον μέτρο για τη περιοχή των εν λόγω τάσεων (Σχήμα 1.12). Οι πλαστικές παραμορφώσεις προκύπτουν πρωτίστως κατά τη διάρκεια της αρχικής φόρτωσης. Μια γραμμική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων παρέχει μία καλή περιγραφή της παραμορφωσιμότητας μιας τέτοιας ασυνέχειας κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης και της επαναφόρτισης.



Σχήμα 1.12: Μονοαξονική φόρτιση μάζας πετρώματος με μία μερικώς ανοιχτή ασυνέχεια (Wittke, 1990)

Στην περίπτωση των ανώμαλων ασυνεχειών η επιλογή της ανώμαλης γεωμετρίας στο διακριτό μοντέλο δίνεται στο Σχήμα 1.8c. Εντούτοις, είναι συνήθως

ικανοποιητικό να ληφθεί η επιρροή οποιασδήποτε ανωμαλίας υπόψη με την υιοθέτηση ενός κατάλληλου κριτηρίου αστοχίας.

Επίσης είναι δυνατή μία καλή προσομοίωση των ασυνεχειών με πληρωμένο υλικό που είναι είτε κατά ένα μεγάλο μέρος συνεχείς είτε διακόπτονται από το πέτρωμα, όσον αφορά τη συμπεριφορά της γεωμετρίας και των τάσεων – παραμορφώσεων. Ακόμη και οι ασυνέχειες με υλικό πλήρωσης πάχους μόνο μερικών χιλιοστών μπορούν να προσομοιωθούν στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση αντίστοιχα λεπτότερων στοιχεία. Τέτοια στοιχεία με πολύ μικρές διαστάσεις είναι σπάνια επιθυμητές σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, έναντι των μηχανικών δομών στο πέτρωμα, λόγω του απαιτούμενου υψηλού κόστους υπολογισμού. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα να αυξηθεί το πάχος πλήρωσης υλικού, αυξάνοντας το μέτρο διάτμησης αντίστοιχα. Το μέγεθος των παραμορφώσεων και η κατανομή των τάσεων δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου.

## Η επίδραση μιας οικογένειας ασυνεχειών στην παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας στην ελαστική περιοχή

Δεδομένου ότι οι ασυνέχειες μιας οικογένειας είναι κλειστές και δεν υπερβαίνεται η αντοχή τους, θα μεταφέρουν τάσεις με τον ίδιο τρόπο όπως ακριβώς πραγματοποιείται και στον άρρηκτο βράχο. Επομένως μία οικογένεια κλειστών ασυνεχειών δε χρειάζεται ιδιαίτερη μεταχείριση σε ένα ομογενές μοντέλο που περιγράφει την ελαστική συμπεριφορά των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Διαφορετική εικόνα συναντάται στην περίπτωση που η οικογένεια ασυνεχειών δεν είναι εντελώς κλειστή εξαιτίας της τραχύτητας της (Σχήμα 1.8b και Σχήμα 1.9). Στην συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεγάλη παραμορφωσιμότητα, στα σημεία επαφής των επιφανειών της ασυνέχειας, λόγω της τοπικής πλαστικοποίησης. Συνήθως προκύπτει μία μη – γραμμική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων υπό αρχική φόρτιση συμπίεσης και διάτμησης, κάθετα, όπως επίσης και παράλληλα στην οικογένεια των ασυνεχειών, αντίστοιχα. Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων στις άλλες διευθύνσεις φόρτισης είναι γραμμική. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο για το διακριτό μοντέλο, η μη – γραμμικότητα μπορεί να απλοποιηθεί με μία ευθεία γραμμή σε πολλές περιπτώσεις (Σχήμα 1.12). Καθώς η παραμορφωσιμότητα της ασυνέχειας σχετίζεται με ένα ιδεατό πάχος της ασυνέχειας, ως στοιχείο (element) στο διακριτό μοντέλο, τόσο το μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus) της βραχομάζας κάθετα στην οικογένεια, όσο και το μέτρο Διάτμησης της βραχομάζας παράλληλα στις ασυνέχειες, περιορίζονται στο ομογενές μοντέλο. Παρόμοια με τη σχιστότητα, μία οικογένεια ασυνεχειών μέσα στη βραχομάζα, όχι μόνο αναπαριστά ένα επίπεδο μειωμένης αντοχής, αλλά επίσης οδηγεί και σε ανισότροπη συμπεριφορά των τάσεων και των παραμορφώσεων για φορτία μικρότερα της αντοχής της βραχομάζας. Δεδομένου ότι υπάρχει μία μόνο οικογένεια ασυνεχειών στη βραχομάζα και ο άρρηκτος βράχος συμπεριφέρεται ισότροπα, η επιρροή αυτή μπορεί να περιγραφεί ως εγκάρσια ισότροπη συμπεριφορά τάσεων παραμορφώσεων (Σχέση 1.5) που αναφέρεται σε προηγούμενη παράγραφο. Οι πέντε ελαστικές σταθερές είναι συνάρτηση των ελαστικών σταθερών του άρρηκτου πετρώματος, της απόστασης και της τραχύτητας των ασυνεχειών, όπως επίσης και της έντασης της προ – φόρτισης. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη ανισοτροπία, που προκαλείται από τη διάτμηση και τη θραύση της τραχύτητας των ασυνεχειών, συχνά δε είναι τόσο έντονη και δεν επηρεάζεται από τη φέρουσα ικανότητα της βραχομάζας ουσιωδώς.

Στην αντίθετη περίπτωση μιας οικογένειας ασυνεχειών πληρωμένης με έδαφος σε μεγάλη κλίμακα μεγέθους, υφίσταται έντονη ανισοτροπία της ελαστικής συμπεριφοράς τάσεων – παραμορφώσεων. Αυτό συμβαίνει διότι η παραμορφωσιμότητα του υλικού πλήρωσης είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτή του άρρηκτου βράχου με τις ασυνέχειες. Το υλικό πλήρωσης μεταφέρει τάσεις εξαιτίας ενός φορτίου συμπίεσης κάθετα στις ασυνέχειες και παραμορφώνεται σύμφωνα με το μικρότερο μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus).

Εάν υποτεθεί ότι οι ελαστικές σταθερές του άρρηκτου βράχου και του υλικού πλήρωσης είναι γνωστές, μπορούν να υπολογιστούν οι ελαστικές σταθερές της βραχομάζας με τη χρήση των ογκομετρικών ποσοτήτων του άρρηκτου βράχου (α) και του υλικού πλήρωσης (β). Αυτό προϋποθέτει ότι ο άρρηκτος βράχος και το υλικό πλήρωσης συμπεριφέρονται ισότροπα και ελαστικά.

Παρακάτω ακολουθεί το Σχήμα 1.14 που περιγράφει την ανισοτροπία της ελαστικής συμπεριφοράς τάσεων – παραμορφώσεων μιας βραχομάζας με μία οικογένεια ασυνεχειών στη μορφή του ομογενούς μοντέλου. Οι πέντε ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, G<sub>2</sub>,v<sub>1</sub> και v<sub>2</sub> περιγράφουν την ανισοτροπία εξαιτίας ενός ισοτροπικού επιπέδου στο άρρηκτο πέτρωμα.

$$\mathbf{E}_{1} \triangleq \mathbf{E}_{\mathbf{x}'} = \mathbf{a}\mathbf{E}_{\mathrm{IR}} \tag{1.6}$$

$$E_2 \triangleq E_{z'} = \frac{1}{\frac{a}{E_{IR}} + \frac{\beta}{E_{oed F}}}$$
(1.7)

$$G_2 \triangleq G_{z'x'} = \frac{1}{\frac{a}{G_{IR}} + \frac{\beta}{G_{oed F}}}$$
(1.8)

$$v_{1} \triangleq v_{x'y'} = \frac{E_{\text{oed }F}}{aE_{\text{oed }F} + \beta E_{\text{IR}}} v_{\text{IR}}$$
(1.9)

όπου είναι: α = 
$$\frac{d}{d + t_F}$$
 και β =  $\frac{t_F}{d + t_F}$ 

όπου,

d: απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών και

t<sub>F</sub>: πάχος της ασυνέχειας

Το παράδειγμα του Σχήματος 1.13 παραθέτει την επιρροή των ασυνεχειών με εμμονή και με υλικό πλήρωσης στην παραμορφωσιμότητα της βραχομάζας στην ελαστική ζώνη, με χρήση των παραπάνω Σχέσεων 1.6 έως 1.9, παρότι η ογκομετρική ποσότητα είναι μόλις 2 %.





Το Σχήμα 1.14 παρέχει έναν οδηγό των χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς τάσεων – παραμορφώσεων της βραχομάζας στην ελαστική ζώνη που πιθανόν προέρχονται από τη δομή του πετρώματος και τη δομή των ασυνεχειών. Εξαιτίας του ότι στη φύση σπάνια συναντάται το μοντέλο της γραμμικής δομής του πετρώματος, στην Σχήμα 1.14 έχουν επιλεγεί τα μοντέλα της τυχαίας και της επίπεδης δομής. Επιπροσθέτως από το μεγάλο αριθμό των ειδών των ασυνεχειών, επιλέχθηκαν μόνο οι κλειστές ασυνέχειες, με δεδομένη τη μηδενική επιρροή στην ελαστική συμπεριφορά τάσεων – παραμορφώσεων, και εκείνες με υλικό πλήρωσης, οι οποίες έχουν σημαντική επιρροή στην παραμορφωσιμότητα.

Στην Σχήμα 1.14 παρόλα αυτά δεν καλύπτεται η περίπτωση της διασταύρωσης μιας ή περισσότερων οικογενειών ασυνεχειών με υλικό πλήρωσης με τη σχιστότητα, με κλίση διαφορετική του διαστήματος 0° – 90°. Στην περίπτωση αυτή υφίσταται ανισότροπη παραμόρφωση, η οποία δεν δύναται να περιγραφεί επακριβώς από την ορθοτροπία. Κατά κανόνα, με την υιοθέτηση των κατάλληλων ελαστικών σταθερών, είναι εφικτό να γίνει εξαιρετικής ακρίβειας περιγραφή με τη χρήση του ομογενούς μοντέλου.

32

Grain fabric Discontinuity fabric	Random fabric (e.g. sandstone)	Planar fabric
1-3 families of largely closed, smooth discontinuities	isotropic	transversely isotropic
1 family of filled discontinuities, possibly with additional families of largely closed, smooth discontinuities	transversely isotropic	filled discontinuities a) II to schistosity transversely isolropic
2-3 families of filled, mutually perpen- dicular discontinuities, possibly with addition- al families of mainly closed, smooth dis - continuities	orthotropic	(discontinuities    and 1 to schistosity )
linear discontinuity fabric (e.g. basalt)	isotropic or transversely isotropic	

**Σχήμα 1.14:** Παράδειγμα δομής του πετρώματος, των ασυνεχειών και των σχετικών μοντέλων ελαστικής συμπεριφοράς (Wittke, 1990)

## Κεφάλαιο 2

# Κλειστές Λύσεις

#### 2.1 Ελαστικές Λύσεις για Ανισότροπο Πέτρωμα

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Όταν πραγματοποιείται εκσκαφή μιας σήραγγας σε μία βραχομάζα διαταράσσεται η αρχική εντατική κατάσταση, δημιουργώντας τάσεις και μετατοπίσεις. Η ελαστική λύση για τις τάσεις γύρω από κυκλική σήραγγα σε απείρου έκτασης ισότροπο υλικό υπό συνθήκες διαξονικών τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου είναι γνωστή ως λύση του Kirsch.

Για τα ιζηματογενή πετρώματα όπως ο ασβεστόλιθος η συμπεριφορά των παραμορφώσεων είναι ανισότροπη. Το αποτέλεσμα της ανισοτροπίας στην κατανομή των τάσεων στην περιφέρεια κυκλικού ανοίγματος σε εγκάρσια ισότροπο υλικό ερευνήθηκε από τους Green και Taylor.

Οι Hefny και Lo (1999) παρέχουν λύσεις κλειστής μορφής για τις τάσεις και τις μετατοπίσεις στην περιφέρεια κυκλικών σηράγγων που διανοίγονται σε εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα. Με βάση αυτές διερευνούν διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τις τελικές τάσεις και παραμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού λόγου των τάσεων (K<sub>0</sub>) και το βαθμό ανισοτροπίας.

#### 2.1.2 Η Λύση των Hefny & Lo (1999)

Όπως ήδη αναφέρθηκε για την αναπαράσταση της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων σε ένα ισότροπο και ελαστικό υλικό, χρειάζονται μόνο δύο ελαστικές παράμετροι του υλικού. Παρόλα αυτά στην περίπτωση του εγκάρσια ισότροπου υλικού, οι ιδιότητες είναι διαφορετικές στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ εμπλέκονται πέντε ανεξάρτητες παράμετροι στις καταστατικές σχέσεις. Στο Σχήμα 2.1 δίνεται ένα παράδειγμα σήραγγας που έχει ως διεύθυνση εκσκαφής τον άξονα z, έτσι ώστε οι άξονες x και z να είναι στο επίπεδο της ισοτροπίας. Η διατομή βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο x – y που είναι και το επίπεδο της ανισοτροπίας. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ένα πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης, όπου τα ε<sub>z</sub>, ε<sub>xz</sub> και ε<sub>yz</sub> λαμβάνουν μηδενικές τιμές. Συνεπώς οι καταστατικές γίνονται:

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \varepsilon_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$
(2.1)

όπου S<sub>11</sub>, S<sub>22</sub>, S<sub>33</sub>, S<sub>12</sub> και S<sub>21</sub> είναι οι συντελεστές παραμόρφωσης και σχετίζονται με τις παραμέτρους του υλικού ως εξής:

$$S_{11} = \frac{1 - v_h^2}{E_h} , \qquad S_{22} = \frac{1 - v_{hv}v_{vh}}{E_v}$$
$$S_{12} = S_{21} = -\frac{v_{vh}(1 + v_h)}{E_v} , \qquad S_{33} = \frac{1}{G_{vh}}$$

όπου E<sub>v</sub> είναι το μέτρο Ελαστικότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση, E<sub>h</sub> είναι το μέτρο Ελαστικότητας στην οριζόντια διεύθυνση, v<sub>vh</sub> είναι ο λόγος Poisson της επίδρασης κατακόρυφων τάσεων στις οριζόντιες παραμορφώσεις, v<sub>hv</sub> είναι ο λόγος Poisson της επίδρασης οριζόντιων τάσεων στις κατακόρυφες παραμορφώσεις, v<sub>h</sub> είναι ο λόγος Poisson της επίδρασης οριζόντιων τάσεων στις οριζόντιες παραμορφώσεις, και ο λόγος Poisson της επίδρασης οριζόντιες παραμορφώσεις.

Λόγω ενεργειακών θεωρήσεων (Hearmon,1961) (Poulos & Davis, 1974) πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις μεταξύ των ελαστικών παραμέτρων (Hefny & Lo, 1999):

$$\frac{E_{v}}{v_{vh}} = \frac{E_{h}}{v_{hv}}$$

$$1 - v_{h} > 0 , \qquad 1 + v_{h} > 0 , \qquad 1 - v_{h} - 2v_{hv}v_{vh} > 0$$
(2.2)

Να σημειωθεί ότι είναι:

$$E_{h} = E_1$$
,  $E_{v} = E_2$ 

$$v_{vh} = v_2$$
,  $v_{hv} = \frac{E_1}{E_2} v_2$ ,  $v_h = v_1$ 

$$G_{vh} = \frac{\mathrm{E}_1}{2(1+\mathrm{v}_1)}$$



**Σχήμα 2.1:** (a) Εξιδανίκευση του προβλήματος κυκλικού ανοίγματος σε εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα και (b) περιπτώσεις φορτίσεων (Hefny & Lo, 1999) Στην περίπτωση της ισοτροπίας οι παρακάτω συνθήκες:

$$E_h = E_v = E$$
 και  $v_{hv} = v_{vh} = v_h = v$  (2.3 και 2.4)

$$G_{\rm vh} = G = \frac{E}{2(1+v)}$$
 (2.5)

Με τη θεώρηση του παραδείγματος του Σχήματος 2.1, όπου μία σήραγγα κατασκευάζεται σε εγκάρσια ισότροπη βραχομάζα με αρχικές φορτίσεις P<sub>v</sub> και P<sub>h</sub>, η κλειστής μορφής λύση για τις εφαπτομενικές τάσεις στην περιφέρεια της κυκλικής σήραγγας είναι:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2 + 2(\gamma_1 + \gamma_2)^2 - 2\gamma_1^2 \gamma_2^2 - 4(\gamma_1 + \gamma_2) \cos 2\theta}{(1 + \gamma_1^2 - 2\gamma_1 \cos 2\theta)(1 + \gamma_2^2 - 2\gamma_2 \cos 2\theta)} P_0 + \frac{4(\gamma_1 + \gamma_2) - 4(1 + \gamma_1 \gamma_2) \cos 2\theta}{(1 + \gamma_1^2 - 2\gamma_1 \cos 2\theta)(1 + \gamma_2^2 - 2\gamma_2 \cos 2\theta)} Q_0$$
(2.6)

όπου P<sub>0</sub> είναι η μέση τάση του φυσικού εντατικού πεδίου ((P<sub>h</sub> + P<sub>v</sub>)/2) και Q<sub>0</sub> είναι η αποκλίνουσα τάση του φυσικού εντατικού πεδίου ((P<sub>h</sub> - P<sub>v</sub>)/2). Ακόμα είναι:

$$\begin{split} \gamma_1 &= \frac{\alpha_1 - 1}{\alpha_1 + 1} , \qquad |\gamma_1| < 1 , \qquad \gamma_2 = \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_2 + 1} , \qquad |\gamma_2| < 1 \\ \alpha_1^2 \alpha_2^2 &= \frac{S_{11}}{S_{22}} , \qquad a_1^2 + a_2^2 = \frac{2S_{12} + S_{33}}{S_{22}} \end{split}$$

Οι ακτινικές και οι εφαπτομενικές μετατοπίσεις δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$U_{a} = \frac{a}{2(\gamma_{1} - \gamma_{2})} \{P_{0}(\gamma_{2}\rho_{1} - \gamma_{1}\rho_{2}) + Q_{0}(\rho_{1} - \rho_{2}) + [P_{0}(\gamma_{2}\delta_{1} - \gamma_{1}\delta_{2}) + Q_{0}(\delta_{1} - \delta_{2})]cos2\theta\}$$
(2.7)

$$U_{\theta} = \frac{a}{2(\gamma_1 - \gamma_2)} [P_0(\gamma_1 \delta_2 - \gamma_2 \delta_1) + Q_0(\delta_2 - \delta_1) \sin 2\theta]$$
(2.8)

Παρόλα αυτά, οι τύποι που αφορούν στις μετατοπίσεις δε δύναται να αξιοποιηθούν, καθώς δεν κατέστη δυνατός ο εντοπισμός των απαραίτητων εξισώσεων στη βιβλιογραφία, οι οποίοι βοηθούν ώστε να χρησιμοποιηθούν οι δύο παραπάνω τύποι.

Ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία διατυπώνουν οι Hefny & Lo με βάση την αναλυτική τους λύση, συνοψίζονται στα εξής:

- Η επιρροή του v<sub>h</sub> τόσο στις εφαπτομενικές τάσεις όσο και στις ακτινικές μετατοπίσεις είναι αμελητέα.
- Στη στέψη και το δάπεδο το μέγεθος και η διεύθυνση της ακτινικής μετατόπισης επηρεάζονται από την τιμή του v<sub>hv</sub>.
- Οι θλιπτικές τάσεις στην στέψη αυξάνονται με την αύξηση του λόγου E<sub>h</sub>/G<sub>vh</sub>. Η ακτινική μετατόπιση γύρω από τη σήραγγα επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την τιμή του λόγου E<sub>h</sub>/G<sub>vh</sub>, αυξανόμενη σημαντικά όταν αυξάνεται ο λόγος E<sub>h</sub>/G<sub>vh</sub>.
- Καθώς η τιμή του Κ<sub>0</sub> αυξάνει, η συγκέντρωση των θλιπτικών τάσεων στη στέψη και το δάπεδο αυξάνονται και οι τάσεις στην παρειά μειώνονται και μεταβάλλονται σε εφελκυστικές. Με την αύξηση του Κ<sub>0</sub> οι ακτινικές μετατοπίσεις στην παρειά αυξάνονται. Αντίθετα στη στέψη οι μετατοπίσεις μειώνονται με την αύξηση του Κ<sub>0</sub>, ενώ από κάποιο σημείο και ύστερα λαμβάνουν φορά προς το πέτρωμα.
- Η ακτινική μετατόπιση στην παρειά δεν επηρεάζεται από το λόγο E<sub>h</sub>/E<sub>v</sub> ανεξαρτήτως τιμής του K<sub>0</sub>. Όμως το μέγεθος και η διεύθυνση των ακτινικών μετατοπίσεων στη στέψη και στο δάπεδο επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την τιμή του λόγου E<sub>h</sub>/E<sub>v</sub>, ιδιαίτερα όταν η τιμή του v<sub>hv</sub> είναι μεγαλύτερη του 0,2.

## 2.2 Ζώνες Ολίσθησης Ασυνεχειών Γύρω από τη Σήραγγα

#### 2.2.1 Γεωμετρική λύση Goodman

Στη βιβλιογραφία αναζητήθηκε μία μέθοδος εκτίμησης της αστοχίας που προκύπτει κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας στην οποία υπάρχει παρουσία μιας

οικογένειας ασυνεχειών με γνωστή κλίση. Μία γραφική λύση του παραπάνω προβλήματος έχει δοθεί από τον Goodman (1989). Παρακάτω δίνεται στο Σχήμα 2.2 η γραφική λύση που προτείνεται από τον Goodman.



Σχήμα 2.2: Γραφική λύση και μεθοδολογία Goodman (1989)

Στη μεθοδολογία αυτή με γνωστή την κλίση των ασυνεχειών φέρεται η κάθετος σε αυτές, όπως φαίνεται στο παραπάνω δεξιά σχήμα. Έπειτα σε γωνία ίση με τη γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών (φ<sub>j</sub>) σχεδιάζονται οι δύο ευθείες ΑΑ και BB. Οι ευθείες αυτές μεταφέρονται παράλληλα στις παρειές της σήραγγας και προκύπτει η παραπάνω αριστερή εικόνα. Συνεπώς, με τη μέθοδο αυτή μπορούν να οριστούν οι ζώνες ολίσθησης στην περιφέρεια μιας σήραγγας (Goodman, 1989).

## 2.2.2 Αναλυτική Λύση Daemen (1983)

Ο Daemen (1983) παρουσίασε μία μέθοδο υπολογισμού των ζωνών ολίσθησης και το βάθος που επεκτείνονται στη βραχομάζα, για παράλληλες ασυνέχειες προς τον άξονα κυκλικής σήραγγας. Σύμφωνα με τον Daemen αρχικά πραγματοποιείται ο υπολογισμός μίας ελαστικής κατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα. Σε επόμενο στάδιο υπολογίζεται η διατμητική και η ορθή τάση πάνω στο επίπεδο των ασυνεχειών και συγκρίνεται με την τιμή της διατμητικής αντοχής, θεωρώντας ένα

κριτήριο Mohr – Coulomb για της ασυνέχειες. Κατά τη σύγκριση όπου η τιμή που υπολογίστηκε υπερβεί τη διατμητική αντοχή θεωρείται ότι η ασυνέχεια ολισθαίνει.



