



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

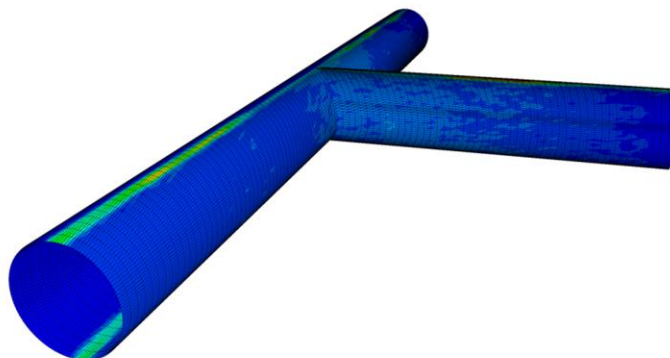
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Αριθμητική προσομοίωση διασταυρώσεων σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.



Ζαφειρόπουλος Ανδρέας

Επιβλέπων Καθηγητής: Νομικός Παύλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Αριθμητική προσομοίωση διασταυρώσεων σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ζαφειρόπουλος Ανδρέας

Επιβλέπων Καθηγητής: Νομικός Παύλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις

Π. Νομικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.,

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

Ι. Ζευγώλης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.,

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Αριθμητική προσομοίωση διασταυρώσεων σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα» εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Π. Νομικό, τόσο για την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας όσο και για την ουσιαστική καθοδήγηση του σε κάθε φάση της εκπόνησής της. Η εποπτεία και η άρτια στήριξή του συνέβαλαν καθοριστικά καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παπαντωνόπουλο, εργαστηριακό διδακτικό προσωπικό του Τομέα Μεταλλευτικής, που με την τεχνική υποστήριξη την οποία παρείχε, βοήθησε καθοριστικά στην ομαλή διεκπεραίωση του υπολογιστικού μέρους της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, πέρα από το ακαδημαϊκό περιβάλλον, θα ήθελα να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην αδελφή μου Σοφία για την αμέριστη βοήθεια και τις σημαντικές υποδείξεις της, καθώς και στην Αναστασία Παπουτσάκη που όχι μόνο συνέβαλε μέσω της κριτικής και των παρατηρήσεών της στη συγγραφή της παρούσας εργασίας αλλά μέσω της συμπαράστασης και της υπομονής της μου έδωσε το κουράγιο για να ολοκληρώσω αυτό το εγχείρημα.

Περίληψη

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διασταύρωση σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα με τη χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων. Στόχος της μελέτης αυτής είναι η αξιολόγηση της επίδρασης που έχουν τα επίπεδα ανισοτροπίας του υπεδάφους στη τομή δύο ή περισσότερων σηράγγων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του δευτερογενούς εντατικού πεδίου που δημιουργείται λόγω της κατασκευής μίας υπόγειας διασταύρωσης ενώ επίσης διερευνήθηκαν και οι επιπρόσθετες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις που προκαλούνται. Στη συνέχεια, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των τεμνόμενων σηράγγων, όπως η γωνία διασταύρωσης, το μέγεθος των εκσκαφών και ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων των γεωστατικών τάσεων. Με βάση τα παραπάνω, προτείνονται μέτρα υποστήριξης και το βέλτιστο εύρος τοποθέτησής τους για την ενίσχυση της υπόγειας διασταύρωσης, σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η έννοια της ανισότροπης βραχομάζας και εξετάζεται η περίπτωση διάνοιξης σήραγγας εντός αυτής. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση των χαρακτηριστικών του ανισότροπου υλικού όπως η κλίση, η διατμητική αντοχή και η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών του και αξιολογείται η επίδρασή τους στη συμπεριφορά του υπόγειου ανοίγματος τόσο με τη χρήση αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε σχετικές μελέτες όσο και μέσω του συστήματος κατάταξης της βραχομάζας RMR.

Τέλος, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC3D 6.00, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, οι δύο τύποι διασταύρωσης σηράγγων που προσομοιώθηκαν, είναι της μορφής «T» και της μορφής «+». Στο πρώτο στάδιο της μελέτης αναλύεται ο τρόπος κατασκευής των τεμνόμενων σηράγγων και η μοντελοποίηση της ανισότροπης βραχομάζας, εντός της οποίας θα διανοιχθούν, ενώ στο δεύτερο και τελευταίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των μετατοπίσεων και της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης γύρω από τη περιοχή της διασταύρωσης για διάφορες κλίσεις και διευθύνσεις κλίσης των ασυνεχειών της ανισότροπης βραχομάζας. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών αξιολογούνται και προκύπτουν τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, ενώ προτείνονται και τρόποι για περαιτέρω μελέτη του θέματος.

Abstract

The purpose of this thesis is the study of tunnel intersections in anisotropic rockmass using numerical modeling simulations. The aim of this study is to evaluate the effect of the rockmass's anisotropy on the intersection of two or more tunnels.

First of all, the stresses that develop at the surrounding rockmass due the excavation of a tunnel intersection were examined as well as the induced displacements and deformations. Factors such as the intersection angle, the tunnel size and the ratio of horizontal to vertical in situ stresses were studied in order to determine their influence on the mechanical behavior of the intersection and propose an optimal support system.

Thence, a single tunnel's excavation in anisotropic rockmass was examined so as to analyze the effect of anisotropy on the tunnel's stability. Specifically, an extensive analysis of the rockmass's anisotropic characteristics, such as its joints' dip and shear strength was carried out. This analysis was based both on the numerical methods of other researchers and the Rock Mass Rating system (RMR) which gave insightful suggestions on the construction of an underground excavation according to the anisotropic state of the rockmass.