**Σχήμα 2.3:** Κυκλικό άνοιγμα σε διαξονικό εντατικό πεδίο (S<sub>h</sub>, S<sub>v</sub>) με σύστημα ασυνεχειών με αυθαίρετη κλίση (α) και διεύθυνση (Daemen, 1983)

Αναλυτικά σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι τύποι του Kirsch για την ακτινική σ<sub>r</sub>, την εφαπτομενική σ<sub>θ</sub> και τη διατμητική τάση τ<sub>rθ</sub> γύρω από το άνοιγμα, σε ομογενή και ισότροπη βραχομάζας, για την περίπτωση υδροστατικού φυσικού εντατικού πεδίου μπορούν να απλοποιηθούν στους εξής:

$$\sigma_{r} = P_{0} \cdot \left(1 - \frac{R^{2}}{r^{2}}\right) + P_{i} \cdot \frac{R^{2}}{r^{2}} , \sigma_{\theta} = P_{0} \cdot \left(1 + \frac{R^{2}}{r^{2}}\right) - P_{i} \cdot \frac{R^{2}}{r^{2}} \quad \text{kal} \tau_{r\theta} = 0 \quad (2.9)$$

όπου,

r, θ: ακτινικές και γωνιακές συντεταγμένες

R: ακτίνα της σήραγγας

r: απόσταση από το κέντρο της σήραγγας

Ρ₀: πίεση

Ρ<sub>i</sub>: εσωτερική πίεση (υποστήριξης)

Η ορθή και η διατμητική τάση στο επίπεδο των ασυνεχειών υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\rm r} + \sigma_{\theta}}{2} - \frac{\sigma_{\rm r} - \sigma_{\theta}}{2} \cos 2(a - \theta)$$
(2.10)

$$\tau = -\frac{\sigma_{\rm r} - \sigma_{\theta}}{2} \cos 2(a - \theta) \tag{2.11}$$

Αντικαθιστώντας στο κριτήριο αστοχίας (ολίσθησης) των ασυνεχειών:

$$|\tau| = c + tan\varphi \cdot \sigma \tag{2.12}$$

προκύπτει η σχέση 2.13 για τον υπολογισμό του βάθους που επεκτείνεται η αστοχία στη βραχομάζα:

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{(P_0 - P_t)[S_e \cos 2(\alpha - \theta) \tan \phi \pm \sin 2(\alpha - \theta)]}{-S_e(c + P_0 \tan \phi)}$$
(2.13)

όπου,

Se: συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης ασυνεχειών (όριο τ / τ)

α: κλίση ασυνεχειών

φ: εσωτερική γωνία τριβής

c: συνοχή

Το μέγιστο βάθος έκτασης των ζωνών ολίσθησης παρατηρείται σε γωνία θ, η οποία υπολογίζεται από τη Σχέση 2.11:

$$\theta = \alpha \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tag{2.14}$$

Το μέγιστο βάθος της ζώνης ολίσθησης δίνεται από την Σχέση 2.12:

$$\frac{R_{\text{max}}}{R} = \left(\frac{\left(1 - \frac{P_i}{P_0}\right)}{\frac{c \cos\varphi}{P_0} + \sin\varphi}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(2.15)



Σχήμα 2.4: Ζώνες ολίσθησης γύρω από κυκλική σήραγγα (Daemen, 1983)

Το παραπάνω σχήμα αφορά υδροστατικό εντατικό πεδίο P για σύστημα ασυνεχειών με κλίση α. Σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στη γραμμοσκιασμένη περιοχή η διατμητική τάση ξεπερνά τη διατμητική αντοχή. Οι ζώνες ολίσθησης είναι συμμετρικές ως προς την κλίση α των ασυνεχειών με το κέντρο της σήραγγας. Το βάθος της ζώνης ολίσθησης είναι ανεξάρτητο της γωνίας της κλίσης. Η διεύθυνση των ζωνών ολίσθησης καθορίζεται από την κλίση α και τη γωνία εσωτερικής τριβής φ. Οι αριθμητικές τιμές στο παραπάνω σχήμα είναι:  $\alpha = 40^\circ$ ,  $P_1/P_0 = 0$ ,  $c/P_0 = 0.01$ ,  $\phi = 20^\circ$ 

Η απαραίτητη πίεση υποστήριξης (P<sub>i</sub>) για να αποφευχθεί η ολίσθηση υπολογίζεται από την Σχέση 2.13:

$$\frac{P_i}{P_0} = 1 - \left(\frac{c}{P_0}\cos\varphi + \sin\varphi\right)$$
(2.16)

43



**Σχήμα 2.5:** Ζώνες ολίσθησης (συνεχείς γραμμές) και συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης ασυνεχειών (διακεκομμένες γραμμές) (Daemen, 1983)

Το Σχήμα 2.5 αφορά κυκλική σήραγγα που βρίσκεται παράλληλα σε σύστημα ασυνεχειών. Ο συντελεστής S<sub>e</sub>, λόγος της διατμητικής τάσης προς τη διατμητική αντοχή δίνεται από το περίγραμμα Οι αριθμητικές τιμές στο παραπάνω σχήμα είναι ίδιες με τις προηγούμενες.



Σχήμα 2.6: Ζώνες ολίσθησης σε υδροστατικό πεδίο τάσεων P (Daemen, 1983)

Στο παραπάνω σχήμα οι ασυνέχειες έχουν κλίση α = 60°. Τα αποτελέσματα για την κάθε ομάδα παραμέτρων δίνονται μόνο σε ένα τεταρτημόριο που δημιουργείται από τις ασυνέχειες.

ΜΕΡΟΣ Β: ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

# Λογισμικό Προσομοίωσης

#### 3.1 Εισαγωγή

Οι εμπειρικές και οι αναλυτικές μέθοδοι (Timoshenko και Goodier, 1951), που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για την επίλυση διαφόρων γεωμηχανικών προβλημάτων ευστάθειας, τείνουν μετά την ανάπτυξη των υπολογιστών από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 να παραμεριστούν έναντι των αριθμητικών μεθόδων. Οι αριθμητικές μέθοδοι προσφέρουν κατά κανόνα μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτητα για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων (Hook et al., 1991).

Αυτό συμβαίνει, διότι οι αριθμητικές μέθοδοι, μέσω κατάλληλα επιλεγομένων κατά περίπτωση προτύπων (μοντέλων), επιτυγχάνουν να προσεγγίσουν καλύτερα τη συμπεριφορά του επί τόπου πετρώματος με παρόντα όλα τα δομικά του χαρακτηριστικά.

Διάφορες αριθμητικές μέθοδοι (Αγιουτάντης, 1995), βασιζόμενες στις υπολογιστικές δυνατότητες των προσωπικών υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Οι υπόψη μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε εκείνες που:

α) θεωρούν το πέτρωμα είτε ως συνεχές υλικό ως έχει είτε μετά από
 κατάλληλους μετασχηματισμούς ως ισοδύναμο συνεχές υλικό,

β) θεωρούν το πέτρωμα καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής εργασίας ως ασυνεχές υλικό συνιστάμενο από ένα άθροισμα διακεκριμένων στοιχείων, που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες (Fairhurst et al, 1990) και

γ) κάνουν χρήση των προηγούμενων μεθόδων και συνιστούν υβριδικές
 μεθόδους.

49

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Methods – FEM), των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Methods – FDM) και των Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Methods). Στη δεύτερη ανήκει η μέθοδος των Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method – DEM), ενώ στην τρίτη κατηγορία ανήκουν διάφορες συνδυαστικές μέθοδοι, όπως λόγου χάρη εκείνη των Συνοριακών και Πεπερασμένων Στοιχείων (BE / FE).

Στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (FDM) το πέτρωμα θεωρείται ως συνεχές υλικό όπου τα ογκοτεμάχιά του και οι ασυνέχειές του πρέπει να αντιπροσωπευθούν από ένα ισοδύναμο συνεχές υλικό, στο οποίο έχουν ενσωματωθεί και οι ιδιότητες των ασυνεχειών.

#### 3.2 Λογισμικό Προσομοίωσης FLAC 6.0

Το FLAC 6.0 (2008) 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 μπορεί να παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά.

Τα υλικά αυτά προσομοιώνονται από στοιχεία (elements) ή ζώνες (zones), οι οποίες στο σύνολό τους αποτελούν έναν κάνναβο (grid), ο οποίος ρυθμίζεται από το χρήστη ώστε να ταιριάζει στο αντικείμενο μελέτης. Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με καθορισμένο ελαστικό (elastic) ή ελαστοπλαστικό μοντέλο (κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb). Για την προσομοίωση της εκσκαφής δίνεται η δυνατότητα στις ζώνες του καννάβου των πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες αντιστοιχούν στην εκσκαφή, να αποδοθεί το μοντέλο "null" το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι οι ζώνες δε συμμετέχουν στην υπολογιστική διαδικασία. Παρόλα αυτά είναι δυνατή η επαναφορά τους από το χρήστη σε επόμενο υπολογιστικό στάδιο.

Τα μεγέθη δυνάμεων (forces), ταχυτήτων (velocities) και μετατοπίσεων (displacements) αναφέρονται στους κόμβους (gridpoints) του καννάβου, ενώ τα

μεγέθη τάσεων (stresses), πιέσεων (pressure) και ιδιοτήτων των υλικών (material properties) στις ζώνες (zones) του.

Σημαντικό στοιχείο του FLAC 6.0 (2008) είναι η δυνατότητα να προσομοιώνει την αποτόνωση του πετρώματος ελεγχόμενα μέσω του συντελεστή αποτόνωσης (relaxation factor), με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού FISH.

Ο διδιάστατος κώδικας FLAC προσομοιώνει τη μηχανική συμπεριφορά δομών παραμορφωμένων γεωυλικών με καθορισμένες καταστατικές εξισώσεις, στις οποίες η παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού περιγράφεται από αλγεβρικές εξισώσεις τους τύπου:

$$\dot{\mathbf{e}}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathrm{d}\,\dot{\mathbf{u}}_i}{\mathrm{d}\,\mathbf{x}_j} + \frac{\mathrm{d}\,\dot{\mathbf{u}}_j}{\mathrm{d}\,\mathbf{x}_i} \right) \tag{3.1}$$

όπου,

 $\dot{\mathbf{e}}_{ij}=$ οι συνιστώσες της παραμόρφωσης,

 $\dot{u}_i =$  οι συνιστώσες της ταχύτητας,

Οι καταστατικοί νόμοι είναι της μορφής:

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + \left\{ \delta_{ij} \left( K - \frac{2}{3} G \right) \dot{e}_{kk} + 2G \dot{e}_{ij} \right\} \Delta t$$
(3.2)

όπου,

 $δ_{ij} = δ έ λ τ α τ ο υ Kronecker,$ 

Δt = χρονικό βήμα,

G, K = τα μέτρα διάτμησης και συμπίεσης, αντίστοιχα

#### 3.2.1 Γενική Περιγραφή Κατασκευής Μοντέλων Προσομοίωσης

Στη διαδικασία δημιουργίας των μοντέλων προσομοίωσης πραγματοποιείται ένας αριθμός βημάτων μέχρι και την επίλυση τους από το λογισμικό. Η διαδικασία που αναλύεται παρακάτω ακολουθήθηκε σχεδόν όμοια σε όλα τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στην πρώτη φάση της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, χρησιμοποιείται ένας συγκεκριμένος τύπος καννάβου από τη «βιβλιοθήκη» (Fish Library) του λογισμικού με την ονομασία "Donut". Αυτός ο κάνναβος δημιουργεί κυκλικό άνοιγμα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που επιλέγονται από το χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Παρακάτω δίνεται στο Σχήμα 3.1 μία εικόνα του πίνακα εισαγωγής των παραμέτρων του καννάβου του κυκλικού ανοίγματος.

🕫 Fish input	X
Information	Parameters
FILE: Donut. fis DIAGRAM: donut. gif NAME: donut NOTES :	rmin 5.0 rmul 40.0 gratio 1.3 xcenter 0.0 ycenter 0.0 izone 20 jzone 60 minangle 0 deltaangle 360
deltaangle:Angle range, 90=quarter, 3	60=full
	OK Cancel

Σχήμα 3.1: Παράμετροι κυκλικού ανοίγματος

Η κάθε παράμετρος που εισάγεται σε αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντική και κρίνει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν μετά την επίλυση του μοντέλου. Παρακάτω αναλύεται η κάθε μία παράμετρος που αναφέρεται στην Σχήμα 3.1.

<u>rmin</u>: ακτίνα του κυκλικού ανοίγματος
 rmul: πολλαπλασιασμός της ακτίνας "rmin" ώστε να προκύψει η ακτίνα του εξωτερικού ορίου
 <u>gratio</u>: συντελεστής πύκνωσης καννάβου
 <u>xcenter</u>: οριζόντια θέση του κέντρου του κυκλικού ανοίγματος
 <u>ycenter</u>: κατακόρυφη θέση του κέντρου του κυκλικού ανοίγματος
 <u>izone</u>: αριθμός στοιχείων περιμετρικά του κυκλικού ανοίγματος
minangle: αρχική γωνία ανάπτυξης του κυκλικού ανοίγματος deltaangle: γωνιακή ανάπτυξη του καννάβου

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι στη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε και το τεταρτοκύκλιο του παραπάνω καννάβου δίνοντας τιμή στην παράμετρο "deltaangle" ίση με 90.

Στη συνέχεια εισάγονται τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας μέσω του λογισμικού. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα προσομοιώματα επιλέχθηκαν σε μεγάλο βαθμό οι ιδιότητες της βραχομάζας της υπό μελέτη σήραγγας Καλυδώνας (Ιόνια Οδός), καθότι εξετάζεται σε επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας ως Μελέτη Περίπτωσης. Ο βασικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται παρακάτω:

Ελαστικές Παράμετροι Πετρώματος

- Πυκνότητα γ = 2600 kg / m<sup>3</sup>
- Μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus) E = 10 GPa
- Λόγος Poisson v = 0,3

#### Παράμετροι Αντοχής Ασυνεχειών

- Συνοχή c = 0 kPa
- Γωνία Εσωτερικής Τριβής
  - ο φ<sub>1</sub> = 30°
  - ο φ<sub>2</sub> = 40°
  - $\circ \phi_3 = 50^\circ$

Στη διάρκεια των προσομοιώσεων κρίθηκε αναγκαίο να εξεταστούν οι παραπάνω ιδιότητες, με εξαίρεση του ειδικού βάρους, στην περίπτωση μεταβολής των τιμών τους για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων των αναλύσεων.

Τα χαρακτηριστικά αυτά εμφανίζονται και στο Σχήμα 3.2. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κυκλικό άνοιγμα είναι ήδη προεπιλεγμένο ως εκσκαφθέν υλικό (null).

Define Material		11/10/	ĸ
Class Rock			
Name Flysch			
Mass-Density			
[kg/m3] 2600.0			
Model			
🔘 Elastic	Mohr-Coulomb	Obiquitous	
Elastic Properties	Plastic Properties	Joint Properties	
Bulk modulus [Pa] 8.33333E9	Cohesion [Pa] 0.0	Joint angle (Deg.) 0.0	
Shear modulus [Pa] 3.84615E9	Tension [Pa] 0.0	JCohesion [Pa] 0.0	
Alternate	Angles: (Degrees)	JTension [Pa] 0.0	
Elastic modulus [Pa] 9.9999898E9	Friction angle 0.0	JFriction angle (Deg.) 40.0	
Poisson's ratio 0.3000001	Dilation angle 0.0	JDilation angle (Deg.) 0.0	
	OK Cancel Help	]	

Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικά της βραχομάζας

Το επόμενο βήμα κατά τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης είναι η εισαγωγή των ασκούμενων τάσεων. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν εφαρμόστηκαν αρχικές τάσεις ίσες με 5 MPa στους άξονες xx, yy και zz.

Πριν την επίλυση του μοντέλου ρυθμίζονται, επίσης, τα όρια της ανάλυσης. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 3.3 τα όρια αφορούν είτε στον αριθμό βημάτων που θα πραγματοποιηθούν (solve steps = 5.000.000) είτε στο συντελεστή επίτευξης επίλυσης, ο οποίος αποτελεί το λόγο της μέγιστης μη εξισορροπημένης δύναμης σε έναν κόμβο του καννάβου τη δεδομένη στιγμή του υπολογιστικού βήματος προς τη μέγιστη αρχική δύναμη (steady – state ratio = = 1,0 \* 10<sup>-5</sup>). Οι υπόλοιπες επιλογές δεν μεταβάλλονται από τις προεπιλεγμένες τιμές του λογισμικού.

Solve settings	23
Solve limits	
Solve <step> limit [steps] 5000000</step>	
Solve Fos <fos_step> limit [steps] 50000</fos_step>	
Elapsed time <clock> [minutes] 1440.0</clock>	
Steady-state ratio <sratio> 1.0E-5</sratio>	
Out-of-balance <force>[N] 0.0</force>	
Execute Cancel Help	]

Σχήμα 3.3: Επιλογές επίλυσης

Το τελευταίο βήμα της προσομοίωσης είναι η επίλυση του μοντέλου από όπου και εξάγονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης. Μέσω του λογισμικού δύναται η δυνατότητα στο χρήστη να αποτυπωθούν γραφικά τα αποτελέσματα που αφορούν πληθώρα χαρακτηριστικών της προσομοίωσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες των αποτελεσμάτων που αφορούν τις προσομοιώσεις για γωνία εσωτερικής τριβής 40°.



Σχήμα 3.4: Αποτέλεσμα επίλυσης αραιού καννάβου (φ = 40°)



**Σχήμα 3.5:** Αποτέλεσμα επίλυσης πυκνού καννάβου (φ = 40°)

Στο Σχήμα 3.5, όπως και σε όλες τις εικόνες από το FLAC, αξίζει να σημειωθεί ότι εμφανίζονται τρεις διαφορετικοί χρωματισμοί στα στοιχεία ανάλυσης. Τα στοιχεία που αστόχησαν σε κάποιο προηγούμενο υπολογιστικό βήμα της ανάλυσης παρουσιάζονται με το σκουρόχρωμο πράσινο, ενώ τα στοιχεία που αστοχούν το τελευταίο βήμα της ανάλυσης παρουσιάζονται με ανοιχτόχρωμο πράσινο. Τα υπόλοιπα στοιχεία βρίσκονται στην ελαστική φάση (πορτοκαλί χρώμα).

#### 3.2.2 Περιγραφή Μοντέλου Ubiquitous Joint

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



**Σχήμα 3.6:** Παρουσία διεύθυνσης ασυνέχειας με κλίση θ σε υλικό Mohr – Coulomb στο αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων (x,y,x',y') (FLAC, 2008)

Οι συνιστώσες των τάσεων στο καθολικό σύστημα αξόνων συμβολίζονται ως σ<sub>ij</sub>. Οι συνιστώσες των τάσεων στο τοπικό σύστημα αξόνων, που καθορίζονται από τη γωνία κλίσης των ασυνεχειών, συμβολίζονται ως σ´<sub>ij</sub> και υπολογίζονται από τις Σχέσεις 3.3 έως 3.6.

$$\sigma_{11}' = \sigma_{11} \cos^2 \theta + 2\sigma_{12} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{22} \sin^2 \theta$$
(3.3)

$$\sigma_{22}' = \sigma_{11} \sin^2 \theta - 2\sigma_{12} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{22} \cos^2 \theta \tag{3.4}$$

$$\sigma_{33}' = \sigma_{33} \tag{3.5}$$

$$\sigma_{12}' = -(\sigma_{11} - \sigma_{11})\sin\theta\cos\theta + \sigma_{12}(\cos^2\theta - \sin^2\theta)$$
(3.6)

όπου,

θ είναι η γωνία της ασυνέχειας μετρημένη σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού από τον xx'

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η αστοχία μπορεί να συμβεί είτε στο υλικό του πετρώματος είτε κατά μήκος των ασυνεχειών ή ακόμα και στα δύο, αναλόγως του εντατικού πεδίου, του προσανατολισμού των ασυνεχειών και των χαρακτηριστικών που έχουν δοθεί στις ασυνέχειες και στο υλικό του πετρώματος. Το κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Κατά τη διαδικασία επίλυσης του FLAC χρησιμοποιείται η τεχνική στην οποία εντοπίζεται αρχικά η γενική αστοχία και έπειτα εφαρμόζονται οι ανάλογες πλαστικές διορθώσεις, όπως περιγράφεται στο μοντέλο Mohr – Coulomb του FLAC. Οι νέες τάσεις αναλύονται για την περίπτωση της αστοχίας των ασυνεχειών και ανανεώνονται αναλόγως. Το κριτήριο αστοχίας που αφορά στις ασυνέχειες είναι μία μορφή του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb με αποκοπή της εφελκυστικής αντοχής της ασυνέχειας.



Σχήμα 3.7: Κριτήριο αστοχίας της ασυνέχειας στο λογισμικό (FLAC, 2008)

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

$$f^{s} = -\tau - \sigma'_{22} \tan \varphi_{j} + c_{j}$$
(3.7)

και από το σημείο B στο C από το κριτήριο αστοχίας σε εφελκυσμό όταν f<sup>t</sup> = 0, όπου είναι

$$f^{t} = \sigma_{i}^{t} - \sigma_{22}^{\prime} \tag{3.8}$$

όπου φ<sub>j</sub>, c<sub>j</sub>, σ<sub>j</sub><sup>t</sup> είναι η γωνία εσωτερικής τριβής, η συνοχή και η αντοχή σε εφελκυσμό της ασυνέχειας, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ασυνέχεια με μη μηδενική τιμή εσωτερικής τριβής η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό δίνεται από την Σχέση 3.7.

$$\sigma_{j,\max}^{t} = \frac{c_{j}}{\tan\varphi_{j}}$$
(3.9)

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιώματα.

<u>bulk mod:</u> ελαστικό μέτρο συμπίεσης, K <u>shear mod:</u> ελαστικό μέτρο διάτμησης, G <u>cohesion:</u> συνοχή του υλικού του πετρώματος <u>density:</u> πυκνότητα του υλικού του πετρώματος <u>dilation:</u> γωνία διασταλτικότητας <u>friction:</u> γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού του πετρώματος <u>tension:</u> αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού του πετρώματος <u>jangle:</u> γωνία κλίσης των ασυνεχειών μετρημένη αριστερόστροφα από τον xx´ <u>jcohesion:</u> συνοχή των ασυνεχειών <u>jdilation:</u> διασταλτικότητα των ασυνεχειών <u>jfriction:</u> γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών <u>jtension:</u> αντοχή σε εφελκυσμό των ασυνεχειών

#### 3.3 Περιγραφή Δομικών Στοιχείων Υποστήριξης

Στις αναλύσεις των μοντέλων προσομοίωσης, οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω, χρησιμοποιήθηκαν δομικά στοιχεία υποστήριξης του λογισμικού FLAC. Τα στοιχεία αυτά προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των αγκυρίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που τοποθετούνται κατά τη φάση της εκσκαφής. Τα στοιχεία του FLAC που χρησιμοποιούνται είναι τα "Rockbolts" και "Liner".

"Rockbolt" Element

Για την προσομοίωση των αγκυρίων χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά στοιχεία με δυνατότητα μεταφοράς ορθών και διατμητικών δυνάμεων καθώς και ροπών κάμψης στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών. Η σύνδεση με το πλέγμα γίνεται μέσω ελατηρίων. Τα στοιχεία μπορούν να διαρρεύσουν αξονικά τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό. Η θραύση του στοιχείου προσομοιώνεται με βάση ένα όριο εφελκυστικής τροπής. Σε κάθε κόμβο η τροπή υπολογίζεται προσθέτοντας την αξονική και την καμπτική πλαστική τροπή. Εάν η τροπή ξεπεράσει το όριο θραύσης οι δυνάμεις και οι ροπές του στοιχείου μηδενίζονται και το στοιχείο θεωρείται ότι αστοχεί. Το στοιχείο παρέχει τη δυνατότητα μείωσης των χαρακτηριστικών σύνδεσης με το πλέγμα.

• "Liner" Element

Για την προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά στοιχεία δοκού με τρεις βαθμούς ελευθερίας (μεταφορική κατά x, μεταφορική κατά y και περιστροφή) σε κάθε κόμβο. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να ενώνονται μεταξύ τους και να προσαρμόζονται στους κόμβους του πλέγματος των πεπερασμένων διαφορών. Προσομοιώνουν δομικά στοιχεία στα οποία η καμπτική αντίσταση και η διαρροή σε κάμψη και σε θλίψη είναι ουσιώδη για την κατασκευή.

Η συμπεριφορά του ελαστοπλαστικού μοντέλου που μπορεί να αντιστοιχηθεί στο στοιχείο δοκού "liner" περιγράφεται από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης του Σχήματος 3.8. Στο διάγραμμα αυτό εικονίζεται η μέγιστη δύναμη που μπορεί να εφαρμοστεί σε μία τυπική διατομή συναρτήσει της ασκούμενης ροπής κάμψης.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ροπών κάμψης με θλιπτικές και εφελκυστικές δυνάμεις (FLAC, 2008)

## 3.4 Σύγκριση Μοντέλων Προσομοίωσης με Θεωρία Goodman και Daemen

Με βάση τις θεωρίες που προτάθηκαν από τον Goodman, μέσω της γραφικής λύσης, και του Daemen, μέσω της κλειστής λύσης που παρουσίασε, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις ανάλυσεις προσομοίωσης στο FLAC.

Αρχικά, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μία σειρά προσομοιώσεων της αποτόνωσης της βραχομάζας. Στην ανάλυση αυτή τέθηκε αρχικό εντατικό πεδίο (P<sub>0</sub>) ίσο με 5 MPa με γωνία εσωτερικής τριβής (φ) 40° και μηδενική συνοχή (c). Η εσωτερική πίεση (Pi) επιλέχθηκε να λαμβάνει μειούμενες τιμές από 5 MPa έως 0 MPa. Λήφθηκαν συνολικά 12 τιμές εσωτερικής πίεσης συμπεριλαμβανομένης και της αρχικής εντατικής κατάστασης. Η πρώτη τιμή εσωτερικής πίεσης υπολογίστηκε σύμφωνα με τη Σχέση 2.13 που προβλέπεται από τον Daemen για την απαραίτητη πίεση υποστήριξης (Pi) για την αποφυγή ολισθήσεων σε κυκλική σήραγγα. Οι υπόλοιπες τιμές υπολογίζονται ανάλογα με απομοίωση της πρώτης τιμής εσωτερικής πίεσης κατά 10 %. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες που προκύπτουν από τις αναλύσεις, μαζί με τις περιοχές που προβλέπονται από τον Goodman και από τον Daemen, για διάφορες τιμές P<sub>i</sub>. Με τη λύση του Daemen μπορούμε να βρούμε το εύρος των ζωνών ολίσθησης για κάθε Pi / Po. Συγκεκριμένα για τη γραφική λύση του Goodman στα παρακάτω προσομοιώματα προβλέπεται η δημιουργία ζωνών αστάθειας στην οροφή και το δάπεδο της σήραγγας, και τη δημιουργία ζωνών ευστάθειας στις παρειές της σήραγγας.



Σχήμα 3.9: Εσωτερική πίεση (P<sub>i</sub>) ίση με 1.62 MPa

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, όπου γίνεται η πρώτη εμφάνιση στοιχείων που αστοχούν κατά την υπολογιστική ανάλυση στο FLAC.



Σχήμα 3.10: Εσωτερική πίεση (P<sub>i</sub>) ίση με 1.26 MPa

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ανάλυσης που προέκυψε με μείωση της εσωτερικής πίεσης. Εξαιτίας της μείωσης της Ρ<sub>i</sub> πραγματοποιείται επέκταση της ζώνης αστοχίας σε μεγαλύτερο βάθος.



Σχήμα 3.11: Εσωτερική πίεση (P<sub>i</sub>) ίση με 1.08 MPa

Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζεται και με περαιτέρω μείωση της εσωτερικής πίεσης P<sub>i</sub>.



Σχήμα 3.12: Εσωτερική πίεση (P<sub>i</sub>) ίση με 0.90 MPa



Σχήμα 3.13: Μηδενική εσωτερική πίεση (P<sub>i</sub>)

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το τελικό στάδιο, της πλήρους αποτόνωσης με μηδενική εσωτερική πίεση. Αρχικά, παρατηρείται ότι υπάρχει μία σαφής επέκταση της αστοχίας σε μεγαλύτερο βάθος προς τον κατακόρυφο άξονα. Μία πιθανή εξήγηση της απόκλισης είναι ότι η ανακατανομή των τάσεων επιφέρει εν τέλει μεγαλύτερη αστοχία λόγω ολίσθησης σε βάθος, δεδομένο που δεν προβλέπεται από τη λύση του Daemen.

Συνολικά, η λύση του Goodman δίνει άριστα αποτελέσματα στην οριοθέτηση των ζωνών ολίσθησης στοιχείο που επιβεβαιώνεται από τις αναλύσεις στο FLAC. Σε ότι αφορά τη λύση του Daemen επιβεβαιώνεται σε μεγάλο βαθμό η ισχύς της λύσης που προβλέπει τη ζώνη αστοχίας. Ωστόσο παρουσιάζεται ελλιπής να προβλέψει το βάθος της αστοχίας, όπως παρουσιάζεται στα τελικά αποτελέσματα για μηδενική εσωτερική πίεση. Παρακάτω δίνονται εικόνες στις οποίες παρουσιάζεται το τεταρτοκύκλιο της κυκλικής σήραγγας με τη ζώνη αστοχίας που προέκυψε από τις τελευταίες αναλύσεις, όπως επίσης οι περιοχές που προβλέπονται από τον Goodman και από τον Daemen.



Σχήμα 3.14: Σύγκριση λύσεων Goodman και Daemen

Στο παραπάνω σχήμα το μοντέλο προσομοίωσης περιέχει γωνία εσωτερικής τριβής 40° και εντατικό πεδίο P<sub>0</sub> = 1 MPa.



Σχήμα 3.15: Σύγκριση λύσεων Goodman και Daemen

Στο παραπάνω σχήμα το μοντέλο προσομοίωσης περιέχει γωνία εσωτερικής τριβής 40° και εντατικό πεδίο P<sub>0</sub> = 5 MPa.

## 3.5 Σύγκριση FLAC με Λογισμικό ABAQUS 6.9

Προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που υπολογίζει το FLAC επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί σύγκριση με ένα διαφορετικό λογισμικό. Για τη σύγκριση χρησιμοποιείται το λογισμικό ABAQUS 6.9.

Το πακέτο λογισμικού μηχανικής ανάλυσης ABAQUS είναι ένα γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της φυσικής αντίδρασης των κατασκευών και των στερεών σωμάτων σε φόρτιση, θερμοκρασιακή μεταβολή, επαφή, κρούση και άλλες διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Το ABAQUS περιλαμβάνει τα εξής συστήματα αναλύσεων:

- Abaqus / Standard, το οποίο αφορά γενικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων
- Abaqus / Explicit, το οποίο αφορά ρητές, δυναμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων
- Abaqus / CAE, το οποίο είναι ένα διαδραστικό περιβάλλον για τη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης, πραγματοποίησης αναλύσεων, παρακολούθησης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων
- Abaqus / Viewer, το οποίο αποτελεί υποπρόγραμμα του Abaqus / CAE που παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων σε επόμενο στάδιο από αυτό της ανάλυσης και επίσης δίνει τη δυνατότητα της απεικόνισης των μοντέλων προσομοίωσης



Σχήμα 3.16: Μορφή του προγράμματος ABAQUS (2009)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το λογισμικό ABAQUS αξιοποιήθηκε για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο λογισμικό FLAC.

## 3.5.1 Σύγκριση Μετατοπίσεων Μοντέλων Προσομοίωσης

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε το μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο αφορά τις ακόλουθες παραμέτρους:

Μέτρο Ελαστικότητας, Ε	Λόγος Poisson, v	Γωνία Εσωτερικής Τριβής, φ	Συνοχή, c	Αρχικό Εντατικό Πεδίο, Ρ₀
10 GPa	0.3	40°	0 kPa	5 MPa

Η σύγκριση που πραγματοποιήθηκε αφορά στις μετατοπίσεις που προκύπτουν από τις αναλύσεις προσομοίωσης από τα δύο λογισμικά διδιάστατων αναλύσεων. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται στο Παράρτημα της διπλωματικής εργασίας.

Από την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων προέκυψε σχεδόν ταύτιση των τιμών που προέκυψαν με ποσοστό διαφοράς περίπου 4 %. Συγκεκριμένα για διάφορες θέσεις στην περιφέρεια της σήραγγας δίνεται ο Πίνακας 3.1.

Γωνία (θ)	Τιμή Abaqus	Τιμή Flac	Διαφορά
0	3.569E-03 m	3.705E-03 m	3.67%
2	3.568E-03 m	3.705E-03 m	3.70%
44	3.523E-03 m	3.646E-03 m	3.37%
46	3.524E-03 m	3.650E-03 m	3.45%
88	4.108E-03 m	4.016E-03 m	- 2.24%
90	4.076E-03 m	4.007E-03 m	- 1.69%

Πίνακας 3.1: Σύγκριση τιμών μετατοπίσεων προγραμμάτων FLAC και ABAQUS

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το λογισμικό FLAC παρουσίασε κατά κύριο λόγο τις μεγαλύτερες τιμές μετατοπίσεων σε σχέση με το λογισμικό ABAQUS. Το στοιχείο αυτό παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.16.



**Σχήμα 3.17:** Διάγραμμα σύγκρισης μετατοπίσεων από αναλύσεις με ABAQUS και FLAC



Σχήμα 3.18: Διάγραμμα απόλυτης διαφοράς (%) μετατοπίσεων από αναλύσεις με ABAQUS και FLAC

Παρακάτω δίνονται χαρακτηριστικές εικόνες των διανυσμάτων μετατοπίσεων του ανοίγματος που προέκυψαν από τη προσομοίωση με τα δύο προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και FLAC.



**Σχήμα 3.19α, β:** Απεικόνιση των διανυσμάτων της μετατόπισης του ABAQUS και του FLAC, αντίστοιχα

ΜΕΡΟΣ Γ: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

# Κεφάλαιο 4

# Παραμετρικές Αναλύσεις

#### 4.1 Εισαγωγή

Η αδυναμία επιβεβαίωσης της κλειστής λύσης που παρουσίασαν οι Hefny & Lo οδήγησε στην κατασκευή μίας σειράς μοντέλων με το FLAC, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά της ανισοτροπίας σε κυκλική σήραγγα. Πραγματοποιήθηκε συνεπώς, παραμετρική ανάλυση ώστε να διερευνηθεί αναλυτικά το θέμα της ανισοτροπίας.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας έγινε εξέταση διάφορων παραμέτρων που αφορούν τόσο στις ιδιότητες του πετρώματος και των ασυνεχειών όσο και στις ρυθμίσεις του προγράμματος. Ακόμη πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για να διερευνηθεί η επίδραση στις υπολογιζόμενες μετατοπίσεις σε κυκλική σήραγγα τόσο της συχνότητας των ασυνεχειών όσο και του λόγου των μέτρων Ελαστικότητας στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση.

# 4.2 Επίδραση της Συχνότητας των Ασυνεχειών Εγκάρσια Ισότροπου Πετρώματος

Σε πρώτο στάδιο αναλύσεων ερευνήθηκε η επίδραση της συχνότητας των ασυνεχειών στις μετατοπίσεις κυκλικής σήραγγας. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση μοντέλων στο λογισμικό FLAC, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε το μηχανικό μοντέλο "Anisotropic" που αφορά εγκάρσια ισότροπο ελαστικό μέσο.

Παράμετρος	Ελαα Άι Πει Ε	Μέτρο στικότ ορηκτο ορηκτο Ξ (GPa	ητας ου τος	الم إلاً Πετ (	Μέτρο άτμησ ορηκτα ορωμα Β (GPa	ης ου τος	Λόγος Poisson v	Πυκνότητα ρ (kg/m³)
Τιμή	10	30	100	4	12	40	0.25	2600.0

Πίνακας 4.1: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις ασυνέχειες

Παράμετρος	Αρχικό Εντατικό Πεδίο Ρ₀ (MPa)	Γωνία Κλίσης Στρωμάτων α (°)	A kn	Ορθή Ακαμψ συνέχι (GPa	ία ειας / m)	Σ Ασυν	υχνά Έχεια λ	ότητα ών αν	άm
Τιμή	5.0	0.0	1	10	100	0.1	1	10	20

Συγκεκριμένα για τις τιμές των παραμέτρων «kn» και «λ» δίνονται οι ακόλουθες διευκρινήσεις. Η ορθή ακαμψία της ασυνέχειας πρακτικά εκφράζει την τάση, η οποία πρέπει να ασκηθεί κάθετα στο επίπεδο της ασυνέχειας ώστε προκληθεί σύγκλιση των τοιχωμάτων της. Λόγου χάρη, για την τιμή 10 GPa / m για μία τυχαία ασυνέχεια θεωρείται ότι πρέπει να ασκηθεί ορθή τάση 10 GPa ώστε να προκληθεί κλείσιμο των τοιχωμάτων της ασυνέχειας κατά 1 m. Όσο μεγαλύτερη είναι τιμή της «kn» τόσο πιο κλειστή ασυνέχεια αντιμετωπίζεται. Για τη συχνότητα «λ» θεωρείται ότι σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου αντιμετωπίζεται μία πιο λεπτοστρωματώδη βραχομάζα.

## 4.3 Γενικές Πληροφορίες Κύριων Προσομοιωμάτων

Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα προσομοιώματα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη σήραγγα της Καλυδώνας, η οποία αποτελεί και τη Μελέτη Περίπτωσης (Case Study) της διπλωματικής εργασίας και θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Το πρόβλημα που εξετάστηκε αφορά στη μελέτη συμπεριφοράς κυκλικής σήραγγας ακτίνας 5 m, ευρισκόμενη σε υδροστατικό πεδίο (k = 1) με οριζόντια κλίση ασυνεχειών (α = 0°). Η ανάλυση σε αρχικό στάδιο πραγματοποιήθηκε σε κάνναβο πλήρους διατομής (360°), ωστόσο κρίθηκε αναγκαίο να περιοριστεί σε κάνναβο τεταρτοκυκλίου (90°). Κύριος λόγος περιορισμού αποτέλεσε η αισθητή μείωση του χρόνου υπολογιστικής ανάλυσης που απαιτείται στον κάνναβο του τεταρτοκυκλίου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πρόβλημα είναι ανεξάρτητο της κλίσης των ασυνεχειών, λόγω της συμμετρίας ως προς άξονα (k = 1), στοιχείο που επιτρέπει τη χρήση του περιορισμένου καννάβου. Δεδομένου, συνεπώς, του υδροστατικού πεδίου και της κυκλικής διατομής της σήραγγας κατέστη δυνατή η κατασκευή σημαντικού αριθμού μοντέλων προσομοίωσης με σχετικά μικρή απαίτηση χρόνου υπολογισμού.

Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στα προσομοιώματα οι ιδιότητες του πετρώματος επιλέχθηκε να έχουν μεγάλες τιμές αντοχής, ούτως ώστε να υπάρχει αστοχία μόνο λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών και όχι λόγω διαρροής του πετρώματος. Εξαίρεση αποτελούν τα μοντέλα που αφορούν στη σήραγγα Καλυδώνας όπου προσομοιώθηκαν οι πραγματικές συνθήκες του προβλήματος.

## 4.4 Παράμετροι που Εξετάστηκαν στην Ανάλυση

Ακολουθεί ανάλυση των παραμέτρων που τροποποιηθήκαν στις αναλύσεις:

#### • Μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus, E) και Λόγος Poisson (v)

Σε αρχικό στάδιο αναλύσεων επιλέχθηκε να γίνει τροποποίηση των ελαστικών σταθερών «ν» και «Ε» ώστε να διαπιστωθεί ο βαθμός επιρροής αυτών στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν αναλύσεις με τιμές του μέτρου Ελαστικότητας αυξημένες και μειωμένες αντίστοιχα κατά μία τάξη μεγέθους και με διάφορες τιμές του λόγου Poisson. Από τα αποτελέσματα κρίθηκε ότι οι δύο παράμετροι επηρεάζουν ανεπαίσθητα τις αναλύσεις και συνεπώς διατηρήθηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται σε παρακάτω συγκεντρωτικούς Πίνακες.

## Συνοχή (c) και Γωνία Εσωτερικής Τριβής (φ) των Ασυνεχειών

Αρχικά θα πρέπει να τονιστεί ότι η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής αφορά στις ιδιότητες των ασυνεχειών και όχι του πετρώματος για λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο.

Σε ότι αφορά τη συνοχή έγινε παραμετρική ανάλυση για τιμές 0, 10 και 100 kPa, χωρίς ωστόσο να υπάρξει αισθητή επιρροή στα αποτελέσματα των αναλύσεων, σχετικά με τις ζώνες ολίσθησης που δημιουργούνται γύρω από τη σήραγγα.

Η γωνία εσωτερικής τριβής αποτέλεσε και τη πιο βασική παράμετρο, η οποία σε όλη τη φάση της διπλωματικής εξετάστηκε σε όλες τις ομάδες των αναλύσεων προσομοίωσης. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε η μεγάλη επιρροή της παραμέτρου αυτής σε όλα τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν και γι' αυτό το λόγο και θα αναλυθεί διαγραμματικά σε επόμενη παράγραφο.

#### Αρχικό Εντατικό Πεδίο (P<sub>0</sub>) και Εσωτερική Πίεση (P<sub>i</sub>)

Το αρχικό εντατικό πεδίο επιλέχθηκε στα περισσότερα προσομοιώματα ίσο με 5 ΜΡα που αντιστοιχεί περίπου σε 180 m ύψος υπερκειμένων. Στην τελευταία ομάδα μοντέλων προσομοίωσης έγινε ανάλυση σε τρεις διαφορετικές τιμές αρχικού εντατικού πεδίου (P<sub>0</sub> = 1, 5, 10 MPa).

Η εσωτερική πίεση που εφαρμόστηκε στα μοντέλα, χωρίς την ύπαρξη υποστήριξης (liner), υπήρξε ένας από τους παράγοντες που εξετάστηκαν ποικιλοτρόπως. Σε πρώτη φάση έγιναν αναλύσεις με συγκεκριμένες τιμές εσωτερικής πίεσης για να διερευνηθούν τα αποτελέσματα του προγράμματος. Σε επόμενη φάση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί σταδιακή απομείωση της εσωτερικής πίεσης, ώστε να προσομοιωθεί η αποτόνωση της βραχομάζας. Τέλος, επιλέχθηκε να δοθεί συγκεκριμένη τιμή του λόγου P<sub>i</sub> / P<sub>0</sub>, όπως θα παρουσιαστεί σε αναλυτικό πίνακα.

	ακτίνα σήραγγας R (m)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (GPa)	Μέτρο Λόγος λαστικότητας Poisson E (GPa) v		Συνοχή c (kPa)			ι ωνια Εσωτερικής Τριβής φ (°)		
Τιμή που λήφθηκε	5.0	10	0	0,3	0	10	100	30	40	50

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών παραμέτρων που αναλύθηκαν

## Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών παραμέτρων που αναλύθηκαν

	Αρχικό Εντατικό Πεδίο			Εσωτερική Πίεση		
	P <sub>0</sub> (MPa)				P <sub>i</sub> (MPa)	
				Σταδιακή	απομοίωσ	η από $P_0$
Τιμή που λήφθηκε	1.0 5.0 10.0			^	\όγος Ρ <sub>i</sub> / Ρ	0
					0.05	0.1

## 4.5 Περιγραφή Τελικών Μοντέλων Προσομοίωσης

Στην τελική φάση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με τις συγκεκριμένες παραμέτρους που κρίθηκαν ότι επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Κατασκευάστηκαν δύο ομάδες μοντέλων προσομοίωσης, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

Η πρώτη αφορά σε τεταρτοκύκλιο σήραγγας με παραμέτρους τη γωνία εσωτερικής τριβής (φ), το αρχικό εντατικό πεδίο (P<sub>0</sub>) και την εσωτερική πίεση (P<sub>i</sub>). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο η κλίση των ασυνεχειών επιλέχθηκε να είναι οριζόντια (α = 0°), δεδομένου ότι η συμμετρία του προβλήματος ανεξαρτητοποιεί την ανάλυση από την παράμετρο της κλίσης των ασυνεχειών.

Η δεύτερη ομάδα μοντέλων προσομοίωσης αφορά στις ίδιες παραμέτρους που εξετάζονται στην πρώτη ομάδα, με εξαίρεση την εσωτερική πίεση που επιλέχθηκε να γίνει η χρήση υποστήριξης (liner) μέσω του προγράμματος FLAC. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των μοντέλων προσομοίωσης. Αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος τύπος καννάβου από τη «βιβλιοθήκη» (Fish Library) του λογισμικού FLAC με την ονομασία "Donut", όπως περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 4.4: Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο "Donut"

rmin	rmul	gratio	xcenter	ycenter	izone	jzone	minangle	deltaangle
5.0	20.0	1.0398	0.0	0.0	80	45	0	90

Από τις δύο πρώτες τιμές καθορίζεται το όριο της ανάλυσης στα 100.0 m. Η ανάλυση πραγματοποιείται ανά δύο μοίρες (jzone = 45). Άρα, το μήκος κάθε ζώνης των πεπερασμένων διαφορών στην περιφέρεια της σήραγγας ισούται με το μήκος τόξου γωνίας  $2^\circ$  = ( $2^\circ$  x π) / 180 (rad). Ακολουθούν εικόνες που παρουσιάζουν τον κάνναβο όπως αυτός κατασκευάστηκε.



Σχήμα 4.1: Ο κάνναβος των μοντέλων προσομοίωσης

Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης, όπου και καθορίζονται οι ιδιότητες του καννάβου, τοποθετούνται οι περιορισμοί στα όρια του κάθε μοντέλου, όπως επίσης και εφαρμόζεται το μέγεθος του αρχικού εντατικού πεδίου (P<sub>0</sub>) και της εσωτερικής πίεσης (P<sub>i</sub>) για το κάθε μοντέλο προσομοίωσης αντίστοιχα. Στην πρώτη φάση το μοντέλο επιλύεται ελαστικά. Σε επόμενο βήμα πραγματοποιείται αλλαγή του μοντέλου σε μοντέλο "Ubiquitous Joint" ώστε να προσομοιωθεί η

παρουσία των ασυνεχειών. Οι παράμετροι του μοντέλου δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.5.

Μέτρο Ελαστικότητας Ε (GPa)	Λόγος Poisson v	Μέτρο Διάτμησης Κ (GPa)	Μέτρο Διάτμησης G (GPa)	Πυκνότητα ρ (kg / m³)
10.0	0.3	3.84615	3.84615	2600.0

Πίνακας 4.5: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο "Ubiquitous Joint"

Συνογή Πετούματος	Γωνία Εσωτερικής	Αντοχή Εφελκυσμού	Ακτίνα Κυκλικού
	Τριβής Πετρώματος	Πετρώματος	Ανοίγματος
Cr (MPa)	φ <sub>r</sub> (°)	στr (GN)	r (m)
1000	89	1000	5.0

Γωνία Κλίσης		Γωνία Εσωτερικής	Αντοχή Εφελκυσμού
Ασυνεχειών	2υνοχη Ασυνεχείας	Τριβής Ασυνέχειας	Ασυνέχειας
α (°)	Cj (Fd)	φ <sub>j</sub> (°)	στj (GN)
0.0	0.0	ανάλογα	1000

Χρησιμοποιήθηκε μία μέση τιμή πυκνότητας ίση με 2600.0 kg / m<sup>3</sup>, που προέκυψε από τις τιμές της σήραγγας Καλυδώνας. Σε ότι αφορά τις ιδιότητες του πετρώματος, ήτοι της συνοχής, της γωνίας εσωτερικής τριβής και της αντοχής σε εφελκυσμό, κρίθηκε σκόπιμο να επιλεχθούν πολύ υψηλές τιμές ώστε η όποια αστοχία να προκληθεί από την παρουσία των ασυνεχειών και όχι λόγω του πετρώματος. Η τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό των ασυνεχειών επιλέχθηκε να είναι μηδέν.

Σε τελικό στάδιο πραγματοποιείται η επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης και εν συνεχεία δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη του προγράμματος επιλογής του τρόπου επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

## 4.5.1 Παραμετρικές Αναλύσεις με Εσωτερική Πίεση

Στην κατηγορία των συγκεκριμένων αναλύσεων κατασκευάστηκαν 27 προσομοιώματα, τα οποία περιέχουν παραμέτρους όπως περιγράφονται στον Πίνακα 4.6.

	Γωνία Εσωτερικής Τριβής φ (°)			Αρχικό Εντατικό Πεδίο Ρ₀ (MPa)			Εσωτερική Πίεση Ρ <sub>i</sub> (MPa)		
Τιμή που λήφθηκε	30	40	50	1.0	5.0	10.0	<b>Λόγος Ρ</b> <sub>i</sub> / Ρ <sub>0</sub>		
							0	0.05	0.1

Πίνακας 4.6: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για εσωτερική πίεση

## 4.5.2 Παραμετρικές Αναλύσεις με Υποστήριξη (liner)

Στην κατηγορία των αναλύσεων υποστήριξη κατασκευάστηκαν aμ 9 προσομοιώματα χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους με τις αναλύσεις με εσωτερική πίεση, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω. Στη συγκεκριμένη κατηγορία μοντέλων αντί της παραμέτρου της εσωτερικής πίεσης (P<sub>i</sub>) εισήχθη υποστήριξη με χρήση του στοιχείου "liner" του FLAC, που προσομοιώνει ένα δακτύλιο επένδυσης σήραγγας. Σε αντίθεση με τα προσομοιώματα που ενσωματώνουν εσωτερική πίεση, στα μοντέλα με υποστήριξη η τοποθέτηση των εντολών στον κώδικα του προγράμματος γίνεται σε διαφορετικό σημείο. Η υποστήριξη επιλέχθηκε να τοποθετηθεί μετά την ελαστική επίλυση, ώστε να πραγματοποιηθεί ανακατανομή των τάσεων λόγω της εκσκαφής, με σκοπό την διερεύνηση της υπερφόρτισης της επένδυσης λόγω της πιθανής ολίσθησης των ασυνεχειών και μόνο. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.1 που συγκεντρώνει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιώματα.

	Γωνία Εσωτερικής Τριβής φ (°)			Αρχικό Εντατικό Πεδίο Ρ₀ (MPa)			Υποστήριξη "liner"		
Τιμή που λήφθηκε	30	40	50	1.0	5.0	10.0	E (GPa)	Πάχος (m)	v
							15	0.1	0.2

Πίνακας 4.7: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο "liner"

## 4.6 Αποτελέσματα Αναλύσεων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης που ερευνά την επίδραση της συχνότητας των ασυνεχειών και έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα από τα κύρια προσομοιώματα.

# 4.6.1 Προσομοιώματα Επίδρασης Συχνότητας Ασυνεχειών

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν εξάγονται οι τιμές των μετατοπίσεων τόσο της οροφής όσο και της παρειάς της σήραγγας. Από την επεξεργασία κατασκευάστηκαν αρχικά διαγράμματα που συσχετίζουν το λόγο των μετατοπίσεων της οροφής προς της παρειάς με τη συχνότητα των ασυνεχειών ανά μέτρο μήκους.





Σε επόμενο στάδιο επιλέχθηκε να ερευνηθεί η συσχέτιση του λόγου των μετατοπίσεων της οροφής προς της παρειάς ως προς το λόγο των μέτρων Ελαστικότητας στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι στα παρακάτω Σχήματα 4.5 έως 4.7, όπου  $E_v$  είναι το μέτρο Ελαστικότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση και  $E_h$  είναι το μέτρο Ελαστικότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση και  $E_h$  είναι το μέτρο Ελαστικότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση και  $E_h$  είναι το μέτρο Ελαστικότητας στην οριζόντια διεύθυνση (ισχύει  $E_h = E_{ir}$ ), όπως αυτά περιγράφονται από τους Hefny & Lo (1999).



Σχήματα 4.3α, β, γ: Επίδραση του λόγου των μέτρων Ελαστικότητας στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση στις μετατοπίσεις για μέτρο Ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος για Eir = 10, 30 και100 GPa και για τρεις τιμές της ορθής δυστροπίας των ασυνεχειών

#### 4.6.2 Κύρια Προσομοιώματα χωρίς Υποστήριξη

Από την επίλυση των συγκεκριμένων μοντέλων προσομοίωσης εξάγονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων τόσο της ελαστικής όσο και της ελαστοπλαστικής επίλυσης, και των γωνιών που αντιστοιχούν.

Παρακάτω εικονίζονται στα Σχήματα 4.8 έως 4.11 τα διανύσματα των μετατοπίσεων, όπως αυτές παρουσιάζονται στο πρόγραμμα FLAC κατά την επίλυση των μοντέλων προσομοίωσης.



**Σχήμα 4.4α, β:** Πεδίο μετατοπίσεων γύρω από τη σήραγγα με P<sub>0</sub> = 1 MPa και P<sub>i</sub> = 0, για φ = 30° και 40°



**Σχήμα 4.5α, β, γ:** Πεδίο μετατοπίσεων γύρω από τη σήραγγα με  $P_0 = 5$  MPa και  $P_i = 0$ , για  $φ = 30^\circ$  και  $40^\circ$ 

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων οι τιμές των μετατοπίσεων συγκεντρώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε διαγράμματα μέσω του προγράμματος Excel. Η πρώτη ομάδα διαγραμμάτων εξετάζει τη σχέση της γωνίας εσωτερικής τριβής (φ) με το λόγο των μετατοπίσεων της ελαστοπλαστικής προς την ελαστική επίλυση (Ur / Ur<sub>elastic</sub>). Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα αυτά.