Finally, the theoretical background of the numerical modeling software FLAC3D 6.00 was described since this software was utilized for the conduction of this thesis's simulations. Two tunnel intersection formations in anisotropic rockmass will be simulated and analyzed, one in "T" form and the other in "+" form. In the first stage of the simulations' process, the tunnel intersection models were designed and created and the anisotropic rockmass was simulated. In the second and last stage, the calculation of the induced displacements and plastic zone took place for various combinations of the anisotropic rockmass's joints's dip and dip angle. The results of the calculations were evaluated and the final conclusions that were reached are outlined along with possible new ways that this issue could be further studied.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
1 Εισαγωγή.....	1
2 Διασταύρωση Σηράγγων.....	3
2.1 Ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή της διασταύρωσης	6
2.2 Μετατοπίσεις εντός της ζώνης επιρροής της διασταύρωσης	16
2.3 Γωνία διασταύρωσης των σηράγγων	22
2.4 Μέγεθος των τεμνόμενων σηράγγων	27
2.5 Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων	28
2.6 Κατεύθυνση διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας	30
2.7 Υποστήριξη της περιοχής διασταύρωσης των σηράγγων	33
3 Ανισότροπη βραχομάζα	41
3.1 Διάνοιξη σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα.....	44
3.1.1 Σύγκριση διάνοιξης σηράγγων σε ισότροπη και ανισότροπη βραχομάζα	46
3.1.2 Μετατοπίσεις και πλαστική ζώνη λόγω ανισοτροπίας της βραχομάζας	50
3.1.3 Κλίση ασυνεχειών και συντελεστής πλευρικών ωθήσεων	54
3.1.4 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών.....	57
3.1.5 Βάθος διάνοιξης σήραγγας.....	58
3.1.6 Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.....	59
3.1.7 Σύστημα ταξινόμησης RMR	61
3.2 Διασταύρωση σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα.....	65
4 Λογισμικό αριθμητικών μοντελοποιήσεων FLAC3D.....	68
4.1 Γενικά στοιχεία και δημιουργία μοντέλου	69
4.2 Μοντελοποίηση μέτρων υποστήριξης.....	71
4.3 Προσομοίωση ανισότροπης βραχομάζας.....	73
5 Πρώτο στάδιο προσομοιώσεων - Κατασκευή μοντέλων διασταύρωσης σηράγγων.....	82
5.1 Ιδιότητες μοντέλου και επιλογή βέλτιστου καννάβου	83
5.1.1 Μοντέλο Mohr-Coulomb	86
5.1.2 Μοντέλο Ubiquitous-Joint	94
5.2 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «T».....	106
5.3 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «+».....	114
6 Δεύτερο στάδιο προσομοιώσεων - Υπολογισμός μετατοπίσεων και πλαστικής ζώνης.....	117

6.1 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «T».....	119
6.1.1 Κλίση ασυνεχειών ίση με 0°	119
6.1.2 Κλίση ασυνεχειών ίση με 45°	126
6.1.3 Κλίση ασυνεχειών ίση με 90°	137
6.2 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «+».....	148
6.2.1 Κλίση ασυνεχειών ίση με 0°	148
6.2.2 Κλίση ασυνεχειών ίση με 90°	153
7 Συμπεράσματα	158
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	162

Λίστα Εικόνων

<i>Εικόνα 2.1.1 Μετατοπίσεις στην περιοχή κάθετης διασταύρωσης σηράγγων σε υδροστατικό εντατικό πεδίο. Παρατηρείται το τμήμα που δέχεται την μεγαλύτερη επίδραση στην στέψη της δευτερεύουσας σήραγγας (Gkikas & Nomikos, 2020)</i>	7
<i>Εικόνα 2.1.2 Μετατοπίσεις στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Spyridis & Bergmeister, 2015)</i>	8
<i>Εικόνα 2.1.3 Μεταβολή των τάσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας σε δύο διακριτές περιοχές A και B, στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής της με την κύρια σήραγγα, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Gkikas & Nomikos, 2020)</i>	9
<i>Εικόνα 2.1.4 Τάσεις κατά την διαμήκη διεύθυνση της κύριας σήραγγας, κυκλικής διατομής, μετά την διάνοιξη δευτερεύουσας σήραγγας (εξίσου κυκλικής διατομής) στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής τους εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Spyridis & Bergmeister, 2015)</i>	9
<i>Εικόνα 2.1.5 Απόλυτες τιμές των πρόσθετων εφαπτομενικών καμπτικών ροπών μετά την διάνοιξη της δευτερεύουσας κυκλικής σήραγγας στο σημείο διασταύρωσής της με την κύρια, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Gkikas & Nomikos, 2020)</i>	13
<i>Εικόνα 2.1.6 Εφαπτομενικές ροπές κάμψης μετά την διάνοιξη της δευτερεύουσας κυκλικής σήραγγας στο σημείο της κάθετης διασταύρωσής της με την ήδη υπάρχουσα (κύρια), εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Spyridis & Bergmeister, 2015)</i>	14
<i>Εικόνα 2.1.7 Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης κατά τον διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας η οποία τέμνεται από δευτερεύουσα σήραγγα πεταλοειδούς διατομής: (a) Διαμήκη τομή της κύριας σήραγγας, (b) Μεγέθυνση της εγκάρσιας διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας στο σημείο της διασταύρωσης (Li et al. 2016)</i>	14
<i>Εικόνα 3.1 Ανισότροπη βραχομάζα με εμφανής σύνολα ασυνεχειών (Παπαδαντωνάκης, 2015)</i>	41
<i>Εικόνα 3.1.2.1 Κατανομή πλαστικής ζώνης γύρω από υπόγειο ημικυκλικό άνοιγμα σήραγγας: (a), (b): Σε ισότροπο πέτρωμα, (c) Σε βραχομάζα με μία κύρια ασυνέχεια κλίσης 50° (Joint 1) στην περιφέρεια της σήραγγας, (d) Σε βραχομάζα με δύο κύριες ασυνέχειες, Joint 1 και Joint 2, κλίσης 90° και 50° αντίστοιχα, (e) Σε βραχομάζα με δύο κύριες ασυνέχειες, Joint 1 και Joint 2, ίδιας κλίσης 90°, όπου None συμβολίζει τις ελαστικές περιοχές, shear-p και tension-p αντιστοιχούν σε διατμητική (shear) και εφελκυστική (tension) αστοχία, αντίστοιχα, του προηγούμενου υπολογιστικού βήματος, ενώ shear-n και tension-n αντιστοιχούν σε διατμητική (shear) και εφελκυστική (tension) αστοχία, αντίστοιχα, του τρέχοντος υπολογιστικού βήματος (Zhang et al. 2020)</i>	53
<i>Εικόνα 3.1.3.1 Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (Sigma 3) γύρω από ημιδιατομή κυκλικής σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 90ο, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου: (x) Διατμητική αστοχία, (o) Εφελκυστική αστοχία, (1) Εσωτερική ζώνη απόκρισης της βραχομάζας, με την μέγιστη εφελκυστική και διατμητική αστοχία, (2) Εξωτερική ζώνη απόκρισης της βραχομάζας και (3) Περιοχή επιρροής από το σύνολο των κύριων ασυνεχειών (Bewick & Kaiser, 2009)</i>	54
<i>Εικόνα 3.1.3.2 Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (Sigma 3) γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα για τρεις διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών (0°, 40° και 90°) και τρεις διαφορετικούς συντελεστές πλευρικών ωθήσεων ($K_o=0.5$, $K_o=1.0$ και $K_o=1.35$) (Bewick & Kaiser, 2009)</i>	55
<i>Εικόνα 3.1.6.1 Προκαλούμενη ζώνη παραμόρφωσης λόγω διάνοιξης υπόγειας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με οριζόντια επίπεδα κύριων ασυνεχειών, για δύο διαφορετικές τιμές απόστασης μεταξύ τους: (a) Ζώνη παραμόρφωσης για απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ίση με 10cm, Αριστερά: Άνω όριο εκσκαφής εφαιπτόμενο με επίπεδο ασυνέχειας, Δεξιά: Άνω όριο εκσκαφής τοποθετημένο εντός στρώματος άρρηκτου πετρώματος, (b) Ζώνη παραμόρφωσης για απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ίση με 90cm, Αριστερά: Άνω όριο εκσκαφής εφαιπτόμενο με επίπεδο ασυνέχειας, Δεξιά: Άνω όριο εκσκαφής τοποθετημένο εντός στρώματος άρρηκτου πετρώματος (Zhang et al. 2020)</i>	60
<i>Εικόνα 3.2.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά τα αρχικά στάδια διάνοιξης της κύριας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 45° και διεύθυνση κλίσης 90° (Swoboda, 1998)</i>	66