Σχήμα 4.6α, β, γ: Αρχικό εντατικό πεδίο P<sub>0</sub> = 1 MPa σε διάφορους λόγους P<sub>i</sub> / P<sub>0</sub>



**Σχήματα 4.7 α, β, γ:** Αρχικό εντατικό πεδίο  $P_0$  = 5 MPa σε διάφορους λόγους

 $P_i / P_0$ 



Σχήμα 4.8α, β, γ: Αρχικό εντατικό πεδίο P<sub>0</sub> = 10 MPa σε διάφορους λόγους P<sub>i</sub>/P<sub>0</sub>

Η δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων εξετάζει τη σχέση της γωνίας εσωτερικής τριβής (φ) ως προς δύο συσχετιζόμενους παράγοντες. Ο πρώτος άξονας αφορά στο λόγο της μέγιστης μετατόπισης που προέκυψε από την ελαστοπλαστική επίλυση προς την τιμή της μετατόπισης στην παρειά της σήραγγας (θ = 0°). Αντίστοιχα, ο δεύτερος άξονας αφορά στην γωνία (θ) για την οποία παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη μέγιστη μετατόπιση. Όπως και στην προηγούμενη ομάδα διαγραμμάτων και σε αυτή τα διαγράμματα οργανώνονται ανά τριάδες που αφορούν και στις αντίστοιχες τιμές αρχικού εντατικού πεδίου (P<sub>0</sub>).



**Σχήμα 4.9α, β, γ:** Αρχικό εντατικό πεδίο  $P_0 = 1$  MPa σε διάφορους λόγους

 $P_i / P_0$ 



**Σχήμα 4.10α, β, γ:** Αρχικό εντατικό πεδίο  $P_0$  = 5 MPa σε διάφορους λόγους  $P_i / P_0$ 



**Σχήμα 4.11α, β, γ:** Αρχικό εντατικό πεδίο  $P_0$  = 10 MPa σε διάφορους λόγους  $P_i / P_0$ 

#### 4.6.3 Κύρια Προσομοιώματα με Υποστήριξη (Liner)

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης ταυτίζονται με αυτά της προηγούμενης ομάδας μοντέλων με εσωτερική πίεση τόσο στα στοιχεία του καννάβου όσο και στις παραμέτρους για το πέτρωμα και τις ασυνέχειες.

Από τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών επιλέχθηκε να αξιοποιηθούν οι τιμές των αξονικών τάσεων που αναπτύσσονται στην υποστήριξη. Προκύπτει συνεπώς το Σχήμα 4.17 που εξετάζει τη σχέση της γωνίας τριβής (φ) με δύο συσχετιζόμενες παραμέτρους. Ο πρώτος άξονας αφορά στη μέγιστη αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην υποστήριξη και ο δεύτερος άξονας αφορά στην γωνία (θ) για την οποία παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη μέγιστη δύναμη.



Σχήμα 4.12: Αρχικό εντατικό πεδίο P<sub>0</sub> = 1, 5, 10 MPa

#### 4.7 Σχολιασμός Διαγραμμάτων Μοντέλων Προσομοίωσης

#### 4.7.1 Μοντέλα Επίδρασης Συχνότητας των Ασυνεχειών

Από την πρώτη ομάδα διαγραμμάτων προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου πετρώματος τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας σε σχέση με την παρειά. Ακόμη προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των ασυνεχειών τόσο μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην οροφή της σήραγγας σε σχέση με την παρειά. Για την παράμετρο «kn» προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου παρουσιάζονται μικρότερες μετατοπίσεις συνολικά λόγω του καλύτερου αλληλοκλειδώματος των τεμαχών της βραχομάζας.

Από τη δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων προκύπτει μια καθαρά γραμμική σχέση του λόγου των μέτρων Ελαστικότητας στην κατακόρυφη και στην οριζόντια διεύθυνση με το λόγο των μετατοπίσεων της οροφής προς της παρειάς. Να σημειωθεί ότι η προσομοίωση αφορά εγκάρσια ισότροπο πέτρωμα με το επίπεδο ισοτροπίας να είναι οριζόντιο. Οι μέγιστες μετατοπίσεις αναπτύσσονται στην οροφή.

#### 4.7.2 Κύρια Μοντέλα με Εσωτερική Πίεση

Από την πρώτη ομάδα διαγραμμάτων προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα για τη επίδραση των ασυνεχειών στην εκσκαφή κυκλικού ανοίγματος.

Καταρχάς, από όλα τα διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι κύρια παράμετρος για τα προσομοιώματα αποτελεί η γωνία εσωτερικής τριβής (φ). Συγκεκριμένα όσο αυξάνει η γωνία εσωτερικής τριβής τόσο μειώνονται οι μετατοπίσεις που προκύπτουν από την ανάλυση σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση.

Ακόμη, σημαντικό να αναφερθεί αποτελεί το γεγονός ότι κρίσιμη γωνία για τις μετατοπίσεις είναι οι 90° (οροφή του ανοίγματος), όπου παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις από 1 έως και 2 φορές σε σχέση με άλλες θέσεις (0°, 30°, 60°) ανάλογα της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Σε ότι αφορά στις διάφορες τιμές του αρχικού εντατικού πεδίου (P<sub>0</sub>) πρέπει να αναφερθεί ότι τα μοντέλα εμφανίζουν αναλογική αύξηση στις τιμές των μετατοπίσεων στα στάδια της επίλυσης. Αυτό προκύπτει από τα διαγράμματα από όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο λόγος των μετατοπίσεων της ελαστοπλαστικής προς την ελαστική επίλυση (Ur / Ur<sub>elastic</sub>) παραμένει σχεδόν ίδιος.

Τέλος, για τα προσομοιώματα με εσωτερική πίεση, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος P<sub>i</sub> / P<sub>0</sub> τόσο περιορίζονται οι μετατοπίσεις στο κυκλικό άνοιγμα, στοιχείο αναμενόμενο να παρατηρηθεί.

Συνεπώς, από την πρώτη ομάδα διαγραμμάτων μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι ασυνέχειες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά κυκλικού ανοίγματος. Η επιρροή τους εστιάζεται στο γεγονός ότι προκαλούν τις μέγιστες μετατοπίσεις στην ευρύτερη περιοχή της οροφής με απόκλιση 10° – 15° εκατέρωθεν. Αναλόγως προκύπτει και η μικρή επιβάρυνση που προκαλείται στην παρειά της σήραγγας εξαιτίας των ασυνεχειών, όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα.

Από τη δεύτερη σειρά διαγραμμάτων επιβεβαιώνονται με διαφορετική προσέγγιση τα παραπάνω συμπεράσματα.

Στην περίπτωση της μηδενικής εσωτερικής πίεσης οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε σχέση με αυτές της παρειάς (θ = 0°) εντοπίζονται στην οροφή του κυκλικού ανοίγματος (θ = 90°) για γωνία εσωτερικής τριβής (φ) ίση με 30°, ενώ για τις υπόλοιπες γωνίες εσωτερικής τριβής εντοπίζονται στο διάστημα γωνιών (θ) 75° – 80°.

Στην περίπτωση όπου ο λόγος P<sub>i</sub> / P<sub>0</sub> είναι ίσος με 0,05 τότε οι μέγιστες μετατοπίσεις προς τις τιμές στην παρειά εντοπίζονται στο διάστημα γωνιών (θ) 74° – 78°. Αντίστοιχα για την περίπτωση που λόγος P<sub>i</sub> / P<sub>0</sub> είναι ίσος με 0,1 τότε οι μέγιστες μετατοπίσεις προς τις τιμές στην παρειά εντοπίζονται ελάχιστα μειωμένες στο διάστημα γωνιών (θ) 72° – 74°.

#### 4.7.3 Μοντέλα με Υποστήριξη (liner)

Από το διάγραμμα των αξονικών δυνάμεων στα μοντέλα με υποστήριξη, αρχικά, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία εσωτερικής τριβής τόσο μειωμένες αξονικές δυνάμεις αναπτύσσονται στην υποστήριξη. Από το διάγραμμα επίσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε υψηλότερες τιμές αρχικού εντατικού πεδίου οι αξονικές δυνάμεις εμφανίζονται σαφώς αυξημένες. Συγκεκριμένα, από αρχικό εντατικό πεδίο του 1 MPa σε 5 MPa εμφανίζεται αύξηση κατά 5 φορές περίπου στις τιμές των αξονικών δυνάμεων. Στην περίπτωση αύξησης του αρχικού εντατικού πεδίου από τα 5 MPa σε 10 MPa εμφανίζεται αύξηση κατά 2 φορές περίπου στις τιμές των αξονικών δυνάμεων. Επίσης στην περίπτωση αύξησης του αρχικού εντατικού εντατικού πεδίου από τα 5 MPa σε 10 MPa εμφανίζεται αύξηση κατά 2 φορές περίπου στις τιμές των αξονικών δυνάμεων. Επίσης στην περίπτωση αύξησης του αρχικού εντατικού εντατικού πεδίου από τα 5 MPa σε 10 MPa εμφανίζεται αύξηση κατά 10 φορές περίπου στις τιμές των αξονικών δυνάμεων.

Σημαντικό να σημειωθεί επίσης είναι ότι στην περίπτωση των μοντέλων προσομοίωσης με υποστήριξη οι μεγαλύτερες τιμές των αξονικών τάσεων αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή των γωνιών (θ) 74° – 85°, με τις μεγαλύτερες να εμφανίζονται στην περίπτωση της εσωτερικής γωνίας τριβής των 30°.

Συνεπώς και στην περίπτωση της υποστήριξης (liner) συμπεραίνεται ότι οι ασυνέχειες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά της υποστήριξης σε κυκλική σήραγγα. Εμφανίζεται μία έντονη επιβάρυνση στην υποστήριξη στην περιοχή κοντά στην οροφή, σε σχέση με τις παρειές όπου δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες αξονικές δυνάμεις.

# Μελέτη Περίπτωσης: Σήραγγα Καλυδώνας

#### 5.1 Εισαγωγή

Η σήραγγα Καλυδώνας αποτελεί έργο του υπό κατασκευή αυτοκινητοδρόμου Ιόνια Οδός από το Αντίρριο μέχρι και τα Ιωάννινα. Περιλαμβάνει την κατασκευή δίδυμης σήραγγας με συνολικό μήκος του δεξιού κλάδου περίπου 1.190 m και αριστερού κλάδου περίπου 1.197 m.

Το τεχνικό έργο της Σήραγγας Καλυδώνας με γενική διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νομού Αιτωλοακαρνανίας και ειδικότερα βόρεια του Ευηνοχωρίου και σε απόσταση περί τα 8 km βορειοανατολικά του Μεσολογγίου.

## 5.2 Γεωλογικά Στοιχεία Σήραγγας Καλυδώνας (Istria, 2009)

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται μεταξύ των Χ.Θ. 24+037 και Χ.Θ. 25+255, όπου προβλέπεται η κατασκευή της δίδυμης σήραγγας της Καλυδώνας με μήκος υπόγειου τμήματος δεξιού κλάδου 1.190 m και μήκος υπόγειου τμήματος αριστερού κλάδου 1.197 m αντίστοιχα. Το μέγιστο πάχος υπερκειμένων εκτιμάται περίπου στα 100 m. Η γενική διεύθυνση του άξονα της σήραγγας είναι BA – ΝΔ.

Μέσω της γεωλογικής μελέτης γίνεται εκτίμηση των γεωλογικών συνθηκών που πρόκειται να συναντηθούν στη φάση διάνοιξης της σήραγγας, όπως επίσης και η εύρεση περιοχών με πιθανά προβλήματα αστάθειας (λ.χ. περιοχές κατολισθήσεων, ενεργών ή μη ρηγμάτων, υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, διάβρωσης εδαφών).

Το έργο της κατασκευής της σήραγγας Καλυδώνας βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νομού Αιτωλοακαρνανίας, ειδικότερα βόρεια του Ευηνοχωρίου, σε απόσταση 8 km από την πόλη του Μεσολογγίου. Η ευρύτερη περιοχή του έργου χαρακτηρίζεται από έντονο λοφώδες ανάγλυφο, το οποίο καλύπτεται από αραιή (έως πυκνή κατά τόπους) θαμνώδη βλάστηση. Τα απόλυτα υψόμετρα στην περιοχή της χάραξης κυμαίνονται από +50 έως +180 m περίπου. Το ανάγλυφο της περιοχής επηρεάζεται από την μονοκλινική δομή των στρωμάτων του φλύσχη. Οι επιμέρους φάσεις του φλύσχη (ιλυόλιθοι, ψαμμίτες) γενικά εναλλάσσονται χωρίς να είναι τεκτονισμένα και βυθίζονται προς τα BA – A, με μικρές κλίσεις που κυμαίνονται από 10° έως 25°.

Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται από βαθείς ευθύγραμμους χείμαρρους, με νότια – νοτιοανατολική διεύθυνση ροής, με κυριότερο αυτόν που τέμνει τη χάραξη στο κεντρικό τμήμα περίπου της σήραγγας, ενώ παρατηρείται και εκδήλωση πηγαίων μικροαναβλύσεων στα σημεία εκείνα που το επιτρέπει η λιθοστρωματογραφία και η τεκτονική της περιοχής.

Η ευρύτερη περιοχή του έργου δομείται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ανήκουν στο αλπικό υπόβαθρο της Ιόνιας γεωτεκτονικής ενότητας και από μεταλπικούς σχηματισμούς που υπέρκεινται ασύμφωνα.



**Σχήμα 5.1:** Τοπογραφικός χάρτης και θέση σήραγγας, κλίμακα 1:50.000 (Istria, 2009)

# 5.2.1 Λιθοστρωματογραφία

Με βάση τη γεωλογική χαρτογράφηση που πραγματοποιήθηκε διακρίνονται οι ακόλουθοι γεωλογικοί σχηματισμοί, από τους νεότερους προς τους παλαιότερους σχηματισμούς:

# • Ολοκαινικές Αποθέσεις

Υλικά ελουβιακού μανδύα (el): σύγχρονες αποθέσεις αποτελούμενες από λεπτομερή έως αδρομερή μη συγκολλημένα προϊόντα αποσάθρωσης των υποκείμενων φλυσχικών σχηματισμών.

Φλυσχικά πλευρικά κορήματα (H.sc): αποτελούμενα από ασύνδετα ψαμμιτικά τεμάχη μέσα σε αργιλοαμμώδη έως αργιλοιλυώδη κύρια μάζα, τα οποία αναπτύσσονται στις επικλινείς περιοχές των λόφων, όπου το υπόβαθρο είναι φλυσχικό, και στις εξόδους των χειμάρρων.

## • Πλειοκαινικές – Πλειστοκαινικές Αποθέσεις

Ποταμοχερσαίες, λιμναίες και ρηχής θάλασσας αποθέσεις (Pt / PtM): αποτελούμενες από ψαμμιτικά κροκαλοπαγή και τροχμαλοπαγή με συνεκτικά και λεπτομερή καστανόχρωμα υλικά, που αναπτύσσονται κοντά στο φλυσχικό υπόβαθρο και το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 4 m. Σε περιορισμένης έκτασης εμφανίσεις, παρουσιάζονται εναλλαγές κροκαλοπαγών / ψηφιδοπαγών και αμμούχων πηλών ή αργίλων καστανοκίτρινου – τεφροκίτρινου χρώματος. Συχνά, τα κροκαλοπαγή / ψηφιδοπαγή αποτελούν φακοειδείς ενστρώσεις. Πρόκειται για λιμναίες αποθέσεις που προέρχονται από τη μετάβαση των ποταμοχερσαίων αποθέσεων. Κάτω από τα υλικά αυτά, απαντώνται ενστρώσεις θαλάσσιων (ρηχής θάλασσας) αποθέσεων από υπόλευκες έως κυανές αμμούχες μάργες (PtM) μέγιστου πάχους 50 m, μέσα στις οποίες υπάρχουν φακοειδείς εμφανίσεις χαλαρών ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών.

## Ιόνια Γεωτεκτονική Ενότητα

Φλύσχης: Πρόκειται για ένα σύνολο λιθολογικών ενοτήτων με εναλλαγές ψαμμιτικών και ιλυολιθικών στρωμάτων χρώματος καστανού, τεφρού έως και υποπράσινου. Η ηλικία του είναι Ανώτερο Ηώκαινο – Ολιγόκαινο και το εκτιμώμενο πάχος του είναι πάνω από 2.000 m.

Ο φλύσχης αποτελείται από τις ακόλουθες λιθοφασικές ενότητες:

fi.st: μεσο – παχυστρωματώδεις, μεσόκοκκοι έως χονδρόκοκκοι ψαμμίτες, γκρίζου έως γκριζοκάστανου χρώματος (πάχος στρώσεων 40 cm έως 100 cm).

fi.st1: μεσοστρωματώδεις, λεπτόκοκκοι έως μεσόκοκκοι ψαμμίτες (πάχος στρώσεων 20 cm έως 50 cm), γκριζοκάστανου χρώματος, σε εναλλαγές με ιλυολιθικά στρώματα των οποίων το πάχος σπανίως ξεπερνά το πάχος των ψαμμιτικών στρωμάτων με τα οποία εναλλάσσονται.

fi.sl,st: Ιλυόλιθοι γκρίζου χρώματος σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις λεπτόκοκκους ψαμμίτες (πάχος στρώσεων 2 cm έως 10 cm). fi.sl2: Ιλυόλιθοι γκρίζου έως υποπράσινου χρώματος με λεπτές ενστρώσεις λεπτόκοκκων ψαμμιτών (πάχος στρώσεων 2 cm έως 10 cm).

fi.sl1: Λεπτοστωματώδεις ιλυόλιθοι γκρίζου έως κυανότεφρου χρώματος.

Στην περιοχή όπου πρόκειται να γίνει η διάνοιξη της σήραγγας της Καλυδώνας αναμένεται να συναντηθούν κυρίως οι σχηματισμοί των ψαμμιτών (fi.st), των εναλλαγών των ιλυολίθων και λεπτοστρωματωδών ψαμμιτών (fi.sl,st) και οι σχηματισμοί των ιλυολίθων fi.sl2 και fi.sl1.



Σχήμα 5.2: Γεωλογικός χάρτης περιοχής, κλίμακα 1:50.000 (Ι.Γ.Μ.Ε.) (Istria, 2009)

#### 5.2.2 Τεκτονική

Στην περιοχή μελέτης, την κύρια εκδήλωση μηχανισμών παραμόρφωσης αποτελούν οι διαρρήξεις. Οι σχηματισμοί στη ζώνη της υπό μελέτης σήραγγας συνιστούν μία μονοκλινή ακολουθία και εμφανίζονται να βυθίζονται προς ΒΑ. Σε ότι αφορά το ρηξιγενή τεκτονισμό, η φύση των φλυσχικών στρωμάτων (ιλυόλιθοι, ψαμμίτες) και η κάλυψη τους με ελουβιακό μανδύα (σε συνδυασμό με την φυτοκάλυψη τμήματος της περιοχής διέλευσης) καθιστά δύσκολη, τις περισσότερες φορές, την αναγνώριση των ρηξιγενών επιφανειών στην ύπαιθρο. Η αναγνώριση των επιφανειών αυτών είναι δυνατή μόνο σε τεχνητά πρανή (τομές δρόμων) ή σε φυσικές τομές ποταμών.

Στην ευρύτερη περιοχή τα ρήγματα αναγνωρίστηκαν με κλίση παρακατακόρυφη (65° – 80°) και όλα χαρακτηρίζονται κανονικής ολίσθησης. Στην περιοχή των στομίων εισόδου έχει παρατηρηθεί αποσφήνωση του σχηματισμού των εναλλαγών που βρίσκονται ως υπερκείμενοι των ψαμμιτών, στοιχείο το οποίο συνηγορεί στην ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης, που αναπτύσσεται παράλληλα με τον άξονα του ρέματος που καταλήγει εκεί. Από τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης, η μεν φορά μέγιστης κλίσης της επιφάνειας του ρήγματος εκτιμάται προς Νότο, το δε άλμα του 10 m περίπου. Το ρήγμα αυτό αναπτύσσεται σε διεύθυνση Α – Δ.

Από μεσοσκοπική παρατήρηση έχουν αναγνωριστεί πολλές ρηξιγενείς επιφάνειες (μεταπτώσεις) εντός του φλύσχη, που αντιμετωπίζονται σαν ασυνέχειες. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η πλήρωση με υλικό ασβεστίτη. Οι μικρορωγματώσεις αυτές δεν παρουσιάζουν άλμα μεγαλύτερο των 10 cm, είναι παρακατακόρυφες, έχουν διεύθυνση περίπου B – N και φορά μέγιστης κλίσης γενικά Δυτική.



Εικόνα 5.3: Ασυνέχειες πληρωμένες με ασβεστίτη εντός ψαμμιτών διακρίνονται οι μικρές ενδοστρωματικές μεταπτώσεις (Istria, 2009) Γενικά τα ρήγματα που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή θεωρούνται ανενεργά ρήγματα και εκτιμάται ότι δε θα δημιουργήσουν προβλήματα κατά τη διάνοιξη, παρά μόνο υποβάθμιση του υλικού εκατέρωθεν αυτών σε μικρό μήκος (20 m περίπου).

#### 5.2.3 Μικροτεκτονική

Για τη μελέτη της τεκτονικής – μικροτεκτονικής δομής στην περιοχή της σήραγγας, έχουν πραγματοποιηθεί συστηματικές μετρήσεις τεκτονικών ασυνεχειών (πρωτογενών και δευτερογενών), οι οποίες αφορούσαν στα στρωσιγενή επίπεδα (B) και στις διαρρήξεις (J).

#### • Περιοχή Στομίου Εισόδου

Από την επεξεργασία των δεδομένων μέσω λογισμικού Η/Υ προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα υπό μορφή πόλων και μέγιστων κύκλων στο δίκτυο Schmidt.



#### Περιοχή Ανάντη Στομίου Εξόδου



Αντίστοιχα για το στόμιο εξόδου προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.

Από τα παραπάνω τεκτονικά διαγράμματα, προκύπτει ότι τα στρωσιγενή επίπεδα (B) στο φλύσχη της περιοχής έχουν διεύθυνση προσανατολισμού BBΔ – NNA και μέγιστη κλίση Α – BA. Η κλίση των στρωμάτων είναι της τάξης των 10° έως 25°. Όσον αφορά στις διαρρήξεις (J), προκύπτει ότι αυτές έχουν σταθερές διευθύνσεις προσανατολισμού και μέτρο κλίσης της τάξης των 70° ÷ 90°.

#### 5.2.4 Υδρογεωλογία

Για τους γεωλογικούς σχηματισμούς που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης ακολουθεί κατάταξη σύμφωνα με την υδρογεωλογική συμπεριφορά τους:

#### Περατοί Σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα υλικά του ελουβιακού μανδύα και τα φλυσχικά πλευρικά κορήματα. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται ή περιλαμβάνουν κροκαλολατύπες, άμμους και τεμάχη με χαλαρή σύνδεση με αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλού πρωτογενούς πορώδους, με διαφοροποίηση τοπικά η οποία εξαρτάται από τη συνεκτικότητά τους και την συμμετοχή αργιλικού υλικού.

## Ημιπερατοί Σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ποταμοχερσαίες αποθέσεις του Πλειστοκαίνου και η ψαμμιτική φάση του φλύσχη. Οι ποταμοχερσαίες αποθέσεις χαρακτηρίζονται ως ημιπερατοί σχηματισμοί λόγω της παρουσίας διαφορετικής περατότητας στρώσεων, με εναλλαγή και πλευρική μετάβαση κροκαλοπαγών και λεπτομερών υλικών. Η υδροπερατότητα που χαρακτηρίζει τους ψαμμιτικούς σχηματισμούς προκύπτει τόσο λόγω του υψηλού πρωτογενούς ενεργού πορώδους όσο και ενός σημαντικού δευτερογενούς, που αναπτύσσεται λόγω τεκτονισμού (διακλάσεις, ρήγματα).

## • Πρακτικά Αδιαπέρατοι Σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι σχηματισμοί των εναλλαγών ιλυολίθων και ψαμμιτών του φλύσχη (fi.sl,st), των ιλυολίθων με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις (fi.sl2), και των ιλυολίθων (fi.sl1) όταν είναι υγιείς.

Στο σύνολο τους τα στρώματα των ιλυολίθων και ψαμμιτών χαρακτηρίζονται από χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Για την επιβεβαίωση των παραπάνω εκτιμήσεων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις.

Οι τιμές διαπερατότητας από δοκιμές LUGEON για τον σχηματισμό fi.st συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Γεώτρηση	Βάθος Δοκιμής (m)	Συντελεστής Υδροπερατότητα Κ (cm / sec)
	16.70 – 22.10	1.76 e-06
BT1 – 201	19.45 – 24.85	1.39 e-05
	25.90 – 30.30	5.94 e-06
BT1 – 203A	66.40 – 71.40	8.18 e-07
BTT - 200A	75.70 – 80.70	7.27 e-07
BT1 – 204	62.00 - 67.00	1.98 e-05
	69.95 – 74.95	2.84 e-06

Πίνακας 5.1: Τιμές συντελεστή διαπερατότητας σχηματισμού fi.st (Istria, 2009)

Η μέση τιμή διαπερατότητας για τον σχηματισμό υπολογίστηκε ίση με k = 6.54 e-06 cm / sec. Στο επίπεδο της σήραγγας και μια διάμετρο πάνω από αυτή (τιμές με έντονη γραφή) υπολογίζεται μέση περατότητα k = 4.30 e-06 cm / sec. ή 4.30 e-08 m / sec.

Οι τιμές διαπερατότητας από δοκιμές LUGEON για τους σχηματισμούς fi.sl,st και fi.sl2, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Τιμές συντελεστή διαπερατότητας σχηματισμού fi.sl,st και fi.sl2 (Istria, 2009)

Fachtongn	Ράθος Δοκιμός (m)	Συντελεστής Υδροπερατότητα
	Βάθος Δοκιμής (11)	K (cm / sec)
BT1 – 203	74.20 – 79.20	8.42 e-06
	82.60 - 87.60	8.12 e-06
BT1 – 205	102.30 – 107.30	7.38 e-07
	115.55 – 116.55	9.25 e-07

Η μέση τιμή διαπερατότητας για τους σχηματισμούς υπολογίστηκε ίση με k = 4.55 e-06 cm / sec. Στο επίπεδο της σήραγγας και μια διάμετρο πάνω από αυτή (τιμές με έντονη γραφή) υπολογίζεται μέση περατότητα k = 4.58 e-06 cm / sec ή 4.58 e-08 m / sec.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι, αναμένεται να συναντηθεί υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας μικρής δυναμικότητας κατά τη διάρκεια των εκσκαφών, στο σχηματισμό των ψαμμιτών. Επίσης στο σχηματισμό των λεπτών εναλλαγών ιλυολίθων και

ψαμμιτών είναι πιθανή η εκδήλωση υγρασίας ή η εκροή μικρών ποσοτήτων νερού στην επαφή των ψαμμιτικών στρώσεων με τους αδιαπέρατους ιλυόλιθους.

## 5.2.5 Υπόγειο Τμήμα – Περιγραφή Γεωλογικών Συνθηκών

Η σήραγγα της Καλυδώνας, αναμένεται να διανοιχθεί σε γεωλογικό περιβάλλον όπου οι φάσεις του φλύσχη εναλλάσσονται σε ίσα ποσοστά. Γενικά, η σήραγγα θα συναντήσει σε ποσοστό μήκους 30 % την ψαμμιτική φάση, κατά 30 % την ιλυολιθική φάση και κατά 40 % εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί από πλευράς λιθολογίας είναι:

- Fi.st: Πρόκειται για στρώμα όπου επικρατούν οι ψαμμίτες, οι οποίοι αναπτύσσονται σε μεγάλο πάχος που φτάνει στην περιοχή της εισόδου τα 30 m ενώ προς την έξοδο ο ορίζοντας των ψαμμιτών που αναμένεται να συναντηθεί, όπως φτάνει σε πάχος τα 90 m. Εμφανίζονται μέσο παχυστρωματώδεις με πάχος στρώσης 0,3 1,0 m. Συχνά η συνέχεια της λιθολογίας διακόπτεται από λεπτές παρεμβολές στρωμάτων ιλυολίθων ή στρωμάτων εναλλαγών ιλυολίθων και λεπτοστρωματωδών ψαμμιτών, των οποίων το πάχος δεν υπερβαίνει το 1 m.
- Fi.sl,st: Πρόκειται για στρώμα όπου οι λιθολογικοί χαρακτήρες των ιλυολίθων και των ψαμμιτών εναλλάσσονται σε στρώσεις πάχους 0,1 0,2 m. Σπανιότερα εντός του σχηματισμού παρατηρούνται στρώσεις μεγαλύτερου πάχους όπου επικρατεί η μία εκ των δύο φάσεων του φλύσχη στην περιοχή. Το πάχος του στρώματος αυτού αναγνωρίστηκε τόσο από επιφανειακές παρατηρήσεις όσο και από τις γεωτρήσεις, να κυμαίνεται από 10 20 m από την είσοδο έως το κεντρικό τμήμα της σήραγγας ενώ ο ορίζοντας που παρατηρείται στην περιοχή της εξόδου έχει πάχος μεγαλύτερο των 80 m.
- Fi.sl2: Πρόκειται για στρώμα όπου οι λιθολογικοί χαρακτήρες των ιλυολίθων υπερτερούν έναντι των ψαμμιτών, οι οποίοι αποτελούν αραιές στρώσεις πάχους 0,02 0,1 m μέσα σε ιλυολιθικό περιβάλλον. Το πάχος του στρώματος αναγνωρίστηκε στο ύπαιθρο αλλά και από τις γεωτρήσεις, να

κυμαίνεται από 50 – 80 m από την είσοδο έως το κεντρικό τμήμα της σήραγγας.

 Fi.sl1: Πρόκειται για στρώμα όπου συνίσταται από λεπτοστρωματώδεις ιλυόλιθους. Το πάχος του στρώματος αυτού αναγνωρίστηκε στο ύπαιθρο αλλά και από τις γεωτρήσεις, να κυμαίνεται από 10 – 15 m.

Πρέπει να τονιστεί ότι η αλληλουχία των σχηματισμών του φλύσχη στην περιοχή και το «πέρασμα» από την μία λιθολογική φάση στην άλλη, δεν γίνεται απότομα. Στρωματογραφικά, από τα παλαιότερα προς τα νεώτερα, μεσολαβούν συνήθως κάποιοι ορίζοντες μετάβασης, των οποίων λιθολογία και η δομή φανερώνει μία φθίνουσα πορεία των ιδιοτήτων των παλαιότερων, με ταυτόχρονη αυξητική πορεία των ιδιοτήτων του νεώτερου. Έτσι κατά την μετάβαση από τον σχηματισμό των ψαμμιτών προς αυτόν των εναλλαγών ιλυολίθων κυρίως και ψαμμιτών, μεσολαβούν κάποια στρώματα λεπτοστρωματώδους ψαμμίτη, τα οποία διακόπτονται από λεπτές ενδιαστρώσεις ιλυολίθων. Βαθμιαία οι στρώσεις των ιλυολίθων αυξάνονται σε πάχος, έως ότου οι ψαμμίτες εμφανίζονται σε σποραδικές ενδιαστρώσεις πάχους μερικών εκατοστών.

Η ιδιαίτερη αναφορά που γίνεται σε αυτά τα μεταβατικά στρώματα, σκοπό έχει να καθορίσει εκατέρωθεν των επαφών μία ζώνη, η οποία επιφανειακά παρατηρήθηκε σε πάχος 1 – 2 m και η οποία συναντάται σε μεγάλο βαθμό τόσο κατά την διάνοιξη του υπόγειου τμήματος, όσο και κατά την διαμόρφωση των έργων των στομίων εξόδου κυρίως. Οι γεωμηχανικές ιδιότητες της ζώνης αυτής είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές των «καθαρών» στρωμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Συνήθως, λαμβάνοντας υπ' όψη τα στοιχεία των γεωτρήσεων, εμφανίζονται περισσότερο ασθενείς, με μείωση του RQD σε ποσοστό έως και 10 %, οι διακλάσεις και γενικά οι ασυνέχειες εμφανίζονται διευρυμένες (άνοιγμα > 5 mm), πληρωμένες με αποσαθρωμένο υλικό. Επιφανειακά όπου παρατηρούνται παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση σαν αποτέλεσμα των χαμηλότερων ιδιοτήτων τους.

Σε ότι αφορά την γεωμετρία των σχηματισμών και την εξάπλωσή τους στον χώρο, η κλίση τους αναγνωρίστηκε από την έξοδο προς την Ανατολική είσοδο με κλίση 15° – 25°. Κατά την διάνοιξη της σήραγγας, τα στρώματα θα συναντηθούν κατά τη διατομή (φαινόμενη κλίση ως προς άξονα κάθετο στον άξονα της σήραγγας) σε οριζόντια θέση.

## 5.2.6 Περιγραφή Ασυνεχειών – Ασυνέχειες σε Βάθος

Με βάση τα δεδομένα των γεωτρήσεων δίνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών σε βάθος:

- Η απόσταση των ασυνεχειών κυμαίνεται μεταξύ 0.5 m και 1.0 m κατά κύριο λόγο. Ακόμα συναντώνται ασυνέχειες σε μικρότερη απόσταση, κυρίως στους ιλυολιθικούς σχηματισμούς, που αφορούν όμως μόνο στα επίπεδα της στρώσης.
- Η κλίση των ασυνεχειών (J) είναι μεγάλη και κυμαίνεται μεταξύ 70° και 90°.
  Σπανιότερα εμφανίζονται οριζόντιες και παραοριζόντιες ασυνέχειες, οι οποίες είναι συνήθως παράλληλες με τα επίπεδα της στρώσης.
- Οι ασυνέχειες είναι γενικά ελαφρά τραχείες έως τραχείες, επίπεδες και σπανιότερα καμπυλωμένες, κλειστές έως μερικώς ανοικτές (άνοιγμα < 2 mm).</li>

Γενικά, συναντώνται οι εξής περιπτώσεις όσον αφορά το υλικό πλήρωσης:

- Απουσία υλικού πλήρωσης
- Πλήρωση με άμμο και αποσαθρωμένο υλικό
- Μερική πλήρωση με μαλακό αργιλικό υλικό

Οι επιφάνειες έχουν συχνότερα ελαφρά αποσαθρωμένα έως υγιή τοιχώματα και σπανιότερα είναι μέτρια αποσαθρωμένες.

Γενικά, οι ασυνέχειες κλίνουν με το βάθος, μετά τα πρώτα 20 m, όπου συναντάται μέτριος κερματισμός και αποσάθρωση.

# • Προσδιορισμός της Διατμητικής Αντοχής των Ασυνεχειών

Για τις ασυνέχειες επιλέχθηκαν, στις αναλύσεις ευστάθειας, οι ακόλουθες παράμετροι αντοχής που αφορούν:

- φ = 30° (για τους ιλυολιθικούς σχηματισμούς) και
- φ = 35° με συνοχή c = 0 kPa (για τους ψαμμίτες)

Σε ότι αφορά την ταξινόμηση της βραχομάζας ακολουθεί πίνακας ταξινόμησης RMR (Bieniawski, 1989) για το αντίστοιχο βάθος κατά το οποίο θα διανοιχθεί η σήραγγα.

Πίνακας 5.3: Πίνακας ταξινόμησης βραχομάζας RMR σήραγγας δεξιού κλάδου
(Istria, 2009)

Γεώτρηση	Βάθος Διέλευσης Σήραγγας	Λιθολογία	Βάθος (m)	RMR	Κατηγορία Βραχομάζας
		Ψαμμίτης (fi.st)	0.6 – 6.75	43 - 53	
BT1 – 201	11.0 – 19.0	Ψαμμίτης (fi.st)	6.75 – 29.8	56 – 66	-
		Ιλυόλιθος (fi.sl₁)	29.8 – 34.1	41 – 46	
BT1 – 203A	67.0 – 75.0	Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις (fi.sl <sub>2</sub> ) και Εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων (fi.sl, st)	3.0 – 62.0	56 - 63	111 – 11
		Ψαμμίτης (fi.st)	62.0 – 90.0	65 – 74	II
ГГ11		Ιλυόλιθος σε εναλλαγές με ψαμμίτη (fi.sl, st)	2.5 – 25.0	54 – 63	111 – 11

Πίνακας 5.4: Πίνακας ταξινόμησης βραχομάζας RMR σήραγγας	5
αριστερού κλάδου (Istria, 2009)	

Γεώτρηση	Βάθος Διέλευσης Σήραγγας	Λιθολογία	Βάθος (m)	RMR	Κατηγορία Βραχομάζας
ГГ10		Ιλυόλιθος σε εναλλαγές με ψαμμίτη (fi.sl, st)	3.3 – 26.2	42 – 48	111
		Ψαμμίτης (fi.st)	26.2 - 45.0	56 – 66	-
		Ορίζοντας ψαμμίτη (fi.st)	2.3 – 7.0	45 – 56	
		Ιλυόλιθος (fi.sl₁)	7.0 – 20.0	32 - 42	IV – III
BT1 – 203	71.0 – 79.0	Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις (fi.sl₂) και Εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων (fi.sl, st)	20.0 – 100.5	52 - 63	111 – 11
BT1 – 204	49.0 – 57.0	Ιλυόλιθος με λεπτές ψαμμιτικές ενστρώσεις (fi.sl <sub>2</sub> ) και Εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων (fi.sl, st) Ψαυμίτης (fi.st)	4.3 – 29.3 29.3 – 86.8	54 – 63 65 – 74	–
		Ψαμμίτης (fi.st)	0.0 – 58.0	62 - 68	
		Ιλυόλιθος σε εναλλαγές με ψαμμίτη (fi.sl, st)	58.0 – 131.5	54 – 64	–

Στους σχηματισμούς όπου η ιλυολιθική και η ψαμμιτική φάση εναλλάσσονται είναι πιθανή η δημιουργία δυνητικών ολισθήσεων, όπως σφηνοειδή ολίσθηση στο μέτωπο ή / και τις παρειές και πτώσεις από την οροφή. Η διάνοιξη της σήραγγας εντός παρόμοιου περιβάλλοντος αναμένεται να παρουσιάσει φαινόμενα καταπτώσεων από την οροφή κυρίως λόγω του λεπτοστρωματώδους χαρακτήρα. Ο όγκος αυτών δεν αναμένεται μεγάλος λόγω των ψαμμιτικών ενστρώσεων που συμμετέχουν στην δομή του. Τα τεμάχη αποκόλλησης αναμένονται διαστάσεων 0,5 – 1,0 m<sup>3</sup>.

#### 5.2.7 Στόμια Σήραγγας

#### Τεχνικογεωλογικές Συνθήκες στο Στόμιο Εισόδου

Τα στόμια εισόδου της σήραγγας, πρόκειται να διαμορφωθούν σε πλαγιά με αρκετά ήπιο γενικά ανάγλυφο, η κλίση του οποίου δεν υπερβαίνει τις 16° στην περιοχή του δεξιού κλάδου και τις 20° στην περιοχή του αριστερού κλάδου.

Η περιοχή των στομίων εισόδου δομείται αποκλειστικά από το σχηματισμό των ψαμμιτών fi.st. Πρόκειται για συμπαγείς μεσο – παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, γκρίζου έως γκριζοκάστανου χρώματος, μεσοαδρόκοκκους με πάχος στρώσης 0,4 – 1,0 m που φέρουν αραιές λεπτές ιλυολιθικές ενστρώσεις, υγιείς έως ελαφρά αποσαθρωμένοι, και μόνο στα επιφανειακά στρώματα εμφανίζονται περισσότερο διακλασμένοι και αποσαθρωμένοι. Πρόκειται για βραχομάζα καλής ποιότητας που δεν αναμένεται να δημιουργήσει ιδιαίτερα προβλήματα στα έργα εισόδου. Η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης των ψαμμιτικών στρωμάτων είναι Α – ΒΑ με τιμή 10° έως 25°.

Από πλευράς τεκτονικής, στη βόρεια πλευρά του στομίου του δεξιού κλάδου χαρτογραφήθηκε ρήγμα κανονικής ολίσθησης και διεύθυνσης Α – Δ, το οποίο διακόπτει την επιφανειακή εμφάνιση του σχηματισμού των εναλλαγών ιλυολίθων και ψαμμιτών (fi.sl,st) που εντοπίζεται στην περιοχή νότια του αριστερού κλάδου.

Σύμφωνα και με τις μετρήσεις της στάθμης των νερών από γεωτρήσεις εντοπίζεται ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας στο στρώμα των ψαμμιτών με στάθμη που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους.

Από την ταξινόμηση της βραχομάζας RMR (Bieniawski, 1989), η κατηγορία της βραχομάζας στην περιοχή της εισόδου της σήραγγας αναμένεται να είναι καλή – μέτρια (κατηγορία ΙΙ - ΙΙΙ) με δείκτη RMR = 55 – 65.

#### Τεχνικογεωλογικές Συνθήκες στο Στόμιο Εξόδου

Τα στόμια εξόδου πρόκειται να κατασκευαστούν σε πλαγιά με επίσης πολύ ήπιο ανάγλυφο, με κλίση που δεν υπερβαίνει τις 20° και στους δύο κλάδους.

Στην περιοχή των στομίων εξόδου εμφανίζεται ο σχηματισμός των ιλυολίθων σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις ψαμμίτες (fi.sl,st). Πρόκειται για στρώμα όπου οι λιθολογικοί χαρακτήρες των ιλυολίθων και των ψαμμιτών εναλλάσσονται σε στρώσεις πάχους 0,02 – 0,1 m. Ο ελουβιακός μανδύας γενικά στην περιοχή της εξόδου αναμένεται να έχει μέγιστο πάχος περίπου 2 m.

Υδροφόρος ορίζοντας δεν αναμένεται να συναντηθεί στην περιοχή. Η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης των στρωμάτων είναι Α – ΒΑ με τιμή 15° έως 25°.

Από την ταξινόμηση της βραχομάζας RMR (Bieniawski, 1989η κατηγορία της βραχομάζας στην περιοχή της εξόδου της σήραγγας αναμένεται να είναι καλή – μέτρια (κατηγορία ΙΙ - ΙΙΙ) με δείκτη RMR = 55 – 65.

#### 5.2.8 Τεχνικογεωλογική Συμπεριφορά – Εκσκαψιμότητα Σχηματισμών

Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας περιγραφής των τεχνικογεωλογικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών που θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.

رالارا ما	aµóç	ς Ε Εκσκαψιμότητα Ε 3		ιορφία μενες καφών ότητα ρών	ότητα ούν		
Λιθολο <sup>,</sup> Σύστα	Συμβολι	Ευκολία αποσάθρ	Κατηγορία Ι – ΙV	Βράχος – Γαιοημί – βραχος	Avoµoioµ	Προτεινό κλίσεις εκσ	Καταλληλ εκσκαφ
Ελουβιακός μανδύας	el	Μεγάλη	I	Г	Μικρή	2:3	$E_0 - E_1$
Φλυσχικά κορήματα	H.sc	Μεγάλη	II	Г	Μικρή	2:3	$E_0 - E_1$
Ιλυόλιθοι	Fi.sl₁ Fi.sl₂	Μέτρια	–	В, Г	Μικρή	2 : 1	Ε₀ – Ε₁ Βραχώδες
Ιλυόλιθοι σε εναλλαγές με ψαμμίτες	Fi.sl, st	Μέτρια	III – IV	В, Г	Μικρή	2 : 1	Ε₀ – Ε₁ Βραχώδες
Ψαμμίτες	Fi.st	Μικρή	III – IV	В	Μικρή	3:1	Βραχώδες

Πίνακας 5.5: Τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών (Istria, 2009)

#### 5.3 Γεωτεχνικά Στοιχεία Σήραγγας Καλυδώνας

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι γεωτεχνικές ιδιότητες της βραχομάζας όπου πρόκειται να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη των δυο κλάδων της σήραγγας Καλυδώνας.

Για την εξέταση των γεωτεχνικών συνθηκών της περιοχής εξετάστηκαν στοιχεία από γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων, όπως επίσης και της γεωλογικής μηκοτομής προκύπτει ότι η περιοχή αποτελείται από φλύσχη, δηλαδή εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων. Το ποσοστό του κάθε στοιχείου του φλύσχη ποικίλει κατά μήκος της σήραγγας.

Κατά την διάνοιξη της σήραγγας ο σχηματισμός του φλύσχη αναμένεται να προκαλέσει κινηματικές αστοχίες από τη στέψη μέχρι τις παρειές. Στο συγκεκριμένο γεωυλικό δεν αναμένονται προβλήματα συγκλίσεων. Ακόμη, κρίνεται απαραίτητη η συστηματική άντληση υδάτων καθώς αναμένεται εισροή υδάτων κυρίως στις θέσεις όπου ο ψαμμίτης υπέρκειται των αδιαπέρατων σχηματισμών του ιλυόλιθων.

#### 5.3.1 Αξιολόγηση Γεωτεχνικών Ενοτήτων (Istria, 2009)

#### Περιγραφή και Αξιολόγηση Γεωτεχνικής Ενότητας Ι

Η συγκεκριμένη ενότητα περιλαμβάνει ιλυώδη άργιλο και αμμοχάλικο που βρίσκεται ως επιφανειακό υλικό είτε ως μορφή ελλούβιων είτε ως κωνικές αποθέσεις αποσαθρωμένων πετρωμάτων.

#### Μηχανικές Ιδιότητες – Παράμετροι Σχεδιασμού

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Παράμετροι Σχεδιασμού	Τιμή
Πυκνότητα	$\gamma = 20 - 22 \text{ kN} / \text{m}^3$
Ενεργός Συνοχή	c´ = 30 – 50 kPa
Ενεργός Γωνία Εσωτερικής Τριβής	$\varphi' = 36^\circ - 38^\circ$
Μέτρο Συμπιεστότητας	E <sub>s</sub> = 74 – 86 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας (Young)	E = 56 – 64 MPa (v = 0,3)

Πίνακας 5.6: Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας Ι (Istria, 2009)

# Περιγραφή και Αξιολόγηση Γεωτεχνικής Ενότητας ΙΙ<sub>Sa</sub>

Η ενότητα αποτελείται από φλύσχη με τη μορφή ελαφρώς αποσαθρωμένου ψαμμίτη και λεπτές ενστρώσεις ιλυολίθου. Τα δείγματα περιέχουν ασβεστούχο ψαμμίτης που εμπεριέχει ορυκτά όπως ασβεστίτη, χαλαζία, σερπεντίνη, μοσχοβίτη και μοντμοριλλονίτη. Η συγκεκριμένη γεωτεχνική ενότητα έχει τιμή RQD μεταξύ του 70 και του 100. Οι ασυνέχειες που βρίσκονται εντός της βραχομάζας έχουν κλίσεις 10° και 80°, με επίπεδες, τραχείες επιφάνειες είτε με υλικό πλήρωσης είτε χωρίς.

# • Ταξινόμηση Βραχομάζας

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Q (Barton, 1974) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση Q	17,5	75
Κατηγορία Βραχομάζας	Καλή	Πολύ Καλή

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά RMR (Bieniawski, 1989) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση RMR	65	78
Κατηγορία Βραχομάζας	(ΙΙ) Καλή	(Ι) Πολύ Καλή

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά GSI (Marinos & Hoek, 2000) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Ελάχιστη	Μέγιστη
Βαθμονόμηση GSI	65	80

## • Μηχανικές Ιδιότητες – Παράμετροι Σχεδιασμού

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Παράμετροι Σχεδιασμού	Τιμή
Πυκνότητα	$\gamma = 26 - 27 \text{ kN} / \text{m}^3$
Μονοαξονική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	σ <sub>c</sub> = 50 – 55 MPa
Εφελκυστική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	$\sigma_{ti}$ = 7 – 8 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Άρρηκτου Πετρώματος	E = 35 – 40 GPa
Λόγος Poisson Άρρηκτου Πετρώματος	v = 0,3
Ταξινόμηση κατά Q	17,5 – 75
Ταξινόμηση κατά RMR	65 – 78
Ταξινόμηση κατά GSI	65 – 80
Μονοαξονική Αντοχή Βραχομάζας	σ <sub>cm</sub> = 15 – 25 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Βραχομάζας	E <sub>cm</sub> = 20 – 25 MPa
Συνοχή Βραχομάζας	c = 1 – 2,5 MPa
Γωνία Διατμητικής Αντοχής Βραχομάζας	$\varphi = 55^{\circ} - 57^{\circ}$
Γωνία Εσωτερικής Τριβής Βραχομάζας	$\phi_p = 35^\circ - 37^\circ$
Διαπερατότητα Βραχομάζας	$K = 10^{-6} - 10^{-5} \text{ cm} / \text{sec}$

Πίνακας 5.7: Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> (Istria, 2009)

# • Περιγραφή και Αξιολόγηση Γεωτεχνικής Ενότητας ΙΙ<sub>si</sub>

Η ενότητα αποτελείται από φλύσχη με τη μορφή ελαφρώς αποσαθρωμένου, μετρίως κατατετμημένου, καλής διάστρωσης ιλυόλιθου. Τα δείγματα περιγράφονται ως αργιλομάζα με διάφορα ορυκτά όπως χαλαζία, ασβετίτη, μοσχοβίτη, σερπεντίνη, ενώ δε θεωρείται πιθανή η παρουσία διογκούμενων ορυκτών όπως ο μοντμοριλλονίτης.

Η συγκεκριμένη γεωτεχνική ενότητα έχει τιμή RQD μεταξύ του 70 και του 100. Οι ασυνέχειες που βρίσκονται εντός της βραχομάζας έχουν κλίσεις 10° και 80°, με επίπεδες και τραχείες έως λείες επιφάνειες είτε με υλικό πλήρωσης άμμου και ιλύος είτε χωρίς.

# • Ταξινόμηση Βραχομάζας

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Si</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Q (Barton, 1974) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση Q	8,75	37,5
Κατηγορία Βραχομάζας	Μέτρια	Καλή

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά RMR (Bieniawski, 1989) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση RMR	52	67
Κατηγορία Βραχομάζας	(III) Μέτρια	(ΙΙ) Καλή

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά GSI (Marinos & Hoek, 2000) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Ελάχιστη	Μέγιστη
Βαθμονόμηση GSI	55	65

# Μηχανικές Ιδιότητες – Παράμετροι Σχεδιασμού

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Παράμετροι Σχεδιασμού	Τιμή
Πυκνότητα	$\gamma = 26 - 26,5 \text{ kN} / \text{m}^3$
Μονοαξονική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	σ <sub>c</sub> = 15 – 20 MPa
Εφελκυστική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	σ <sub>ti</sub> = 2 – 3 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Άρρηκτου Πετρώματος	E = 20 – 25 GPa
Λόγος Poisson Άρρηκτου Πετρώματος	v = 0,3
Ταξινόμηση κατά Q	8,75 – 37,5
Ταξινόμηση κατά RMR	52 – 67
Ταξινόμηση κατά GSI	55 – 65
Μονοαξονική Αντοχή Βραχομάζας	$\sigma_{cm}$ = 2 – 5 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Βραχομάζας	E <sub>cm</sub> = 10 – 15 MPa
Συνοχή Βραχομάζας	c = 0,5 – 1 MPa
Γωνία Διατμητικής Αντοχής Βραχομάζας	$\varphi = 40^{\circ} - 42^{\circ}$
Γωνία Εσωτερικής Τριβής Βραχομάζας	$\varphi_p = 33^\circ - 35^\circ$
Διαπερατότητα Βραχομάζας	$K = 10^{-7} - 10^{-6} \text{ cm} / \text{sec}$

Πίνακας 5.8: Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> (Istria, 2009)

## Περιγραφή και Αξιολόγηση Γεωτεχνικής Ενότητας III<sub>Sa</sub>

Η ενότητα αυτή αποτελείται από φλύσχη με τη μορφή ελαφρώς αποσαθρωμένου, μετρίως κατατετμημένου ψαμμίτη με λεπτές ενστρώσεις ιλυόλιθου. Τα δείγματα περιγράφονται ως ασβεστούχος ψαμμίτης με διάφορα ορυκτά όπως ασβεστίτη, χαλαζία, μοσχοβίτη, σερπεντίνη και μοντμοριλλονίτη.