Εικόνα 3.2.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της κύριας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 45° και διεύθυνση κλίσης 90° (Swoboda, 1998)	66
Εικόνα 3.2.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης κύριας και δευτερεύουσας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 45° και διεύθυνση κλίσης 90° (Swoboda, 1998)	67
Εικόνα 4.2.1 Παράδειγμα εφαρμογής στοιχείων κελύφους (Shell Group of Element) ως σύστημα επένδυσης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) σε σήραγγα κυκλικής διατομής (Itasca, 2017)	72
Εικόνα 5.1.1.1 Πρόσοψη τρισδιάστατου δομικού στοιχείου radial-cylinder στο πρόγραμμα FLAC3D	88
Εικόνα 5.1.1.2 Πρόσοψη δομικού τρισδιάστατου στοιχείου radial-cylinder έπειτα από εντολή “zone reflect”	88
Εικόνα 5.1.1.3 Πρόσοψη δομικού τρισδιάστατου στοιχείου radial-cylinder έπειτα από δύο διαφορετικές εντολές “zone reflect”	88
Εικόνα 5.1.1.4 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία σήραγγας κυκλικής διατομής σε μοντέλο Mohr-Coulomb	91
Εικόνα 5.1.2.1 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία σήραγγας κυκλικής διατομής σε μοντέλο Ubiquitous-Joint	95
Εικόνα 5.1.2.2 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου, με κλίση ασυνεχειών 0° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: $s3=15$ και $s4=15$, Κάτω: $s3=45$ και $s4=45$	100
Εικόνα 5.1.2.3 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου, με κλίση ασυνεχειών 45° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: $s3=15$ και $s4=15$, Κάτω: $s3=45$ και $s4=45$	100
Εικόνα 5.1.2.4 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου, με κλίση ασυνεχειών 90° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: $s3=15$ και $s4=15$, Κάτω: $s3=45$ και $s4=45$	101
Εικόνα 5.1.2.5 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία και εφαρμογή μέτρου υποστήριξης τύπου shell element	102
Εικόνα 5.1.2.6 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για υποστηριγμένη και ανυποστηρίχτη σήραγγα, με κλίση ασυνεχειών 0° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: ανυποστηρίχτη σήραγγα με $s3=30$ και $s4=30$, Κάτω: υποστηριγμένη σήραγγα με $s3=30$ και $s4=30$	104
Εικόνα 5.2.1 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία στοιχείου cylindrical-intersection	107
Εικόνα 5.2.2 Τρισδιάστατο στοιχείο cylindrical-intersection του προγράμματος FLAC3D	107
Εικόνα 5.2.3 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία δύο στοιχείων cylindrical-intersection	108
Εικόνα 5.2.4 Συνδυασμός δύο τρισδιάστατων στοιχείων cylindrical-intersection	108
Εικόνα 5.2.5 Συνδυασμός δύο τρισδιάστατων στοιχείων cylindrical-intersection έπειτα από εντολή “zone reflect”	109
Εικόνα 5.2.6 Συνδυασμός δύο τρισδιάστατων στοιχείων cylindrical-intersection έπειτα από εντολή “zone reflect” και ενός τρισδιάστατου στοιχείου radial-cylinder	110
Εικόνα 5.2.7 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα	110
Εικόνα 5.2.8 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα	111
Εικόνα 5.2.9 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα	111
Εικόνα 5.2.10 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία κάθετης διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα	112
Εικόνα 5.2.11 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί	113
Εικόνα 5.2.12 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία διασταύρωσης σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί	113

Εικόνα 5.3.1 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα	115
Εικόνα 5.3.2 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα	115
Εικόνα 5.3.3 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί	115
Εικόνα 5.3.4 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία διασταύρωσης σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί	116
Εικόνα 6.1 Εντολές μηδενισμού μετατοπίσεων και αστοχίας του μοντέλου	117
Εικόνα 6.1.1.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στο τμήμα της κάθετης διασταύρωσής της κύριας με τη δευτερεύουσα σήραγγα	119
Εικόνα 6.1.1.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας	120
Εικόνα 6.1.1.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης των δύο κυκλικών σηράγγων	121
Εικόνα 6.1.1.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης στην περιοχή της διασταύρωσης των κυκλικών σηράγγων	122
Εικόνα 6.1.1.5 Κατανομή της προκαλούμενης πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας	122
Εικόνα 6.1.1.6 Κατανομή της προκαλούμενης πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας	123
Εικόνα 6.1.2.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα	128
Εικόνα 6.1.2.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα	129
Εικόνα 6.1.2.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης των δύο κυκλικών σηράγγων για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα	130
Εικόνα 6.1.2.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°	131
Εικόνα 6.1.2.5 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 30°	131
Εικόνα 6.1.2.6 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 60°	132
Εικόνα 6.1.2.7 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 90°	132
Εικόνα 6.1.2.8 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°	133
Εικόνα 6.1.2.9 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 30°	133
Εικόνα 6.1.2.10 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 60°	134
Εικόνα 6.1.2.11 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 90°	134
Εικόνα 6.1.3.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα	139
Εικόνα 6.1.3.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα	140
Εικόνα 6.1.3.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης των δύο κυκλικών σηράγγων για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα	141
Εικόνα 6.1.3.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°	142