Η γεωτεχνική ενότητα III<sub>Sa</sub> έχει τιμή RQD μεταξύ του 40 και του 60. Οι ασυνέχειες που βρίσκονται εντός της βραχομάζας έχουν κλίσεις 10° και 80°, με επίπεδες, τραχείες επιφάνειες είτε με υλικό πλήρωσης άμμου και ιλύος είτε χωρίς.

## • Ταξινόμηση Βραχομάζας

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>si</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Q (Barton, 1974) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση Q	4,44	23,33
Κατηγορία Βραχομάζας	Μέτρια	Καλή

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά RMR (Bieniawski, 1989) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση RMR	50	63
Κατηγορία Βραχομάζας	(III) Μέτρια	(ΙΙ) Καλή

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά GSI (Marinos & Hoek, 2000) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Ελάχιστη	Μέγιστη
Βαθμονόμηση GSI	50	65

# Μηχανικές Ιδιότητες – Παράμετροι Σχεδιασμού

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Παράμετροι Σχεδιασμού	Τιμή
Πυκνότητα	$\gamma = 26 - 27 \text{ kN} / \text{m}^3$
Μονοαξονική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	σ <sub>c</sub> = 50 – 55 MPa
Εφελκυστική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	σ <sub>ti</sub> = 7 – 8 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Άρρηκτου Πετρώματος	E = 35 – 40 GPa
Λόγος Poisson Άρρηκτου Πετρώματος	v = 0,3
Ταξινόμηση κατά Q	4,44 – 23,33
Ταξινόμηση κατά RMR	50 – 63
Ταξινόμηση κατά GSI	50 – 65
Μονοαξονική Αντοχή Βραχομάζας	σ <sub>cm</sub> = 11 – 15 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Βραχομάζας	E <sub>cm</sub> = 10 – 15 MPa
Συνοχή Βραχομάζας	c = 0,7 – 1,3 MPa
Γωνία Διατμητικής Αντοχής Βραχομάζας	$\varphi = 50^\circ - 55^\circ$
Γωνία Εσωτερικής Τριβής Βραχομάζας	$\varphi_p = 35^\circ - 37^\circ$
Διαπερατότητα Βραχομάζας	K = 10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-6</sup> cm / sec

Πίνακας 5.9: Παράμετροι σχεδιασμού της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> (Istria, 2009)

# • Περιγραφή και Αξιολόγηση Γεωτεχνικής Ενότητας ΙΙΙ<sub>si</sub>

Η ενότητα αυτή αποτελείται από φλύσχη με τη μορφή ελαφρώς αποσαθρωμένου, μετρίως κατατετμημένου ψαμμίτη, καλής διάστρωσης ιλυόλιθου. Τα δείγματα περιέχουν διάφορα ορυκτά όπως χαλαζία, ασβεστίτη, μοσχοβίτη, σερπεντίνη ενώ δε θεωρείται πιθανή η παρουσία διογκούμενων ορυκτών όπως ο μοντμοριλλονίτης.

Η γεωτεχνική ενότητα III<sub>Si</sub> έχει τιμή RQD μεταξύ του 40 και του 60. Οι ασυνέχειες που βρίσκονται εντός της βραχομάζας έχουν κλίσεις 10° και 80°, με επίπεδες, λείες επιφάνειες είτε με υλικό πλήρωσης άμμου και ιλύος είτε χωρίς.

# • Ταξινόμηση Βραχομάζας

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Si</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Q (Barton, 1974) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση Q	1,48	5,83
Κατηγορία Βραχομάζας	Φτωχή	Μέτρια

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά RMR (Bieniawski, 1989) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Από	Έως
Βαθμονόμηση RMR	42	53
Κατηγορία Βραχομάζας	(III) Μέτρια	(III) Μέτρια

Η ταξινόμηση της γεωτεχνικής ενότητας II<sub>Sa</sub> σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά GSI (Marinos & Hoek, 2000) συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Ελάχιστη	Μέγιστη
Βαθμονόμηση GSI	40	50
# • Μηχανικές Ιδιότητες – Παράμετροι Σχεδιασμού

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Παράμετροι Σχεδιασμού	Τιμή
Πυκνότητα	$\gamma = 26 - 26,5 \text{ kN} / \text{m}^3$
Μονοαξονική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	σ <sub>c</sub> = 15 – 20 MPa
Εφελκυστική Αντοχή Άρρηκτου Πετρώματος	$\sigma_{ti}$ = 2 – 3 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Άρρηκτου Πετρώματος	E = 20 – 25 GPa
Λόγος Poisson Άρρηκτου Πετρώματος	v = 0,3
Ταξινόμηση κατά Q	1,48 – 5,83
Ταξινόμηση κατά RMR	42 – 53
Ταξινόμηση κατά GSI	40 – 50
Μονοαξονική Αντοχή Βραχομάζας	$\sigma_{cm}$ = 2 – 3 MPa
Μέτρο Παραμόρφωσης Βραχομάζας	E <sub>cm</sub> = 3 – 6 MPa
Συνοχή Βραχομάζας	c = 0,3 – 0,4 MPa
Γωνία Διατμητικής Αντοχής Βραχομάζας	$\varphi = 35^{\circ} - 40^{\circ}$
Γωνία Εσωτερικής Τριβής Βραχομάζας	$\varphi_p = 30^\circ - 35^\circ$
Διαπερατότητα Βραχομάζας	$K = 10^{-6} - 10^{-5} \text{ cm} / \text{sec}$

# 5.3.2 Συμπεριφορά της Βραχομάζας

## 5.3.2.1 Αρχικό Εντατικό Πεδίο

Το αρχικό εντατικό πεδίο της βραχομάζας αποτελείται από τρεις κύριες τάσεις τις σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>, και σ<sub>3</sub>. Από αυτές η σ<sub>1</sub> θεωρείται ως η μέγιστη κύρια τάση, η σ<sub>3</sub> θεωρείται ως η ελάχιστη κύρια τάση και η σ<sub>2</sub> ως η ενδιάμεση κύρια τάση. Ο προσανατολισμός των κυρίων τάσεων σε κάθε θέση εξαρτάται από τη μορφολογία και την τεκτονική της περιοχής, όπως επίσης και από τη γεωλογική ιστορία της βραχομάζας.

Σε διδιάστατο πεδίο θεωρείται ότι εφαρμόζονται σε καρτεσιανό σύστημα μόνο η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση. Αυτό σημαίνει ότι η σ<sub>3</sub> = σ<sub>h</sub> και είναι στην οριζόντια διεύθυνση και ότι η σ<sub>1</sub> = σ<sub>v</sub> είναι στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Για τον καλύτερο προσδιορισμό του συντελεστή Κ θεωρείται σημαντικό να πραγματοποιηθούν επί τόπου δοκιμές. Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα προσδιορισμού του Κ σύμφωνα με το Shoerey, από όπου για βάθος 80 m περίπου για το φλύσχη η τιμή του Κ είναι από 1 έως 4,5. Στην περίπτωση όπου το γεωυλικό είναι δυσμενέστερης κατάστασης και συνεπώς μικρότερου Μέτρου Ελαστικότητας (E<sub>h</sub>) η τιμή του Κ είναι από 0,6 έως 1. Λαμβάνοντας επίσης και την τεκτονική της περιοχής του Κορινθιακού κόλπου με την κίνηση κατά B – N σύμφωνα με δημοσιεύσεις (Chatzipetros et al., 2005) η παράμετρος Κ μπορεί να θεωρηθεί μικρότερη του 1 και συγκεκριμένα μεταξύ των τιμών K = 0,5 – 0,8.



**Σχήμα 5.4:** Κατανομή του Κ σε σχέση του βάθους ως προς το οριζόντιο μέτρο Ελαστικότητας (Istria, 2009)

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η τοπογραφία στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας Καλυδώνας είναι έντονη με αποτέλεσμα τα διανύσματα των κυρίων τάσεων να έχουν μεταβλητές θέσεις ανάλογα με το βάθος διερεύνησης. Κάτι τέτοιο καθιστά πολύ δύσκολη την εκτίμηση της τιμής του Κ με ακρίβεια.

# 5.3.2.2 Συμπεριφορά της Βραχομάζας (Istria, 2009)

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η συμπεριφορά των γεωτεχνικών ενοτήτων κατά τη διάνοιξη χωρίς τη χρήση κάποιας υποστήριξης.

# • Συμπεριφορά Τύπου Α : Γεωτεχνική Ενότητα II<sub>sa</sub>

Αναμένεται σταθερή συμπεριφορά χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ είναι πιθανές κινηματικές αστοχίες μικρής έκτασης. Δεδομένης της κατάστασης των ασυνεχειών και του πεδίου τάσεων σε σχέση με την αύξηση του βάθους δεν αναμένονται να προκληθούν ιδιαίτερες αποκολλήσεις σφηνών.

Σε ότι αφορά τα υπόγεια νερά αναμένεται τοπική εμφάνιση στις θέσεις όπου ο ψαμμίτης συναντά το αδιαπέρατο στρώμα του ιλυόλιθου.

Δεν προβλέπεται να αντιμετωπιστεί κάποια κατάσταση με αυξημένο ρίσκο, όπως επίσης δεν αναμένονται ακτινικές παραμορφώσεις.

# • Συμπεριφορά Τύπου Β : Γεωτεχνική Ενότητα II<sub>si</sub>

Αναμένεται σταθερή συμπεριφορά χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις, με πιθανές κινηματικές αστοχίες μικρής έκτασης. Δεδομένης της κατάστασης των ασυνεχειών και του πεδίου τάσεων σε σχέση με την αύξηση του βάθους δεν αναμένονται να προκληθούν ιδιαίτερες αποκολλήσεις σφηνών.

Σε ότι αφορά τα υπόγεια νερά δεν αναμένεται οποιαδήποτε εμφάνιση εξαιτίας της παρουσίας του αδιαπέρατου στρώματος του ιλυόλιθου.

Δεν προβλέπεται να αντιμετωπιστεί κάποια κατάσταση με αυξημένο ρίσκο, όπως επίσης δεν αναμένονται ακτινικές παραμορφώσεις.

# • Συμπεριφορά Τύπου C : Γεωτεχνική Ενότητα Ill<sub>Sa</sub>

Αναμένεται σταθερή συμπεριφορά χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ είναι πιθανές κινηματικές αστοχίες μικρής έκτασης. Δεδομένης της κατάστασης των ασυνεχειών και του πεδίου τάσεων σε σχέση με την αύξηση του βάθους δεν αναμένονται να προκληθούν ιδιαίτερες αποκολλήσεις σφηνών. Σε ότι αφορά τα υπόγεια νερά αναμένεται τοπική εμφάνιση στις θέσεις όπου ο ψαμμίτης συναντά το αδιαπέρατο στρώμα του ιλυόλιθου.

Δεν προβλέπεται να αντιμετωπιστεί κάποια κατάσταση με αυξημένο ρίσκο, όπως επίσης δεν αναμένονται ακτινικές παραμορφώσεις.

## • Συμπεριφορά Τύπου D : Γεωτεχνική Ενότητα III<sub>si</sub>

Αναμένεται σταθερή συμπεριφορά χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις, με πιθανές κινηματικές αστοχίες μικρής έκτασης. Δεδομένης της κατάστασης των ασυνεχειών και του πεδίου τάσεων σε σχέση με την αύξηση του βάθους δεν αναμένονται να προκληθούν ιδιαίτερες αποκολλήσεις σφηνών.

Σε ότι αφορά τα υπόγεια νερά δεν αναμένεται οποιαδήποτε εμφάνιση εξαιτίας της παρουσίας του αδιαπέρατου στρώματος του ιλυόλιθου.

Δεν προβλέπεται να αντιμετωπιστεί κάποια κατάσταση με αυξημένο ρίσκο, όπως επίσης δεν αναμένονται ακτινικές παραμορφώσεις.

## 5.3.3 Υδρογεωλογικές Συνθήκες (Istria, 2009)

Από τη λιθολογική πλευρά του φλύσχη όπως επίσης και από την πραγματοποίηση δοκιμών διαπερατότητας εκτιμάται ότι ο φλύσχης είναι πολύ μικρής έως μικρής διαπερατότητας. Υψηλότερες τιμές διαπερατότητας αναμένονται στα κατατετμημένα τμήματα του φλύσχη όπου αυτό συναντάται. Οι ψαμμίτες αναμένονται να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές διαπερατότητας από αυτές των ιλυολίθων. Στις περιοχές όπου αναμένονται συνεχόμενες εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων η διαπερατότητα αναμένεται να έχει χαμηλές τιμές.

Συντελεστής Διαπερατότητας	Γεωτεχνική Ενότητα		
	II <sub>Sa,Si</sub> — III <sub>Sa,Si</sub>		
К	10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-7</sup> (cm / sec)		

#### 5.4 Ανάλυση Προσωρινής Υποστήριξης Σήραγγας Καλυδώνας (Istria, 2009)

Στη σήραγγα Καλυδώνας γίνεται χρήση της μεθόδου αυτο – υποστήριξης της βραχομάζας αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά της ως κύριο στοιχείο υποστήριξης. Με αυτή τη μέθοδο κυρίως προστατεύεται η διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας από την αποσάθρωση της εκτεθειμένης βραχομάζας, διατηρώντας στη θέση τους τα κύρια στοιχεία βράχων έναντι κίνησης ή αποκόλλησης. Πραγματοποιείται επίσης ενίσχυση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που περιέχει μεταλλικές ίνες και πλήρως ενεματωμένα αγκύρια βράχου ή τύπου swellex, όπως επίσης και δικτυωτά πλαίσια (lattice girders). Στις περιοχές με χαμηλά υπερκείμενα, γίνεται χρήση μεταλλικών πλαισίων και ράβδων προπορείας, όπου κρίνονται απαραίτητα.

Η επιλογή του συστήματος προσωρινής υποστήριξης βασίζεται στην κατηγορία βραχομάζας και στη συμπεριφορά της κατά μήκος της σήραγγας. Κύριος σκοπός είναι να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός της σήραγγας σε περιοχές που οι συνθήκες βραχομάζας που συναντώνται είναι παρόμοιες και οι απαιτήσεις προσωρινής υποστήριξης είναι οι ίδιες.

Για την κατασκευή της σήραγγας Καλυδώνας επιλέχθηκαν τέσσερις κύριες κατηγορίες προσωρινής υποστήριξης, σύμφωνα με τις κατηγορίες βραχομάζας, τους τύπους συμπεριφοράς και τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος.

Η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης βραχομάζας PS–A επιλέχθηκε για τις κατηγορίες βραχομάζας A (II<sub>Sa</sub>) και το 80 % της B (II<sub>Si</sub>) με RMR > 61. Για το λόγο ότι οι δύο κατηγορίες βραχομάζας έχουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορές κρίνεται δυνατό να χρησιμοποιηθεί μία κατηγορία υποστήριξης βράχου και για τις δύο κατηγορίες βραχομάζας.

Η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης βραχομάζας PS–B επιλέχθηκε για τις κατηγορίες βραχομάζας B (II<sub>Si</sub>) με 52 < RMR < 61 (~ 20 %) και εφόσον συναντηθεί κατά τη διάνοιξη το 90 % της C (III<sub>Sa</sub>) με RMR > 54. Για το λόγο ότι οι δύο κατηγορίες βραχομάζας έχουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορές κρίνεται δυνατό να χρησιμοποιηθεί μία κατηγορία υποστήριξης βράχου και για τις δύο κατηγορίες βραχομάζας.

Η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης βραχομάζας PS–C επιλέχθηκε για τις κατηγορίες βραχομάζας C (III<sub>Sa</sub>) με 50 < RMR < 54 (~ 10 %) εφόσον συναντηθεί και D (III<sub>Si</sub>). Για το λόγο ότι οι δύο κατηγορίες βραχομάζας έχουν παρόμοιες

μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορές κρίνεται δυνατό να χρησιμοποιηθεί μία κατηγορία υποστήριξης βράχου και για τις δύο κατηγορίες βραχομάζας.

Για τις περιοχές που βρίσκονται κοντά στα στόμια εισόδου και εξόδου όπου υπάρχει χαμηλό ύψος υπερκειμένων και συνθήκες μεγαλύτερου κερματισμού και αποσάθρωσης προτιμήθηκε η κατηγορία προσωρινής υποστήριξης βραχομάζας PS–D.

#### 5.4.1 Κατηγορίες Υποστήριξης Βραχομάζας (Istria, 2009)

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της κάθε κατηγορίας υποστήριξης ξεχωριστά. Να σημειωθεί ότι τα σχέδια των διατομών υποστήριξης παρατίθενται στο Παράρτημα.

#### Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – Α

Αποτελεί το 62,5 % του συνόλου της σήραγγας (747 m) για τον αριστερό κλάδο και το 64,3 % του συνόλου της σήραγγας (755 m) για το δεξιό κλάδο. Το βήμα εκσκαφής είναι από 2,5 έως 3,0 m και για τους δύο κλάδους. Τα αγκύρια βράχου που θα τοποθετηθούν είναι είτε πλήρως ενεματωμένα S500s είτε τύπου swellex των 100 kN. Το μήκος τους είναι 3 m με διάμετρο Ø25 σε κάνναβο 2,5 x 2,5. Το πάχος του σκυροδέματος είναι 10 cm με τον οπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να είναι 40 kg / m<sup>3</sup>. Δεν προβλέπεται η τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων όπως ούτε δοκών προπορείας.

#### Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – Β

Αποτελεί το 21 % του συνόλου της σήραγγας (252,88 m) για τον αριστερό κλάδο και το 20,5 % του συνόλου της σήραγγας (246,5 m) για το δεξιό κλάδο. Το βήμα εκσκαφής είναι από 2,0 έως 2,5 m και για τους δύο κλάδους. Τα αγκύρια βράχου που θα τοποθετηθούν είναι είτε πλήρως ενεματωμένα S500s είτε τύπου swellex των 100 kN. Το μήκος τους είναι 4 m με διάμετρο Ø25 σε κάνναβο 2,0 x 2,0. Το πάχος του σκυροδέματος είναι 12 cm με τον οπλισμό του

εκτοξευόμενου σκυροδέματος να είναι 40 kg / m<sup>3</sup>. Δεν προβλέπεται η τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων όπως ούτε δοκών προπορείας.

# • Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – C

Αποτελεί το 7,8 % του συνόλου της σήραγγας (94,59 m) για τον αριστερό κλάδο και το 9,1 % του συνόλου της σήραγγας (115,96 m) για το δεξιό κλάδο. Το βήμα εκσκαφής είναι από 1,5 έως 2,0 m και για τους δύο κλάδους. Τα αγκύρια βράχου που θα τοποθετηθούν είναι είτε πλήρως ενεματωμένα S500s είτε τύπου swellex των 100 kN. Το μήκος τους είναι 4 m με διάμετρο Ø25 σε κάνναβο 1,5 x 2,0. Το πάχος του σκυροδέματος είναι 16 cm με τον οπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να είναι 40 kg / m<sup>3</sup>. Προβλέπεται η τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων (lattice girders) 3 bar – 70/10/30/20 ανά 1,5 m. Δεν προβλέπεται η χρήση δοκών προπορείας στην κατηγορία αυτή.

# Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – D

Αποτελεί το 8,7 % του συνόλου της σήραγγας (104,1 m) για τον αριστερό κλάδο και το 6,1 % του συνόλου της σήραγγας (72,85 m) για το δεξιό κλάδο. Το βήμα εκσκαφής είναι από 1,5 έως 2,0 m και για τους δύο κλάδους. Τα αγκύρια βράχου που θα τοποθετηθούν είναι είτε πλήρως ενεματωμένα S500s είτε τύπου swellex των 100 kN. Το μήκος τους είναι 4 m με διάμετρο Ø25 σε κάνναβο 1,5 x 1,5. Το πάχος του σκυροδέματος είναι 18 cm με τον οπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να είναι 40 kg / m<sup>3</sup>. Προβλέπεται η τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων HEB 140 ανά 1,5 m. Ακόμη προβλέπεται η χρήση ράβδων προπορείας μήκους 6 m διαμέτρου Ø25 με επικάλυψη 1,5 – 2,0 m και απόσταση από κέντρο σε κέντρο ίση με 40 – 50 m.

#### 5.4.2 Μέθοδος Εκσκαφής και Υποστήριξης Βραχομάζας (Istria, 2009)

#### Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – Α

Σε πρώτη φάση γίνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με βήμα εκσκαφής ίσο με 2,5 – 3,0 m. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Ακολουθεί έπειτα η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 3 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 2,5 x 2,5 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 40 kg / m<sup>3</sup> και τα υπόλοιπα 3 cm είναι το άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.

Σε δεύτερη φάση γίνεται η εκσκαφή της βαθμίδας με βήμα προχώρησης 5,0 – 6,0 m διατηρώντας απόσταση ασφαλείας 20 m από το μέτωπο της άνω ημιδιατομής. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Ακολουθεί έπειτα η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 3 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 2,5 x 2,5 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 8,5 cm, όπου τα 5,5 cm περιέχουν μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup> και τα υπόλοιπα 3 cm είναι το άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.

## Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – Β

Σε πρώτη φάση γίνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με βήμα εκσκαφής ίσο με 2,0 – 2,5 m. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Ακολουθεί έπειτα η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 4 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 2,0 x 2,0 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10,5 cm,

όπου τα 7,5 cm περιέχουν μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup> και τα υπόλοιπα 3 cm είναι το άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.

Σε δεύτερη φάση γίνεται η εκσκαφή της βαθμίδας με βήμα προχώρησης 4,0 – 5,0 m διατηρώντας απόσταση ασφαλείας 20 m από το μέτωπο της άνω ημιδιατομής. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Ακολουθεί έπειτα η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 4 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 2,0 x 2,0 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10,5 cm, όπου τα 7,5 cm περιέχουν μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup> και τα υπόλοιπα 3 cm είναι το άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.

## Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – C

Σε πρώτη φάση γίνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με βήμα εκσκαφής ίσο με 1,5 – 2,0 m. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια ακολουθεί η τοποθέτηση δικτυωτών πλαισίων στην ίδια απόσταση με το βήμα που χρησιμοποιείται. Τα πλαίσια είναι τύπου lattice girders 70/10/30/20. Έπειτα γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 11,5 cm που περιέχει μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>, έως την εσωτερική παρειά του δικτυωτού πλαισίου. Ακολούθως πραγματοποιείται η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 4 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 1,5 x 2,0 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της τρίτης στρώσης.

Σε δεύτερη φάση γίνεται η εκσκαφή της βαθμίδας με βήμα προχώρησης 3,0 – 4,0 m διατηρώντας απόσταση ασφαλείας 30 m από το μέτωπο της άνω ημιδιατομής. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια ακολουθεί η σύνδεση των πλαισίων (lattice girders) της άνω ημιδιατομής με την επέκταση της βαθμίδας στην ίδια απόσταση με το βήμα που χρησιμοποιείται. Έπειτα γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 11,5 cm που περιέχει μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>, έως την εσωτερική παρειά του δικτυωτού πλαισίου. Ακολούθως πραγματοποιείται η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 4 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 1,5 x 2,0 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της τρίτης στρώσης άοπλου σκυροδέματος πάχους 3 cm ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.

#### Κατηγορία Υποστήριξης Βραχομάζας PS – D

Σε πρώτη φάση γίνεται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με βήμα εκσκαφής ίσο με 1,5 – 2,0 m. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια ακολουθεί η τοποθέτηση των μεταλλικών πλαισίων στην ίδια απόσταση με το βήμα που χρησιμοποιείται. Τα πλαίσια είναι τύπου HEB 140. Έπειτα γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 13,5 cm που περιέχει μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Ακολούθως πραγματοποιείται η τοποθέτηση στοιχείων υποστήριξης προπορείας (spiles), όπου απαιτείται. Οι ράβδοι θα είναι Ø 25, S500s, μήκους 6 m. Οι ράβδοι Προπορείας τοποθετούνται με 1,5 έως 2,0 m επικάλυψη σύμφωνα με το βήμα εκσκαφής. Τα αγκύρια προπορείας τοποθετούνται με ανωφερική κλίση 7 – 10°. Η απόσταση από κέντρο σε κέντρο των ράβδων προπορείας είναι 40 – 50 cm και το τόξο που θα καλύπτουν θα είναι ± 45° από τον άξονα. Στη συνέχεια ακολουθεί η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 4 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 1,5 x 1,5 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της τρίτης στρώσης άοπλου σκυροδέματος πάχους 3 cm ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.