Εικόνα 6.1.3.5 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 30°	142
Εικόνα 6.1.3.6 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 60°	143
Εικόνα 6.1.3.7 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 90°	143
Εικόνα 6.1.3.8 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°	144
Εικόνα 6.1.3.9 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 30°	144
Εικόνα 6.1.3.10 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 60°	145
Εικόνα 6.1.3.11 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 90°	145
Εικόνα 6.2.1.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας που ταυτίζεται και με την κατανομή των μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας	150
Εικόνα 6.2.1.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης μορφής «+» των σηράγγων	150
Εικόνα 6.2.1.3 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας που ταυτίζεται και με την κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας	151
Εικόνα 6.2.1.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης στην περιοχή της διασταύρωσης των κυκλικών σηράγγων	151
Εικόνα 6.2.2.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας	155
Εικόνα 6.2.2.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας	155
Εικόνα 6.2.2.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης μορφής «+»	155
Εικόνα 6.2.2.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας	156
Εικόνα 6.2.2.5 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας	156
Εικόνα 6.2.2.6 Κατανομή πλαστικής ζώνης στην περιοχή δύο διαφορετικών μορφών διασταύρωσης σε ανισότροπη βραχομάζα με κλίση και διεύθυνση κλίσης ασυνεχειών ίσες με 90°	157

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Συσχέτιση ανυποστήριχτου ανοίγματος (W) με το χρόνο αυτοϋποστήριξης των επιμέρους υπόγειων εκσκαφών και της διασταύρωσής τους (W_2 , W_1 και W_i , το άνοιγμα της οροφής της κύριας σήραγγας (TUNNEL I), της δευτερεύουσας σήραγγας (TUNNEL II) και της διασταύρωσης τους αντίστοιχα, ενώ t_2 , t_1 και t_i , ο χρόνος αυτοϋποστήριξης της κύριας σήραγγας, της δευτερεύουσας και της διασταύρωσής τους αντίστοιχα) (Gercek, 1986).....	4
Σχήμα 2.2 Υπόγεια διασταύρωση σηράγγων, όπου ο προσανατολισμός των ασυνχειών της βραχομάζας καθίσταται ευνοϊκός για σήραγγα η οποία διανοίγεται κάθετα στην κλίση τους (TUNNEL I), ενώ γίνεται δυσμενής για άλλη που κατασκευάζεται παράλληλα στην κλίση των ασυνχειών (TUNNEL II) (Gercek, 1986)	5
Σχήμα 2.1.1 Έκταση της ασταθούς ζώνης, προκαλούμενη από την υπόγεια τομή σηράγγων, για τρεις διαφορετικούς τρόπους διασταύρωσης (Gercek, 1986).....	6
Σχήμα 2.1.2 Ανακατανομή των εφαπτομενικών τάσεων πέριξ της διατομής της κύριας σήραγγας και η μεταβολή της γεωμετρίας του ανοίγματός της, πλησίον της περιοχής της κάθετης διασταύρωσής της με κυκλική σήραγγα εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (με κόκκινο απεικονίζονται οι θλιπτικές τάσεις, με μωβ οι εφελκυστικές και με μαύρο οι τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου) (Chortis & Kanvadas, 2020).....	11
Σχήμα 2.1.3 Εγκάρσια διατομή της κύριας σήραγγας στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής της με την δευτερεύουσα (Gkikas & Nomikos, 2020).....	11
Σχήμα 2.1.4 Πρόσθετες εφαπτομενικές τάσεις στην περιοχή εκτός εγγύτητας της διασταύρωσης για το σημείο τομής της παρειάς της κύριας σήραγγας με την στέψη της δευτερεύουσας (Αριστερά: εγκάρσια ημιδιατομή κύριας σήραγγας, Δεξιά: εγκάρσια διατομή δευτερεύουσας σήραγγας) (Gkikas & Nomikos, 2020)	12
Σχήμα 2.1.5 Διακύμανση της μέγιστης κύριας τάσης κατά μήκος του διαμήκη άξονα $A-A'$ της κύριας σήραγγας (Li et al. 2016).....	15
Σχήμα 2.2.1 Συσχέτιση της κατακόρυφης μετατόπισης της οροφής και του λόγου σ_{cm}/P_o της περιβάλλουσας βραχομάζας μίας περιοχής διασταύρωσης σηράγγων: (a) Κατακόρυφη μετατόπιση της οροφής της κύριας σήραγγας, (b) Κατακόρυφη μετατόπιση οροφής της δευτερεύουσας σήραγγας (Hsiao et al. 2008).....	16
Σχήμα 2.2.2 Υπεραυξημένες μετατοπίσεις (exaggerated displacements) της κύριας σήραγγας σε τρία διαφορετικά τμήματα της εγκάρσιας διατομής της (με μαύρο απεικονίζεται η κανονική διατομή δίχως μετατοπίσεις, με μπλε το παραμορφωμένο τμήμα στο σημείο της διασταύρωσης και με φούζια και κόκκινο τα τμήματα για 8m και 16m αντίστοιχα από την περιοχή της διασταύρωσης) (Li et al. 2016).....	18
Σχήμα 2.2.3 Κατανομή πρόσθετων μετατοπίσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας σε σημεία του μετώπου της τα οποία τέμνονται από το πλευρικό τοίχωμα της κύριας ($\theta=60^\circ$ και $\theta=90^\circ$) (Αριστερά: εγκάρσια ημιδιατομή κύριας σήραγγας, Δεξιά: εγκάρσια διατομή δευτερεύουσας σήραγγας) (Gkikas & Nomikos, 2020).....	19
Σχήμα 2.2.4 (a) Εγκάρσια διατομή της κύριας σήραγγας στο σημείο διασταύρωσής της με την δευτερεύουσα, (b) Σημεία στη στέψη της κύριας σήραγγας για τα οποία πραγματοποιήθηκε μελέτη καθιζήσεων κατά την διαμήκη διεύθυνσή της (Li et al. 2016).....	20
Σχήμα 2.2.5 Καμπύλες μεταβολής των καθιζήσεων στα σημεία k , n και m στην οροφή της κύριας σήραγγας, κατά τον διαμήκη άξονά της (με μπλε χρώμα απεικονίζεται η μεταβολή των καθιζήσεων στο σημείο k , με κόκκινο στο σημείο n και με μαύρο χρώμα στο σημείο m) (Li et al. 2016).....	20
Σχήμα 2.3.1 (a) Σχηματική απεικόνιση της υπόγειας διασταύρωσης της κύριας σήραγγας (Tunnel 1) με την δευτερεύουσα (Tunnel 2) υπό οξεία γωνία, (b) Απεικόνιση του δημιουργούμενου τριγωνικού τμήματος (triangle area) λόγω της διασταύρωσης των σηράγγων (Liu et al. 2020).....	22
Σχήμα 2.3.2 Διάγραμμα αξιολόγησης της επίδρασης που έχει η γωνία τομής των σηράγγων στην ευστάθεια της υπόγειας διασταύρωσής τους (Hsiao et al. 2008).....	23
Σχήμα 2.3.3 Σχέση μεταξύ της πρόσθετης κατακόρυφης μετατόπισης της οροφής των σηράγγων και της γωνίας διασταύρωσής τους: (a) Επιπρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης της κύριας σήραγγας, (b) Επιπρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας (Hsiao et al. 2008).....	24

Σχήμα 2.3.4 Παραμορφώσεις της στέψης, για γωνίες τομής των σηράγγων 60° (μπλε χρώμα), 75° (πράσινο χρώμα) και 90° (κόκκινο χρώμα), συγκριτικά με την απόσταση από το κέντρο του σημείου διασταύρωσής τους (Gharouni-Nik & Farmahini Farahani, 2016).....	25
Σχήμα 2.3.5 Μεταβολή των τάσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας σε σχέση με την απόσταση από το σημείο της διασταύρωσης, για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις μεγέθους της διατομής του σημείου διασταύρωσης: (α) Διατομή ίση με μία διάμετρο τεμνόμενης σήραγγας, (β) Διατομή ίση με δύο διαμέτρους τεμνόμενης σήραγγας, (γ) Διατομή ίση με τρεις διαμέτρους τεμνόμενης σήραγγας, (δ) Διατομή ίση με τέσσερις διαμέτρους τεμνόμενης σήραγγας (Liu et al. 2020).....	26
Σχήμα 2.3.6 Υπολογισμός του λόγου συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων στην γωνία τομής δύο κυκλικών σηράγγων στο ύψος του κεντρικού οριζώντιου άξονα, (σημείο P), σε σχέση με την γωνία διασταύρωσης, όπου P_v η κατακόρυφη τάση του εντατικού πεδίου και P_h η πλευρική (Gercek, 1986).....	26
Σχήμα 2.4.1 Επίδραση του μεγέθους της σήραγγας στην έκταση της ζώνης επιρροής της (region of influence). Είναι εμφανές ότι η ζώνη επιρροής της σήραγγας με την μεγαλύτερη διατομή (LARGE TUNNEL) είναι εντονότερη από αυτήν που δημιουργεί η σήραγγα με την μικρότερη διατομή (SMALL TUNNEL) (Gercek, 1986).....	27
Σχήμα 2.5.1 Γραμμική μεταβολή του συντελεστή συγκέντρωσης των εφαπτομενικών τάσεων κατά τον κεντρικό οριζόντιο άξονα στην γωνία διασταύρωσης των σηράγγων (σημεία P και Q) για διάφορες τιμές του K_o (Gercek, 1986).....	29
Σχήμα 2.6.1 Τέσσερα εναλλακτικά σενάρια κάθετης διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων ως προς την κατεύθυνση και την σειρά διάνοιξης των δύο τμημάτων (δεξιού και αριστερού) της δευτερεύουσας σήραγγας. Τα βέλη προσδιορίζουν την κατεύθυνση της διάνοιξης, η κύρια και η δευτερεύουσα σήραγγα απεικονίζονται με κόκκινο και με γκρι χρώμα αντίστοιχα, ενώ οι λατινικοί αριθμοί ορίζουν την σειρά με την οποία πραγματοποιούνται οι διανοίξεις (Chortis & Kanvadas, 2020).....	30
Σχήμα 2.7.1 Μέτρα υποστήριξης των διαφόρων τμημάτων της περιοχής κάθετης διασταύρωσης σηράγγων (Gkikas & Nomikos, 2020).....	34
Σχήμα 2.7.2 Εκτίμηση ευστάθειας κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός βραχομάζας με λόγο $\sigma_{cm}/P_o \geq 0.5$ (Hsiao et al. 2008).....	35
Σχήμα 2.7.3 Εκτίμηση ευστάθειας κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός βραχομάζας με λόγο $0.25 \leq \sigma_{cm}/P_o \leq 0.5$ (Hsiao et al. 2008).....	35
Σχήμα 2.7.4 Εκτίμηση ευστάθειας κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός βραχομάζας με λόγο $\sigma_{cm}/P_o \leq 0.5$ (Hsiao et al. 2008).....	36
Σχήμα 2.7.5 Εύρος ενίσχυσης των ήλων στην οροφή κάθετης διασταύρωσης σηράγγων μορφής σταυρού (α) και T (β) (Gercek, 1986).....	38
Σχήμα 2.7.6 Σχέση μεταξύ των πρόσθετων μετατοπίσεων, που προκαλούνται στις επιμέρους τεμνόμενες σήραγγες, με την απόσταση από το κέντρο της διασταύρωσής τους (Hsiao et al. 2008).....	40
Σχήμα 3.1 Δομή ανισότροπης βραχομάζας κατά Hoek (1983) (Νομικός, 2015).....	41
Σχήμα 3.2 Μεταβολή της παραμορφωσιμότητας ανισότροπης βραχομάζας, με βάση την κλίση των ασυνεχειών της (σχιστότητα) και την κατεύθυνση της φόρτισης (σ), όπου $\delta 1$ και $\delta 2$ είναι οι αντίστοιχες παραμορφώσεις για οριζόντια και κάθετη κλίση των ασυνεχειών (Wittke, 1990).....	42
Σχήμα 3.1.1 Παραδείγματα στρωσιγενών βραχομάζων και η αναμενόμενη δομική συμπεριφορά τους κατά την διάνοιξη σήραγγας (Fortsakis et al. 2012).....	45
Σχήμα 3.1.1.1 Κατανομή ακτινικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_o : (α) Απεικόνιση της κατανομής των ακτινικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (β) Διάγραμμα μεταβολής των ακτινικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).....	46
Σχήμα 3.1.1.2 Κατανομή εφαπτομενικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_o : (α) Απεικόνιση της κατανομής των εφαπτομενικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (β) Διάγραμμα μεταβολής των εφαπτομενικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).....	47
Σχήμα 3.1.1.3 Διατομή κυκλικής σήραγγας ακτίνας r_o εντός (α) ισότροπης βραχομάζας και (β) ανισότροπης βραχομάζας (Bobet, 2010).....	47