Σε δεύτερη φάση γίνεται η εκσκαφή της βαθμίδας με βήμα προχώρησης 3,0 – 4,0 m διατηρώντας απόσταση ασφαλείας 30 m από το μέτωπο της άνω ημιδιατομής. Στο σημείο αυτό γίνεται η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 1,5 cm C20/25 με μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Στη συνέχεια ακολουθεί η σύνδεση των μεταλλικών πλαισίων (HEB) της άνω ημιδιατομής με την επέκταση της βαθμίδας στην ίδια απόσταση με το βήμα που χρησιμοποιείται. Έπειτα γίνεται η εφαρμογή της δεύτερης στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 13,5 cm που περιέχει μεταλλικές ίνες 40 kg / m<sup>3</sup>. Ακολούθως πραγματοποιείται η διάτρηση, τοποθέτηση και ενεμάτωση είτε των αγκυρίων βράχου Ø25 S500s μήκους 4 m σε πεσσοειδή κάνναβο διαστάσεων 1,5 x 1,5 m είτε των αγκυρίων τύπου swellex των 100kN. Τέλος γίνεται η εφαρμογή της τρίτης στρώσης άοπλου σκυροδέματος πάχους 3 cm ως εξωτερική στρώση εξομάλυνσης.



Εικόνα 5.5: Φωτογραφία όπου φαίνεται η ανισότροπη δομή του Φλύσχη (Istria, 2009)



Εικόνα 5.6: Φωτογραφία όπου φαίνεται το βήμα προχώρησης και το μεταλλικό στοιχείο υποστήριξης (Istria, 2009)

# Προσομοίωση Σήραγγας Καλυδώνας

#### 6.1 Εισαγωγή

Για τον υπολογισμό της επίδρασης της ανισοτροπίας στη μέγιστη αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα της υποστήριξης αλλά και στις μετατοπίσεις κατά τη διαδικασία εκσκαφής της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC.

Για τα προσομοιώματα έγινε η χρήση της κατηγορίας υποστήριξης βραχομάζας PS – Α, η οποία αφορά την κατηγορία βραχομάζας Β (II<sub>Si</sub>) για ύψος υπερκειμένων 80 m, όπως αυτές περιγράφονται σε προηγούμενη παράγραφο.

Το πλέγμα έχει διαστάσεις 120 m × 120 m και αποτελείται από δύο καννάβους έναν εξωτερικό και έναν πυκνότερο εσωτερικό κάνναβο. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση αυτή είναι η παρεμπόδιση των οριζοντίων μετατοπίσεων στα πλευρικά όρια και η παρεμπόδιση των κατακόρυφων μετατοπίσεων στη βάση.



**Σχήμα 6.1:** Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων

# 6.2 Παρουσίαση Προσομοιώματος

Όπως προαναφέρθηκε για την προσομοίωση της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε η τυπική διατομή προσωρινής υποστήριξης PS – Α. Παρακάτω δίνεται στο Σχήμα 6.2 η εικόνα του καννάβου πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση της σήραγγα Καλυδώνας στο πρόγραμμα FLAC.



Σχήμα 6.2: Λεπτομέρειες καννάβου της διατομής της σήραγγας

#### 6.3 Μεθοδολογία Αναλύσεων

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης, για να είναι ακριβής πρέπει να αναπαράγει στο βαθμό του δυνατού τα βήματα που ακολουθούνται κατά την κατασκευή. Ειδικότερα απαιτείται η προσομοίωση:

- Της σύγκλισης της βραχομάζας πριν από την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης
- Της βαθμιαίας ενεργοποίησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης

Στοιχείο από την εμπειρία και από τη βιβλιογραφία αποτελεί ότι μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας έχει ήδη συμβεί ένα ποσοστό της μετατόπισης λόγω χαλάρωσης του εδάφους. Η μετατόπιση αυτή ολοκληρώνεται όταν η προσωρινή υποστήριξη ενεργοποιηθεί πλήρως. Η προσομοίωση του φαινομένου αυτού γίνεται είτε μέσω της σταδιακής απομείωσης του μέτρου Ελαστικότητας είτε μέσω της σταδιακής πίεσης στην περιφέρεια της σήραγγας.

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε η τεχνική της σταδιακής απομείωσης της εσωτερικής πίεσης στην περιφέρεια της σήραγγας.

Η επίλυση των μοντέλων προσομοίωσης πραγματοποιείται σε στάδια, τα οποία αντιστοιχούν στα εξής:

- 1. Αρχικές γεωστατικές τάσεις
- 2. Προσομοίωσης χαλάρωσης της βραχομάζας για την άνω ημιδιατομής
- Τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος και περαιτέρω χαλάρωση της βραχομάζας της άνω ημιδιατομής
- 4. Πλήρης αποτόνωση της βραχομάζας της άνω ημιδιατομής
- 5. Προσομοίωσης χαλάρωσης της βραχομάζας για τη βαθμίδα
- Τοποθέτηση αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος και περαιτέρω χαλάρωσης της βραχομάζας για τη βαθμίδα
- 7. Πλήρης αποτόνωση της βραχομάζας για τη βαθμίδα

Στον Πίνακα 6.1 δίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασία προσομοίωσης που ακολουθήθηκε.

Πίνακας 6.1: Περιγραφή εργασιών και συνολικό ποσοστό χαλάρωσης κατά τα
στάδια προσομοίωσης με το FLAC

Κατηγορία Προσωρινής Υποστήριξης PS – Α				
Στάδιο	Περιγραφή Εργασιών	Συνολικό Ποσοστό Χαλάρωσης		
0	Αρχικό γεωστατικό πεδίο	_		
1	Αποτόνωση άνω ημιδιατομής	35 %		
	Άνω ημιδιατομή: εκσκαφή και τοποθέτηση αγκυρίων και			
2	εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm με μέτρο	47 %		
	Ελαστικότητας Ε = 6 GPa			
	Άνω ημιδιατομή: ολοκλήρωση του εκτοξευόμενου			
3	σκυροδέματος μέχρι πάχους 10 cm με μέτρο Ελαστικότητας	100 %		
	εκτοξευόμενου σκυροδέματος πλήρης ακαμψίας Ε = 15 GPa			
4	Αποτόνωση βαθμίδας	35 %		
	Βαθμίδα: εκσκαφή και τοποθέτηση αγκυρίων και			
5	εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 4 cm με μέτρο	47 %		
	Ελαστικότητας Ε = 6 GPa			
	Βαθμίδα: ολοκλήρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μέχρι			
6	πάχους 10 cm με μέτρο Ελαστικότητας εκτοξευόμενου	100 %		
	σκυροδέματος πλήρης ακαμψίας Ε = 15 GPa			

#### 6.4 Εισαγωγή Εντατικής Κατάστασης

Όσον αφορά το φυσικό εντατικό πεδίο πριν την εκσκαφή γίνεται η παραδοχή ότι οφείλεται στο ίδιο βάρος των υπερκειμένων. Σε κάθε στοιχείο οι κατακόρυφες τάσεις υπολογίζονται από το φαινόμενο βάρος των διαφόρων σχηματισμών συναρτήσει του βάθους. Οι οριζόντιες τάσεις υπολογίζονται ως ποσοστό των κατακόρυφων τάσεων με βάση το συντελεστή πλευρικών πιέσεων Κ<sub>0</sub>.

Επιλέχθηκε να κατασκευαστούν τρεις ομάδες μοντέλων προσομοίωσης για τρεις τιμές του λόγου οριζόντιων προς κατακόρυφων τάσεων ( $K_o$ ). Επιλέχθηκαν οι τιμές για  $K_o = 0,5$ , για  $K_o = 1,0$  και για  $K_o = 1,5$ . Συνεπώς δόθηκαν οι τιμές για τις κατακόρυφες και τις οριζόντιες γεωστατικές τάσεις αντίστοιχα λαμβάνοντας υπόψη ύψος υπερκειμένων περίπου ίσο με 80 m.

$$\sigma_{\rm v} = \gamma \, \times {\rm H}_0 \tag{6.1}$$

$$\sigma_{\rm h} = K_0 \times \gamma_{\rm v} \tag{6.2}$$

όπου,

γ: φαινόμενο βάρος υπερκείμενων σχηματισμών

Η₀: ύψος υπερκειμένων

Κ₀: συντελεστής πλευρικών ωθήσεων

# 6.5 Μέτρα Προσωρινής Υποστήριξης

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο για τα προσομοιώματα έγινε η χρήση της κατηγορίας υποστήριξης βραχομάζας PS – Α. Συνοπτικά η υποστήριξη περιλαμβάνει:

- Αγκύρια βράχου μήκους 3 m, πλήρως ενεματωμένα (S500s) ή swellex (100 kN), διατομής Ø25 σε κάνναβο 2,5 x 2,5.
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10 cm, μέτρου Ελαστικότητας 15 GPa.

Σύμφωνα με την περιγραφή που δόθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για τα δομικά στοιχεία στο FLAC επιλέχθηκε τα αγκύρια να προσομοιωθούν με το μοντέλο "Rockbolt" και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με το μοντέλο "Liner".

# 6.6 Περιγραφή Παραμέτρων Προσομοιώματος

Όπως θα περιγραφεί αναλυτικά και παρακάτω επιλέχθηκε να γίνει προσομοίωση τεσσάρων ομάδων μοντέλων. Η πρώτη αφορά ένα ελαστικό μέσο, η δεύτερη ένα μέσο Mohr – Coulomb και η τρίτη ένα μέσο με ιδιότητες του μοντέλου "Ubiquitous Joint" με χαρακτηριστικά όπως αυτά των παραμετρικών αναλύσεων που προηγήθηκαν. Τέλος κατασκευάστηκε και μία ομάδα μοντέλων ενός μέσου με ιδιότητες του μοντέλου "Ubiquitous Joint" και χαρακτηριστικά βραχομάζας όπως περιγράφονται στη μελέτη της σήραγγας Καλυδώνας.

Και στις τέσσερις ομάδες μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά βραχομάζας:

- Πυκνότητα: 2650.0 kg / m<sup>3</sup>
- Μέτρο Ελαστικότητας (Young's modulus): 10 GPa
- Λόγος Poisson: 0,3

# 6.6.1 Ελαστικό Προσομοίωμα

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο έγινε κατασκευή τεσσάρων ομάδων μοντέλων προσομοίωσης, εκ των οποίων η πρώτη ομάδα αφορούσε τη χρήση ελαστικού μέσου για την προσομοίωση της βραχομάζας. Το ελαστικό μέσο αποτελεί και το πιο απλό σε ότι αφορά τις ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες παρουσιάζονται για την περίπτωση στον ακόλουθο πίνακα.

#### Πίνακας 6.2: Ιδιότητες για το ελαστικό μοντέλο

Πυκνότητα	Μέτρο Συμπίεσης	Μέτρο Διάτμησης
ρ (kg / m³)	K (Pa)	G (Pa)
2650.0	3.8462 e9	8.3333 e9

## 6.6.2 Προσομοίωμα Mohr – Coulomb

Η δεύτερη ομάδα μοντέλων προσομοίωσης αφορούσε τη χρήση ενός μέσου Mohr – Coulomb για την προσομοίωση της βραχομάζας. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας περιγράφονται στον Πίνακα 6.3.

Πυκνότητα ρ (kg / m³)	Μέτρο Συμπίεσης Κ (Pa)	Μέτρο Διάτμησης G (Pa)	Συνοχή c (Pa)	Γωνία Εσωτερικής Τριβής φ (°)	Αντοχή Εφελκυσμού τ (N)
2650.0	8.3333 e9	3.84615 e9	0.5 e6	40.0	5.9588 e5

Πίνακας 6.3: Ιδιότητες για το μοντέλο Mohr – Coulomb

## 6.6.3 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint"

Η τρίτη ομάδα μοντέλων προσομοίωσης αφορούσε τη χρήση ενός μέσου με τις ιδιότητες του μοντέλου "Ubiquitous Joint" του FLAC για την προσομοίωση της βραχομάζας. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας περιγράφονται στον Πίνακα 6.4.

Μέτρο Συμπίεσης Κ (Pa)	Μέτρο Διάτμησης G (Pa)	Συνοχή Πετρώματος c <sub>r</sub> (Pa)	Πυκνότητα ρ (kg / m <sup>3</sup> )	Γωνία Εσωτερικής Τριβής Πετρώματος φ <sub>r</sub> (°)
8.3333 e9	3.84615 e9	0.5 e6	2650.0	40

Πίνακας 6.4: Ιδιότητες για το μοντέλο "Ubiquitous Joint"

Αντοχή Εφελκυσμού Πετρώματος τ <sub>r</sub> (N)	Γωνία Κλίσης Ασυνεχειών α (°)	Συνοχή Ασυνέχειας c <sub>j</sub> (Pa)	Γωνία Εσωτερικής Τριβής Ασυνέχειας φ <sub>j</sub> (°)	Αντοχή Εφελκυσμού Ασυνέχειας τ <sub>j</sub> (N)
17.0 e6	5.0	0.0	30	0.0

## 6.6.4 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας

Η τέταρτη ομάδα μοντέλων προσομοίωσης αφορούσε τη χρήση ενός μέσου με τις ιδιότητες του μοντέλου "Ubiquitous Joint" του FLAC για την προσομοίωση της βραχομάζας, το οποίο παρουσιάζει τις τιμές των ιδιοτήτων της βραχομάζας της σήραγγας Καλυδώνας. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας περιγράφονται στον Πίνακα 6.5. 3.84615 e9

8.3333 e9

Γωνία Μέτρο Μέτρο Συνοχή Εσωτερικής Πυκνότητα Συμπίεσης Διάτμησης Πετρώματος Τριβής ρ (kg / m<sup>3</sup>) K (Pa) G (Pa) Πετρώματος

c<sub>r</sub> (Pa)

0.5 e6

**φ**<sub>r</sub> (°)

40

2650.0

<b>Πίνακας 6.5:</b> Ιδιότητες γι	α το μοντέλο	"Ubiquitous Joint"	σήραγγας	Καλυδώνας
----------------------------------	--------------	--------------------	----------	-----------

Αντοχή Εφελκυσμού Πετρώματος τ <sub>r</sub> (N)	Γωνία Κλίσης Ασυνεχειών α (°)	Συνοχή Ασυνέχειας c <sub>j</sub> (Pa)	Γωνία Εσωτερικής Τριβής Ασυνέχειας φ <sub>j</sub> (°)	Αντοχή Εφελκυσμού Ασυνέχειας τ <sub>j</sub> (N)
5.9588 e5	5.0	0.0	30	0.0

# 6.7 Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων (Μετατοπίσεις)

Για κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό FLAC κατεγράφησαν οι μετατοπίσεις σε συγκεκριμένα σημεία της διατομής για τη φάση της άνω ημιδιατομής και της βαθμίδας. Οι θέσεις για τις οποίες αναφέρονται οι μετατοπίσεις φαίνονται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Θέσεις καταγραφής μετατοπίσεων

# 6.7.1 Ελαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των μετατοπίσεων του ελαστικού μοντέλου προσομοίωσης για τα στάδια και τις θέσεις στη διατομή που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Στάδιο	Στέψη		Παρει Ημιδια	ά Άνω ατομής	Αρχή Β	αθμίδας	Παι Βαθι	οειά μίδας		
Εκσκαφής	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #		
	1	162,36	2	170,32	3	174,24	4	174,20		
Άνω Ημιδιατομή	1.851E-03		1.399E-03		_		-			
Βαθμίδα	1.898	3E-03	1.540E-03		1.540E-03		1.540E-03 8.693E-04		6.936E-04	

Πίνακας 6.6: Μετατοπίσεις (m) ελαστικού μοντέλου για K<sub>0</sub> = 0.5

Πίνακας 6.7: Μετατοπίσεις (m) ελαστικού μοντέλου για K<sub>0</sub> = 1.0

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	1.741	1.741E-03		1.463E-03		-	-		
Βαθμίδα	1.750	)E-03	1.651	1E-03	8.693E-04		1.106E-03		

Πίνακας 6.8: Μετατοπίσεις (m) ελαστικού μοντέλου για K<sub>0</sub> = 1.5

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #   1 162,36		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1			170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	1.558	1.558E-03		1.694E-03		_	-		
Βαθμίδα	1.504	1E-03	2.007	7E-03	2.251E-03		1.824E-03		

# 6.7.2 Μοντέλο Προσομοίωσης Mohr – Coulomb

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των μετατοπίσεων του μοντέλου προσομοίωσης Mohr – Coulomb για τα στάδια και τις θέσεις στη διατομή που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 6.9:	Μετατοπίσεις	(m) μοντέλου	$Mohr-Coulomb \ \gamma \alpha$	$K_0 = 0.5$
--------------	--------------	--------------	--------------------------------	-------------

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	1.902	1.902E-03		1.473E-03		_	_		
Βαθμίδα	1.994	1E-03	1.665	5E-03	9.448E-04		8.675E-04		

Πίνακας 6.10: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου Mohr – Coulomb για K<sub>0</sub> = 1.0

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1 162,36		2	170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	1.793	1.793E-03		1.525E-03		-	-		
Βαθμίδα	1.869	9E-03	1.770	DE-03	1.441E-03		1.296E-03		

Πίνακας 6.11: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου Mohr – Coulomb για K<sub>0</sub> = 1.5

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	1.732	1.732E-03		1.822E-03		-		_	
Βαθμίδα	1.812	2E-03	2.305	2.305E-03		2.490E-03		2.271E-03	

# 6.7.3 Μοντέλο Προσομοίωσης "Ubiquitous Joint"

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των μετατοπίσεων του μοντέλου προσομοίωσης "Ubiquitous Joint" για τα στάδια και τις θέσεις στη διατομή που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Στάδιο	Στέψη		Παρει Ημιδια	Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	3.22	3.221E-03		1.691E-03		_	-		
Βαθμίδα	3.302	2E-03	1.838	3E-03	1.276E-03		1.100E-03		

Πίνακας	6.12:	Μετατοπίσεις	(m) μοντέλου	"Ubiauitous	Joint" via	$K_0 = 0.5$
	•••=•	monunomoony		enganceae		

Πίνακας 6.13: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" για K<sub>0</sub> = 1.0

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	3.011	3.011E-03		1.811E-03		-	-		
Βαθμίδα	3.089	9E-03	2.059	9E-03	1.821E-03		1.643E-03		

Πίνακας 6.14: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" για K<sub>0</sub> = 1.5

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #   1 162,36		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1			170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	3.246	3.246E-03		2.684E-03		_	-		
Βαθμίδα	3.956	6E-03	3.437	7E-03	3.483E-03		3.282E-03		

# 6.7.4 Μοντέλο Προσομοίωσης "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των μετατοπίσεων του μοντέλου προσομοίωσης "Ubiquitous Joint" για τα στάδια και τις θέσεις στη διατομή που αναφέρθηκαν παραπάνω.

**Πίνακας 6.15:** Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας για K<sub>0</sub> = 0.5

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	3.221	3.221E-03		1.691E-03		-	_		
Βαθμίδας	3.302	2E-03	1.838	3E-03	1.276E-03		1.100E-03		

Πίνακας 6.16: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" σήραγγας

## Καλυδώνας για Κ<sub>0</sub> = 1.0

Στάδιο	Στέ	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Θέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	
	1	1 162,36		170,32	3	174,24	4	174,20	
Άνω Ημιδιατομή	3.01	3.011E-03		1.811E-03		-	-		
Βαθμίδα	3.089	3.089E-03		9E-03	1.821E-03		1.643E-03		

Πίνακας 6.17: Μετατοπίσεις (m) μοντέλου "Ubiquitous Joint" σήραγγας

Καλυδώνας για Κ<sub>0</sub> = 1.5

Στάδιο	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση	Ͽέση Grid #		Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #
	1	162,36	2	170,32	3	174,24	4	174,20
Άνω Ημιδιατομή	3.246E-03		2.684E-03		-		-	
Βαθμίδας	3.956E-03		3.437E-03		3.483E-03		3.282E-03	

#### 6.8 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μοντέλων Προσομοίωσης

Ο σκοπός της δημιουργίας τεσσάρων ξεχωριστών μοντέλων προσομοίωσης είναι η μετέπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση του ελαστικού μοντέλου προσομοίωσης με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" και του μοντέλου Mohr – Coulomb με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας. Ο λόγος επιλογής αυτού του συνδυασμού αποτελεί το γεγονός ότι στην πρώτη περίπτωση γίνεται σύγκριση μοντέλων δεν επιτρέπεται η αστοχία του πετρώματος, λόγω επιλογής υψηλών τιμών των χαρακτηριστικών του πετρώματος. Στη δεύτερη περίπτωση των μοντέλων, όμως, επιτρέπεται η αστοχία του πετρώματος με την επιλογή τιμών που δύναται να προκαλέσουν αστοχία στο πέτρωμα.

#### 6.8.1 Ελαστικό Μοντέλο με Μοντέλο "Ubiquitous Joint"

Ακολουθεί ο πίνακας που παραθέτει τα αποτελέσματα της σύγκρισης του ελαστικού μοντέλου προσομοίωσης με το μοντέλο "Ubiquitous Joint".

Παρειά Άνω Παρειά Αρχή Βαθμίδας Στέψη Στάδιο Ημιδιατομής Βαθμίδας Grid # Grid # Θέση Grid # Θέση Grid # Εκσκαφής Θέση Θέση 1 2 170,32 4 162,36 3 174,24 174,20 Άνω Ημιδιατομή 42.54% 17.27% \_ \_ Βαθμίδα 42.52% 16.19% 31.89% 36.96%

$$(K_0 = 0.5)$$

Πίνακας 6.19: Σύγκριση μετατοπίσεων Ελαστικό με Ubiquitous Joint

 $(K_0 = 1.0)$ Παρειά Άνω Παρειά Στέψη Αρχή Βαθμίδας Ημιδιατομής Βαθμίδας Στάδιο Θέση Grid # Θέση Grid # Θέση Grid # Θέση Grid # Εκσκαφής 2 3 4 1 162,36 170,32 174,24 174,20 Άνω Ημιδιατομή 42.19% 19.23% Βαθμίδα 43.34% 19.84% 52.27% 32.67%

# Πίνακας 6.20: Σύγκριση μετατοπίσεων Ελαστικό με Ubiquitous Joint

Στάδιο	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση Grid #		Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #
	1	162,36	2	170,32	3	174,24	4	174,20
Άνω Ημιδιατομή	52.01%		36.90%		-		_	
Βαθμίδα	52.02%		41.60%		35.38%		44.42%	

 $(K_0 = 1.5)$ 

# 6.8.2 Μοντέλο Mohr – Coulomb με Μοντέλο "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας

Ακολουθεί ο πίνακας που παραθέτει τα αποτελέσματα της σύγκρισης του μοντέλου προσομοίωσης Mohr – Coulombμε το μοντέλο "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας.

**Πίνακας 6.21:** Σύγκριση μετατοπίσεων Mohr - Coulomb με Ubiquitous Joint με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας (K<sub>0</sub> = 0.5)

Στάδιο	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση Grid #		Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #
	1	162,36	2	170,32	3	174,24	4	174,20
Άνω Ημιδιατομή	40.95%		12.91%		-		-	
Βαθμίδα	39.61%		9.44%		25.97%		21.14%	

**Πίνακας 6.22:** Σύγκριση μετατοπίσεων Mohr - Coulomb με Ubiquitous Joint με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας (K<sub>0</sub> = 1.0)

Στάδιο	<b>Στέψη</b> Θέση Grid #		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής			Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #
	1	162,36	2	170,32	3	174,24	4	174,20
Άνω Ημιδιατομή	40.46%		15.79%		-		-	
Βαθμίδα	39.49%		14.02%		20.90%		21.15%	

**Πίνακας 6.23:** Σύγκριση μετατοπίσεων Mohr - Coulomb με Ubiquitous Joint με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας (K<sub>0</sub> = 1.5)

Στάδιο	Στέψη		Παρειά Άνω Ημιδιατομής		Αρχή Βαθμίδας		Παρειά Βαθμίδας	
Εκσκαφής	Θέση Grid #		Θέση	Grid #	Θέση	Grid #	Θέση	Grid #
	1	162,36	2	170,32	3	174,24	4	174,20
Άνω Ημιδιατομή	46.65%		32.11%		-		-	
Βαθμίδα	54.19%		32.92%		28.53%		30.79%	

Ακολουθούν σχήματα στα οποία δίνονται διαγραμματικά οι μετατοπίσεις ως προς τη μεταβολή του K<sub>0</sub>.





Σχήματα 6.4α, β: Μετατοπίσεις για κάθε Κ<sub>0</sub> στην άνω ημιδιατομή



**Σχήματα 6.5α, β, γ, δ:** Μετατοπίσεις για κάθε K<sub>0</sub> στην άνω ημιδιατομή

# 6.9 Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων (Αξονικές Δυνάμεις)

Για κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι εικόνες που παρουσιάζει το FLAC για τις αξονικές δυνάμεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος τόσο για τη φάση της άνω ημιδιατομής όσο και της βαθμίδας. Να σημειωθεί ότι για τις μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που φαίνονται στα σχήματα, δίνεται η θέση τους στη λεζάντα περιγραφής σύμφωνα με την αρίθμηση του Σχήματος 6.6.