Σχήμα 3.1.1.4 Κατανομή μετατοπίσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : Πάνω: Κυκλική σήραγγα εντός ανισότροπης βραχομάζας με οριζόντια επίπεδα ασυνεχειών, (α) Απεικόνιση της κατανομής των μετατοπίσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (β) Διάγραμμα μεταβολής των μετατοπίσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).	48
Σχήμα 3.1.1.5 Κατανομή ακτινικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : (α) Απεικόνιση της κατανομής των ακτινικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (β) Διάγραμμα μεταβολής των ακτινικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).	49
Σχήμα 3.1.1.6 Κατανομή εφαπτομενικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : (α) Απεικόνιση της κατανομής των εφαπτομενικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (β) Διάγραμμα μεταβολής των ακτινικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).	49
Σχήμα 3.1.2.1 Παραμορφώσεις κυκλικής διατομής σήραγγας, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (β) (Fortsakis et al. 2012)	51
Σχήμα 3.1.2.2 Κατανομή μετατοπίσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας, για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Tonon & Amadei, 2003).....	51
Σχήμα 3.1.2.3 Έκταση πλαστικής ζώνης γύρω από κυκλική διατομή σήραγγας, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών της ανισότροπης βραχομάζας (Fortsakis et al. 2012)	52
Σχήμα 3.1.3.1 Μετατοπίσεις γύρω από κυκλική διατομή υπόγειας εκσκαφής σε ανισότροπη βραχομάζα με δύο σύνολα κύριων ασυνεχειών κλίσης 30° και -30° , για διάφορες τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ($\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = 0.5, 1.0$ και 2.0): (α) Μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (u_r) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος, (β) Μέγεθος εφαπτομενικών μετατοπίσεων (u_θ) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος (Wang, 2013)	56
Σχήμα 3.1.4.1 Μετατοπίσεις γύρω από κυκλική διατομή υπόγειας εκσκαφής σε ανισότροπη βραχομάζα με δύο σύνολα κύριων ασυνεχειών κλίσης 30° και -30° , για διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας ($JRC = 8, JRC=12, JRC=16$ και $JRC=20$): (α) Μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (u_r) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος, (β) Μέγεθος εφαπτομενικών μετατοπίσεων (u_θ) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος (Wang, 2013).....	57
Σχήμα 3.1.5.1 Μετατοπίσεις γύρω από κυκλική διατομή υπόγειας εκσκαφής σε ανισότροπη βραχομάζα με δύο σύνολα κύριων ασυνεχειών κλίσης 30° και -30° , για διάφορα πάχη υπερκείμενων πετρωμάτων, δηλαδή βάθη διάνοιξης ($overburden=200m, 400m$ και $600m$): (α) Μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (u_r) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος, (β) Μέγεθος εφαπτομενικών μετατοπίσεων (u_θ) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος (Wang, 2013)	58
Σχήμα 4.1.1 Τρισδιάστατα στοιχεία για την κατασκευή μοντέλων στο FLAC3D και τυπικό παράδειγμα σχεδιασμού σήραγγας με την χρήση και το συνδυασμό των παραπάνω στοιχείων (Itasca, 2017).....	70
Σχήμα 4.2.1 Απεικόνιση στοιχείου κελύφους με το αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων του. Διακρίνονται οι δεκαοχτώ ενεργοί βαθμοί ελευθερίας του (Itasca, 2017).....	72
Σχήμα 4.3.1 Προσομοίωση ανισότροπης βραχομάζας με το μοντέλο Ubiquitous-Joint. Διακρίνονται οι ζώνες του μοντέλου που αποτελούν το άρρηκτο πέτρωμα (Zone Matrix) και εντός αυτών ορίζεται ένα επίπεδο ανισοτροπίας (Ubiquitous Joint) με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Με ανοιχτό γκρι χρώμα απεικονίζονται τα επίπεδα ανισοτροπίας που έχουν αστοχήσει σε διάτμηση (Shear), με σκούρο γκρι σε εφελκυσμό (Tension) και με μαύρο τόσο σε διάτμηση όσο και σε εφελκυσμό (Sainsbury, 2017).....	73
Σχήμα 4.3.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb του μοντέλου Ubiquitous-Joint (Itasca, 2017)	74
Σχήμα 4.3.3 Γραφική απεικόνιση των τομέων διατμητικής (Domain 1) και εφελκυστικής (Domain 2) πλαστικής ροής του μοντέλου Mohr-Coulomb (Itasca, 2017).....	76
Σχήμα 4.3.4 Κριτήριο αστοχίας επιπέδου ανισοτροπίας σύμφωνα με το μοντέλο Ubiquitous-Joint (Zhao & He, 2011, Itasca, 2017).....	77
Σχήμα 4.3.5 Γραφική απεικόνιση των τομέων διατμητικής (Domain 1) και εφελκυστικής (Domain 2) πλαστικής ροής του μοντέλου Ubiquitous-Joint (Itasca, 2017).....	78