Σχήμα 6.6: Αρίθμηση στοιχείου "liner" στη διατομή της υπό ανάλυση σήραγγας

# 6.9.1 Ελαστικό Προσομοίωμα

Ακολουθούν οι εικόνες από το λογισμικό FLAC όπου φαίνονται οι αξονικές δυνάμεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για κάθε τιμή του παράγοντα K<sub>0</sub>. Για K<sub>0</sub> = 0.5 είναι:



**Σχήμα 6.7:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)



**Σχήμα 6.8:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 88 και 41)

#### Για K<sub>0</sub> = 1.0 είναι:



**Σχήμα 6.9:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)



**Σχήμα 6.10:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 88 και 41)

#### Για K<sub>0</sub> = 1.5 είναι:



**Σχήμα 6.11:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)



**Σχήμα 6.12:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 62)

## 6.9.2 Προσομοίωμα Mohr – Coulomb

Ακολουθούν οι εικόνες από το λογισμικό FLAC όπου φαίνονται οι αξονικές δυνάμεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για κάθε τιμή του παράγοντα K<sub>0</sub>. Να σημειωθεί ότι για τις μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που φαίνονται στα σχήματα δίνεται η θέση τους στη λεζάντα περιγραφής. Για K<sub>0</sub> = 0.5 είναι:



**Σχήμα 6.13:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)



**Σχήμα 6.14:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην παρειά κοντά στην θέση εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 85)

#### Για K<sub>0</sub> = 1.0 είναι:



**Σχήμα 6.15:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)



**Σχήμα 6.16:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην παρειά κοντά στην θέση εκσκαφής της βαθμίδας (στοιχείο 85)

#### Για K<sub>0</sub> = 1.5 είναι:



**Σχήμα 6.17:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στο όριο της εκσκαφής με τη βαθμίδα (στοιχείο 88 και 41)



**Σχήμα 6.18:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 64)
# 6.9.3 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint"

Ακολουθούν οι εικόνες από το λογισμικό FLAC όπου φαίνονται οι αξονικές δυνάμεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για κάθε τιμή του παράγοντα K<sub>0</sub>. Να σημειωθεί ότι για τις μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που φαίνονται στα σχήματα δίνεται η θέση τους στη λεζάντα περιγραφής. Για K<sub>0</sub> = 0.5 είναι:



**Σχήμα 6.19:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)



**Σχήμα 6.20:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)

## Για K<sub>0</sub> = 1.0 είναι:



**Σχήμα 6.21:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)



**Σχήμα 6.22:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)

## Για K<sub>0</sub> = 1.5 είναι:



**Σχήμα 6.23:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)



**Σχήμα 6.24:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)

# 6.9.4 Προσομοίωμα "Ubiquitous Joint" σήραγγας Καλυδώνας

Ακολουθούν οι εικόνες από το λογισμικό FLAC όπου φαίνονται οι αξονικές δυνάμεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για κάθε τιμή του παράγοντα K<sub>0</sub>. Να σημειωθεί ότι για τις μέγιστες τιμές αξονικών δυνάμεων που φαίνονται στα σχήματα δίνεται η θέση τους στη λεζάντα περιγραφής. Για K<sub>0</sub> = 0.5 είναι:



**Σχήμα 6.25:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)



**Σχήμα 6.26:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην αριστερή παρειά της σήραγγας (στοιχείο 73)

# Για Κ<sub>0</sub> = 1.0 είναι:



**Σχήμα 6.27:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)



**Σχήμα 6.28:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)

## Για K<sub>0</sub> = 1.5 είναι:



**Σχήμα 6.29:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής με μέγιστη τιμή κοντά στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)



**Σχήμα 6.30:** Αξονικές δυνάμεις σκυροδέματος με την εκσκαφή της βαθμίδας με μέγιστη τιμή στην οροφή της σήραγγας (στοιχείο 68)

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων αξονικών δυνάμεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των στοιχείων "liner" που εντοπίζονται ανά μοντέλο προσομοίωσης και Κ<sub>0</sub>.

Μοντέλο	Συντελεστής Κ₀	Φάση	Στοιχείο "liner"	Αξονική Δύναμη
Προσομοίωσης		Εκσκαφής		(kN)
Ελαστικό	0.5	Άνω Ημιδιατομή	88 + 41	381.2
		Βαθμίδα	88 + 41	204.8
	1.0	Άνω Ημιδιατομή	88 + 41	378.8
		Βαθμίδα	88 + 41	190.5
	1.5	Άνω Ημιδιατομή	88 + 41	374.8
		Βαθμίδα	62	271.8
Mohr – Coulomb	0.5	Άνω Ημιδιατομή	88 + 41	378.2
		Βαθμίδα	85	328.9
	1.0	Άνω Ημιδιατομή	88 + 41	372.9
		Βαθμίδα	85	373.9
	1.5	Άνω Ημιδιατομή	88 + 41	368.5
		Βαθμίδα	64	402.8
Ubiquitous Joint	0.5	Άνω Ημιδιατομή	73	543.4
		Βαθμίδα	73	559.0
	1.0	Άνω Ημιδιατομή	68	744.0
		Βαθμίδα	68	784.7
	1.5	Άνω Ημιδιατομή	68	130.3
		Βαθμίδα	68	138.5
Ubiquitous Joint με παραμέτρους σήραγγας Καλυδώνας	0.5	Άνω Ημιδιατομή	73	543.4
		Βαθμίδα	73	559.0
	1.0	Άνω Ημιδιατομή	68	744.0
		Βαθμίδα	68	784.7
	1.5	Άνω Ημιδιατομή	68	130.3
		Βαθμίδα	68	138.5

Πίνακας 6.24: Συνοπτικός πίνακας μέγιστων αξονικών δυνάμεων αναλύσεων

#### 6.10 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

#### Μετατοπίσεις

Καταρχάς, όταν γίνεται διερεύνηση των τιμών των μετατοπίσεων, ξεκινώντας από το ελαστικό μοντέλο προσομοίωσης μέχρι το μοντέλο προσομοίωσης "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, γίνεται η παρατήρηση ότι οι μετατοπίσεις εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές στο τελευταίο μοντέλο. Το στοιχείο αυτό δικαιολογείται διότι τα τελευταία μοντέλα περιλαμβάνουν το στοιχείο των ασυνεχειών παρουσιάζοντας καλύτερα την εικόνα της ρωγματωμένης βραχομάζας σε σχέση με την ελαστική ανάλυση. Συνεπώς κρίνεται λογικό να εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές των μετατοπίσεων στα τελευταία προσομοιώματα.

Έπειτα, γίνεται η παρατήρηση ότι με την εκσκαφή της βαθμίδας αυξάνονται οι μετατοπίσεις σε σχέση με τις τιμές της πρώτης φάσης εκσκαφής της άνω ημιδιατομής. Αυτό δικαιολογείται μιας και που όσο μεγαλύτερη διατομή υφίσταται σε κάποια περίπτωση προκαλούνται αντίστοιχα μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων για το μοντέλο "Ubiquitous Joint" και του μοντέλου "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, οι τιμές που προκύπτουν είναι ίδιες. Πρακτικά, το στοιχείο αυτό σημαίνει ότι οι παράμετροι του πετρώματος της σήραγγας Καλυδώνας είναι τέτοιες που δεν προκαλείται αστοχία λόγω πετρώματος, αλλά μόνο λόγω των ασυνεχειών.

Ο παράγοντας K<sub>0</sub> που χρησιμοποιήθηκε για τιμές 0.5, 1.0 και 1.5 επηρεάζει τις τιμές των μετατοπίσεων. Συγκεκριμένα συγκρίνοντας τις τιμές των μετατοπίσεων για K<sub>0</sub> = 0.5 και K<sub>0</sub> = 1.0 δεν υπάρχει αισθητή διαφορά, αλλά στην περίπτωση για K<sub>0</sub> = 1.0 και K<sub>0</sub> = 1.5 οι τιμές των μετατοπίσεων αυξάνονται. Κύριο λόγος αποτελεί η αύξηση των πλευρικών ωθήσεων με την αύξηση του συντελεστή K<sub>0</sub>.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σημαντικό να πραγματοποιηθεί ο σχολιασμός που προκύπτει από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για το ελαστικό μοντέλο προσομοίωσης με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" και του μοντέλου Mohr – Coulomb με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας.

Αρχικά, στην πρώτη περίπτωση σύγκρισης των μοντέλων, προκύπτει ότι οι μεγαλύτερη διαφορά στις τιμές παρουσιάζεται για την οροφή (θέση ελέγχου 1). Οι τιμές των μετατοπίσεων παρουσιάζονται μεγαλύτερες στο μοντέλο "Ubiquitous Joint" από 40 έως και 50 %. Είναι αναμενόμενο άλλωστε η ευρύτερη περιοχή της οροφής να παρουσιάζει τις μεγαλύτερες επιβαρύνσεις.

Τη μικρότερη διαφορά στις τιμές των μετατοπίσεων παρουσιάζει η παρειά της άνω ημιδιατομής (θέση ελέγχου 2). Οι τιμές των μετατοπίσεων δεν παρουσιάζονται μεγαλύτερες από 20 %. Στις υπόλοιπες θέσεις ελέγχου (θέση ελέγχου 3 και 4) οι διαφορές των τιμών των μετατοπίσεων κυμαίνονται περίπου στο 35 %.

Ακόμη, η αύξηση του παράγοντα Κ<sub>0</sub> επιφέρει μία μικρή αύξηση στις τιμές των διαφορών των μετατοπίσεων.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της σύγκρισης του μοντέλου Mohr – Coulomb με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, τα αποτελέσματα εμφανίζουν παρόμοια λογική με την προαναφερθείσα περίπτωση. Η οροφή (θέση ελέγχου 1) παρουσιάζει και σε αυτή την περίπτωση τις μεγαλύτερες διαφορές από 40 έως 50 %.

Η παρειά της άνω ημιδιατομής (θέση ελέγχου 2) εμφανίζει, επίσης, τις μικρότερες διαφορές στις τιμές των μετατοπίσεων περίπου ίσες με 20 %. Στις υπόλοιπες θέσεις ελέγχου (θέση ελέγχου 3 και 4) οι διαφορές των τιμών των μετατοπίσεων κυμαίνονται περίπου από 20 έως 30 %.

### Αξονικές Δυνάμεις Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος

Καταρχάς, όταν γίνεται διερεύνηση των τιμών των αξονικών δυνάμεων του σκυροδέματος, ξεκινώντας από το ελαστικό μοντέλο προσομοίωσης μέχρι το μοντέλο προσομοίωσης "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, γίνεται η παρατήρηση ότι οι αξονικές δυνάμεις εμφανίζονται με μεγαλύτερες τιμές στο τελευταίο μοντέλο. Το στοιχείο αυτό δικαιολογείται, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, διότι τα τελευταία μοντέλα περιλαμβάνουν το στοιχείο των ασυνεχειών παρουσιάζοντας καλύτερα την εικόνα

Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων των αξονικών δυνάμεων για το μοντέλο "Ubiquitous Joint" και του μοντέλου "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, οι τιμές που προκύπτουν είναι ίδιες. Πρακτικά, το στοιχείο αυτό επιβεβαιώνει την παραπάνω διαπίστωση ότι οι παράμετροι του

πετρώματος της σήραγγας Καλυδώνας είναι τέτοιες που δεν προκαλείται αστοχία λόγω πετρώματος, αλλά μόνο λόγω των ασυνεχειών.

Στο ελαστικό μοντέλο γίνεται η παρατήρηση ότι κατά την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής αναπτύσσονται μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις σε σχέση με τη φάση εκσκαφής της βαθμίδας. Αυτό εξηγείται γιατί η βραχομάζα έχει αποτονωθεί σε μεγαλύτερο βαθμό κατά την εκσκαφή της βαθμίδας και επίσης οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα αφορούν μικρότερο όγκο πετρώματος σε σχέση με τον όγκο της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζει και το μοντέλο Mohr – Coulomb, με τη διαφορά για K<sub>0</sub> = 1.5 όπου η τιμή της μέγιστης αξονικής δύναμης μεταφέρεται κοντά στην οροφή και εμφανίζεται μεγαλύτερη.

Στην περίπτωση των μοντέλων "Ubiquitous Joint" και "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, οι τιμές των αξονικών δυνάμεων εμφανίζονται μεγαλύτερες κατά τη φάση εκσκαφής της βαθμίδας. Αυτό το στοιχείο δείχνει ότι η επίδραση των ασυνεχειών στα προσομοιώματα αλλάζει τη συμπεριφορά που συναντήθηκε κατά την επίλυση του ελαστικού μοντέλου.

Από τη διερεύνηση των μέγιστων τιμών των αξονικών δυνάμεων και τη θέση εμφάνισης τους παρατηρείται ότι στα μοντέλα ελαστικού μέσου και Mohr – Coulomb εμφανίζονται στην παρειά της σήραγγας, στο όριο εκσκαφής της βαθμίδας. Στην περίπτωση των μοντέλων Ubiquitous Joint" και "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας παρατηρείται ότι η θέση των μέγιστων αξονικών δυνάμεων μεταφέρεται στην ευρύτερη περιοχή της οροφής. Αυτό το στοιχείο δείχνει ότι οι ασυνέχειες που εισάγονται με τα δυο προαναφερθείσα μοντέλα επιφέρουν μεγαλύτερες καταπονήσεις στην υποστήριξη στην περιοχή της οροφής.

Για τον παράγοντα K<sub>0</sub> η παρατήρηση των τιμών των αξονικών δυνάμεων για το ελαστικό μοντέλο και το μοντέλο Mohr – Coulomb δείχνει ότι δεν υπάρχει αισθητή διαφορά. Στα μοντέλα "Ubiquitous Joint" και "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας, όμως, η αύξηση του συντελεστή K<sub>0</sub> επιφέρει και αύξηση στις τιμές των αξονικών δυνάμεων.

Από τη σύγκριση του ελαστικού μοντέλου με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" προκύπτει ότι οι τιμές των αξονικών δυνάμεων για το μοντέλο "Ubiquitous Joint" εμφανίζονται μεγαλύτερες. Συγκεκριμένα, στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, για κάθε τιμή του συντελεστή K<sub>0</sub> ίσο με 0.5, 1.0 και 1.5 παρουσιάζεται διαφορά των

τιμών περίπου κατά 30 %, 50 % και 70 %, αντίστοιχα. Για τη φάση εκσκαφής της βαθμίδας οι τιμές των διαφορών είναι περίπου 60 % 75 % και 80 %, αντίστοιχα. Η διαφορά των τιμών αυτών δείχνει και τη μεγάλη επίδραση της παρουσίας των ασυνεχειών στην προσομοίωση, η οποία προκαλεί μεγάλη αύξηση των αξονικών δυνάμεων στο σκυρόδεμα.

Από τη σύγκριση του μοντέλου Mohr – Coulomb με το μοντέλο "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας παρατηρείται παρόμοια κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή οι διαφορές στις τιμές των αξονικών δυνάμεων για κάθε τιμή του συντελεστή K<sub>0</sub> ίσο με 0.5, 1.0 και 1.5 αντιστοιχεί ομοίως σε διαφορά περίπου κατά 30 %, 50 % και 70 %, αντίστοιχα. Για τη φάση εκσκαφής της βαθμίδας οι τιμές των διαφορών είναι περίπου 40 % 50 % και 70 %, αντίστοιχα.

Η απόκλιση στην περίπτωση των τιμών των αξονικών δυνάμεων στην δεύτερη περίπτωση σύγκρισης (μοντέλο Mohr – Coulomb και "Ubiquitous Joint" με παραμέτρους της σήραγγας Καλυδώνας) σε σχέση με την πρώτη (ελαστικό μοντέλο και "Ubiquitous Joint") δείχνει μία μικρή επίδραση των ιδιοτήτων του πετρώματος, χωρίς όμως να παρουσιάζονται αισθητές διαφορές μεταξύ αυτών.

# Κεφάλαιο 7

# Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επίδραση της ανισοτροπίας στη συμπεριφορά κατά την εκσκαφή σήραγγας. Εξετάζεται, συγκεκριμένα, η επίδραση της παρουσίας μιας οικογένειας ασυνεχειών με παράλληλη διεύθυνση στη συμπεριφορά που θα παρουσιάζει η βραχομάζα στην περίπτωση της δημιουργίας ενός υπόγειου ανοίγματος.

Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική αναζήτηση για το φαινόμενο της ανισοτροπίας στον τομέα των υπόγειων έργων, όπως επίσης και η δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για κυκλική σήραγγα.

Η παρουσία των ασυνεχειών στη βραχομάζα στη φάση εκσκαφής μίας σήραγγας επιβάλει υψίστης σημασίας ζήτημα στοιχείο που επιβεβαιώνεται τόσο από τη βιβλιογραφία όσο και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε υδροστατικό εντατικό πεδίο τιμών ερευνήθηκαν τόσο οι τιμές των μετατοπίσεων όσο και οι αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην περίπτωση των μοντέλων προσομοίωσης με υποστήριξη.

Σε ότι αφορά τις μετατοπίσεις εξάγεται το συμπέρασμα ότι βασική παράμετρος για τα προσομοιώματα αποτελεί η γωνία εσωτερικής τριβής (φ). Συγκεκριμένα όσο αυξάνει η γωνία εσωτερικής τριβής τόσο μειώνονται οι μετατοπίσεις που προκύπτουν από την ανάλυση σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση. Σημαντικό στοιχείο από τις αναλύσεις αποτελεί η εύρεση της περιοχής που εμφανίζει τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις και συνεπώς αντιμετωπίζει και τα περισσότερα προβλήματα κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας. Η κρίσιμη γωνία για τις μετατοπίσεις είναι οι 90° (οροφή του ανοίγματος), στην οποία παρουσιάζονται και οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις από 1 έως και 2 φορές σε σχέση με άλλες θέσεις (0°, 30°, 60°), ανάλογα της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Από τη διερεύνηση για επιρροή του αρχικού εντατικού πεδίου (P<sub>0</sub>) πρέπει να αναφερθεί ότι τα μοντέλα εμφανίζουν αναλογική αύξηση στις τιμές των μετατοπίσεων στα στάδια της επίλυσης. Αυτό προκύπτει από τα διαγράμματα από όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο λόγος των μετατοπίσεων την ελαστοπλαστικής προς την ελαστική επίλυση (Ur / Ur<sub>elastic</sub>) παραμένει σχεδόν ίδιος.

Συνεπώς, από την πρώτη ομάδα διαγραμμάτων μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι ασυνέχειες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά κυκλικού ανοίγματος. Η επιρροή τους εστιάζεται στο γεγονός ότι προκαλούν τις μέγιστες μετατοπίσεις στην ευρύτερη περιοχή της οροφής με απόκλιση 10° – 15° εκατέρωθεν. Αναλόγως προκύπτει και η μικρή επιβάρυνση που προκαλείται στην παρειά της σήραγγας εξαιτίας των ασυνεχειών, όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα.

Σε ότι αφορά τις αξονικές δυνάμεις παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία εσωτερικής τριβής τόσο μειωμένες αξονικές δυνάμεις αναπτύσσονται στη υποστήριξη. Εξάγεται, επίσης, το συμπέρασμα ότι σε υψηλότερες τιμές αρχικού εντατικού πεδίου οι αξονικές τάσεις εμφανίζονται σαφώς αυξημένες μέχρι και 10 φορές περίπου στις τιμές των αξονικών δυνάμεων, στην περίπτωση αύξησης του αρχικού εντατικού πεδίου από 1 MPa σε 10 MPa.

Σημαντικό να σημειωθεί επίσης αποτελεί το γεγονός ότι στην περίπτωση των μοντέλων προσομοίωσης με υποστήριξη οι μεγαλύτερες τιμές των αξονικών τάσεων εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή των γωνιών 74° – 85°.

Συνεπώς και στην περίπτωση της υποστήριξης συμπεραίνεται ότι οι ασυνέχειες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη επιβάρυνση της υποστήριξης σε κυκλική σήραγγα. Εμφανίζεται μία έντονη επιβάρυνση στην υποστήριξη στην περιοχή κοντά στην οροφή, σε σχέση με τις παρειές όπου δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες αξονικές τάσεις. Στο τελικό στάδιο της διπλωματικής εργασίας κρίθηκε σημαντικό να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση ενός πραγματικού προβλήματος. Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί η κατασκευή της σήραγγας Καλυδώνας, μέρος του έργου Ιόνια Οδός, στην οποία υφίσταται καθεστώς ανισοτροπίας λόγω της παρουσίας του Φλύσχη. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις που περιλαμβάνουν την περίπτωση ελαστικού μέσου μέχρι και την περίπτωση του μέσου με ασυνέχειες σε τιμές παραμέτρων πετρώματος της μελέτης του έργου.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν ερευνήθηκαν τόσο οι τιμές των μετατοπίσεων όσο και οι αξονικές δυνάμεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την προσομοίωση της βραχομάζας της σήραγγας Καλυδώνας προκύπτει ότι το πέτρωμα δεν αστοχεί. Η όποια αστοχία επέρχεται οφείλεται στην ολίσθηση των ασυνεχειών και μόνο.

Σε ότι αφορά τις μετατοπίσεις γίνεται η παρατήρηση ότι στο μοντέλο που προσομοιώνονται οι συνθήκες της σήραγγας Καλυδώνας εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες τιμές των μετατοπίσεων, σε σχέση με το ελαστικό μοντέλο. Παρατηρείται ότι με την εκσκαφής της βαθμίδας προκαλούνται αυξημένες μετατοπίσεις σε σχέση με την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής.

Για τον συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K₀ παρατηρείται αύξηση των τιμών των μετατοπίσεων σε τυχόν μεταβολή της τιμής από 1.0 σε 1.5.

Στη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε για τα προσομοιώματα που κατασκευάστηκαν προκύπτει ότι η παρουσία των ασυνεχειών επιφέρει αύξηση των τιμών των μετατοπίσεων μέχρι και 50 %.

Σε ότι αφορά τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της υποστήριξης παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα. Και σε αυτή την περίπτωση στο μοντέλο που προσομοιώνονται οι συνθήκες της σήραγγας Καλυδώνας εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες τιμές των αξονικών δυνάμεων στο σκυρόδεμα σε σχέση με το ελαστικό μοντέλο.

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι στην φάση εκσκαφής της βαθμίδας επιφέρονται μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις στην υποστήριξη σε σχέση με τη φάση εκσκαφής της άνω ημιδιατομής.

Από τη διερεύνηση των μέγιστων τιμών των αξονικών δυνάμεων και τη θέση εμφάνισης τους παρατηρείται ότι στην περίπτωση του μοντέλου της σήραγγας Καλυδώνας παρατηρείται ότι η θέση των μέγιστων αξονικών δυνάμεων εντοπίζεται

στην ευρύτερη περιοχή της οροφής. Αυτό το στοιχείο δείχνει ότι η παρουσία ασυνέχειες επιφέρουν μεγαλύτερες καταπονήσεις στην υποστήριξη στην περιοχή της οροφής.

Για τον συντελεστή πλευρικών ωθήσεων K<sub>0</sub> στα προσομοίωσης της σήραγγας Καλυδώνας, η αύξηση του συντελεστή επιφέρει και αύξηση στις τιμές των αξονικών δυνάμεων κατά μέσο όρο από 50 % έως 60 % περίπου.

Συμπερασματικά και στην περίπτωση της προσομοίωσης της σήραγγας Καλυδώνας συμπεραίνεται ότι οι ασυνέχειες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη επιβάρυνση της υποστήριξης. Εμφανίζεται μία έντονη επιβάρυνση στην υποστήριξη στην περιοχή κοντά στην οροφή, σε σχέση με τις παρειές όπου δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες αξονικές τάσεις.

# ПАРАРТНМА

# TΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ PS-A / TYPICAL CROSS-SECTION OF CATEGORY PS-A TEMPORARY SUPPORT









# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. ABAQUS (2009), Simulia, Documentation Version 6.9.2
- Amadei B. (1996), "Importance of Anisotropy When Estimating and Measuring In Situ Stresses in Rock"
- 3. Barla G (1974). Rock anisotropy: Theory and laboratory testing. In Rock Mechanics (Edited by Miller L.), Udine, Italy
- 4. Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", Rock Mech. 6(4), 189-239
- 5. Bieniawski, Z.T. (1989), "Engineering rock mass classifications", New York: Wiley
- Chatzipetros A., Kokkalas S., Pavlides SB, Koukouvelas IK. (2005), "Palaeoseismic data and their implication for active deformation in Greece", Journal of Geodynamics 40 (2-3), 170-188
- Daemen J. J. K. (1983), "Slip Zones for Discontinuities Parallel to Circular Tunnels or Shafts"
- Fairhurst C. and Pei J. (1990), "A comparison between the Distinct Element Method and the Finite Element Method for analysis of the stability of an excavation in jointed rock", Tunneling and Underground Space Technology No. 12, p. 111 - 117
- 9. Goodman R. E. (1989), "introduction to rock mechanics", Wiley
- 10. Green A. E. and Taylor G. I. (1939), "Stress systems in aelotropic plates I", Proc. Roy. Soc., 173

- 11. Hearmon R. F. S. (1961), An Introduction to Applied Elasticity, Oxford University Press, Oxford
- 12. Hefny A. M. & Lo K. Y. (1999), "Analytical Solutions For Stresses and Displacements Around Tunnels Driven in Cross - Anisotropic Rocks"
- 13. Hook E., Grabinsky M. W. and Diederichs M. S., (1991), "Numerical modelling for underground excavation design", Trans. Inst. Min. Metall., 100
- 14. Istria (2009), General Consulting Ltd.
- 15.FLAC (2008), "Fast Langrangian Analysis of Continua", Version 6.00, User's Manual, Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA
- 16. Marinos P. and Hoek E. (2000), "GSI A geologically friendly tool for rock mass strength estimation", Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne, 1422 – 1442
- 17. Poulos H. G. and Davis E. H. (1974), Elastic Solutions for Soils and Rock Mechanics, Wiley, New York
- 18. Timoshenko S. and Goutier J. N. (1951), "Theory of Elasticity", New York, Mc Graw Hill, 2nd Edition, p. 506
- 19. Wittke W. (1990), "Rock Mechanics Theory and Applications with Case Histories", Springer Verlag
- 20. Αγιουτάντης, Ζ. Γ. (1995), "Εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση γεωμηχανικών προβλημάτων", Ορυκτός Πλούτος 96, σελ. 23 24
- 21. Παπαγεωργάκης Ι., Κουμαντάκης Ι. (1984), "Τεχνική Πετρογραφία", Αθήνα
- 22. Φυτρολάκης Ν. (1985), "Γενική Γεωλογία", Αθήνα