Σχήμα 4.3.6 (a) Αναλυτική λύση του Jaeger (1960) για την επίδραση ενός συνόλου κύριων ασυνεχειών σε ανισότροπο πέτρωμα, (b) Σύγκριση αποτελεσμάτων του μοντέλου Ubiquitous-Joint με την αναλυτική λύση του Jaeger (1960)	81
Σχήμα 5.1.1 Δομικό στοιχείο radial-cylinder του προγράμματος FLAC3D (Itasca, 2017).....	84
Σχήμα 5.1.2 Δομικό στοιχείο cylindrical-intersection του προγράμματος FLAC3D (Itasca, 2017).....	84
Σχήμα 5.1.1.1 Πρότυποι γενικοί άξονες (xyz global axes) του μοντέλου FLAC3D και τοπικοί άξονες (d-s-n local face axes) της δημιουργούμενης επιφάνειας (Itasca, 2017).....	86
Σχήμα 5.1.1.2 Δεδομένα για τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος σύμφωνα με τους υπολογισμούς του προγράμματος RocData	90
Σχήμα 5.1.1.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3.....	91
Σχήμα 5.1.1.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4.....	92
Σχήμα 5.1.1.5 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4	92
Σχήμα 5.1.1.6 Διάγραμμα σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας, ακτίνας 5m, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (7.5MPa) στο πρόγραμμα RocSupport.....	93
Σχήμα 5.1.2.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3.....	96
Σχήμα 5.1.2.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4.....	96
Σχήμα 5.1.2.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4	96
Σχήμα 5.1.2.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3.....	97
Σχήμα 5.1.2.5 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4.....	97
Σχήμα 5.1.2.6 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4	97
Σχήμα 5.1.2.7 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3.....	98
Σχήμα 5.1.2.8 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4.....	98
Σχήμα 5.1.2.9 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4	98
Σχήμα 5.1.2.10 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4 ..	99
Σχήμα 5.1.2.11 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4 ..	99
Σχήμα 5.1.2.12 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3.....	103
Σχήμα 5.1.2.13 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4.....	103
Σχήμα 5.1.2.14 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4	103
Σχήμα 6.1.1.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας.....	119
Σχήμα 6.1.1.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας....	120
Σχήμα 6.1.1.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας	120
Σχήμα 6.1.1.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας	121
Σχήμα 6.1.2.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	126
Σχήμα 6.1.2.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	126
Σχήμα 6.1.2.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	127
Σχήμα 6.1.2.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	127
Σχήμα 6.1.3.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	137
Σχήμα 6.1.3.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	137
Σχήμα 6.1.3.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	138
Σχήμα 6.1.3.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°	138

Σχήμα 6.2.1.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+»	148
Σχήμα 6.2.1.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «+» και κατά μήκος της δεξιάς παρειάς της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T».....	148
Σχήμα 6.2.1.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+».....	149
Σχήμα 6.2.1.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T» και των δευτερευουσών σήραγγων διασταύρωσης μορφής «+»	149
Σχήμα 6.2.2.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+»	153
Σχήμα 6.2.2.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «+» και κατά μήκος της δεξιάς παρειάς της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T».....	153
Σχήμα 6.2.2.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+».....	154
Σχήμα 6.2.2.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T» και των δευτερευουσών σήραγγων διασταύρωσης μορφής «+»	154

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.7.1 Σχεδιασμός συστήματος υποστήριξης διασταύρωσης σηράγγων για διάφορα είδη βραχομάζας και φυσικών εντατικών συνθηκών (Hsiao et al. 2008).....	37
Πίνακας 2.7.2 Προτεινόμενες περιοχές ενίσχυσης του συστήματος υποστήριξης της υπόγειας διασταύρωσης για διάφορα είδη βραχομάζας και φυσικών εντατικών συνθηκών, όπου D το μήκος του εγκάρσιου ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας (Hsiao et al. 2008).....	40
Πίνακας 3.1.7.1 Επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στη διάνοιξη σήραγγας (Bieniawski, 1989).....	62
Πίνακας 3.1.7.2 Προσαρμογή της τιμής RMR_{BASIC} με βάση την επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην διάνοιξη σήραγγας (Bieniawski, 1989).....	63
Πίνακας 3.1.7.3 Χαρακτηρισμός βραχομάζας με βάση την τιμή RMR που της αντιστοιχεί (Bieniawski, 1989).....	63
Πίνακας 3.1.7.4 Προτεινόμενες μέθοδοι διάνοιξης και υποστήριξης σήραγγας με βάση την κατηγορία βραχομάζας κατά RMR (Bieniawski, 1989).....	64

1 Εισαγωγή

Λόγω της ανάγκης που έχει αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών για πιο αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον υποδομές, η κατασκευή υπόγειων έργων έχει σημειώσει μεγάλη αύξηση. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στη δημιουργία πολυάριθμων γεωτεχνικών έργων στο υπέδαφος, που σταδιακά, λόγω της μεγαλύτερης λειτουργικότητας και αποδοτικότητας που οφείλουν να προσφέρουν, αποκτούν όλο και πιο πολύπλοκες δομές. Αυτό συνεπάγεται την αναπόφευκτη τομή δύο ή περισσότερων εκσκαφών κατά την υλοποίηση ενός υπόγειου έργου. Σύνηθες παράδειγμα αποτελούν οι σήραγγες που κατά τη διάνοιξή τους συχνά απαιτείται η διασταύρωσή τους με εγκάρσιες εξόδους κινδύνου, με υπόγεια ανοίγματα εξυπηρέτησης ή γενικά με επιπλέον τεμνόμενες σε αυτές εκσκαφές που είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση της κατασκευής.

Επίσης, οι δομές που συναντώνται στη φύση, ως επί το πλείστον δεν χαρακτηρίζονται ως ισότροπες και ομοιογενείς. Εξαιτίας των ατέρμωνων γεωλογικών διεργασιών που διαβρώνουν, μεταμορφώνουν και γενικά καταπονούν τα πετρώματα, ο σχηματισμός ασυνεχειών (όπως διακλάσεις, ρήγματα, σχιστότητα κ.α.) στη μάζα τους αποτελεί συχνό φαινόμενο. Οι ασυνέχειες αυτές μεταβάλουν τις ιδιότητες των γεωυλικών ανάλογα με την κατεύθυνση της φόρτισης ως προς την διεύθυνσή τους και κατά συνέπεια τα καθιστούν ανισότροπα.

Συμπερασματικά, η κατασκευή μίας διασταύρωσης σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα αποτελεί μία κατασκευαστική πρόκληση η οποία πλέον καλείται να αντιμετωπιστεί σε πληθώρα υπόγειων γεωτεχνικών έργων. Με βάση αυτό το πόρισμα, και σε συνδυασμό με την έλλειψη σχετικής βιβλιογραφίας και μελετών επί του θέματος, διαμορφώθηκε ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο οποίος αποτελεί τη μελέτη και την αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η ανισοτροπία της βραχομάζας στη διάνοιξη μιας διασταύρωσης σηράγγων που πραγματοποιείται σε αυτή.

Λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας και της τρισδιάστατης ανακατανομής των τάσεων που ενσωματώνει το υπόγειο αυτό έργο, για τη διεξαγωγή της μελέτης πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις σε πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση του λογισμικού FLAC3D 6.00 το οποίο θεωρεί το πέτρωμα ως (ισοδύναμο) συνεχές μέσο. Πιο αναλυτικά, υλοποιήθηκαν δύο στάδια προσομοιώσεων. Στο πρώτο στάδιο έγινε ο σχεδιασμός και η κατασκευή των μοντέλων προς ανάλυση. Τα

μοντέλα που εξετάστηκαν προσομοιώνουν κάθετες διασταυρώσεις κυκλικών σηράγγων, ίδιας διατομής, σε μορφή τομής «T» και «+». Καθορίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της μοντελοποιημένης βραχομάζας καθώς και οι ιδιότητες των επιπέδων ανισοτροπίας της. Στο δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί των προκαλούμενων μετατοπίσεων και της σχηματιζόμενης πλαστικής ζώνης γύρω από το υπόγειο άνοιγμα των εξεταζόμενων διασταυρώσεων. Με την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τους παραπάνω υπολογισμούς, εξάγονται στη συνέχεια χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την επίδραση που έχει η ανισοτροπία της βραχομάζας, και συγκεκριμένα ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, στην ανακατανομή των τάσεων και συνεπώς των δημιουργούμενων παραμορφώσεων γύρω από την περιοχή της διασταύρωσης.

Τέλος, με βάση τα παραγόμενα συμπεράσματα προτείνονται πιθανοί τρόποι για περαιτέρω ανάλυση και μελέτη του θέματος ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανόηση του ζητήματος.

2 Διασταύρωση Σηράγγων

Η κατασκευαστική κλίμακα των υπόγειων έργων έχει σημειώσει σημαντική αύξηση τη σημερινή εποχή, με τη σηραγγοποιία πλέον να θεωρείται ως μία από τις ευνοϊκότερες περιβαλλοντικά υποδομές ακόμη και για πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Αυτό έχει οδηγήσει σε αύξηση τόσο της ζήτησης όσο και της πολυπλοκότητας της δομής των υπόγειων έργων λόγω των διαφόρων λειτουργικών τους χρήσεων καθώς και των απαιτητικών γεωλογικών συνθηκών που συναντούνται συχνά στο υπέδαφος. Ως εκ τούτου, η εμφάνιση υπόγειων διασταυρωμένων εκσκαφών είναι αναπόφευκτη (Gaspari 2010, Liu et al. 2020).

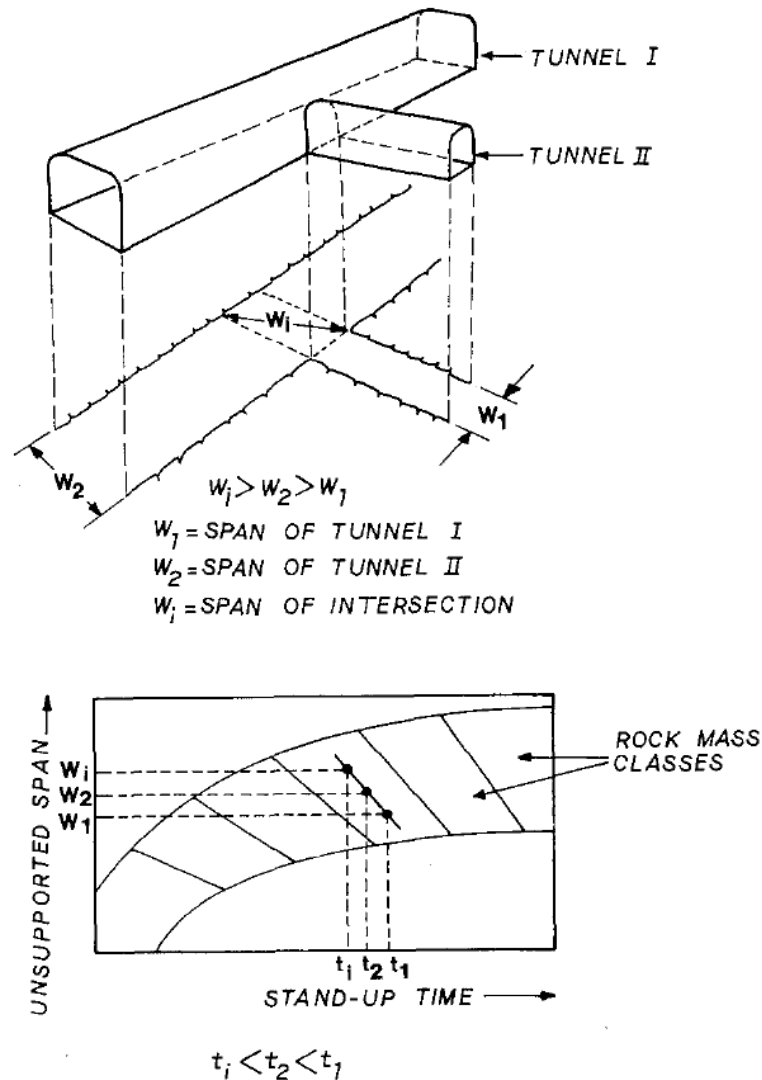
Οι διασταυρώσεις αυτές απαντώνται και αναπτύσσονται σε ποικίλα γεωτεχνικά έργα όπως συστήματα μητροπολιτικών σιδηροδρόμων (μετρό), υπόγειους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς και δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης. Ομοίως, σε υπόγειες μεταλλευτικές εκμεταλλεύσεις, παρατηρούνται διασταυρώσεις σε ορύξεις φρεάτων και στοών. Ειδικά σε υπόγειες μεταλλευτικές δραστηριότητες όπου εφαρμόζεται η μέθοδος εκμετάλλευσης θαλάμων και στύλων (room and pillar), οι διασταυρώσεις αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του συστήματος, εφόσον η προχώρηση των στοών πραγματοποιείται σε διαφορετικές διευθύνσεις, κάθετες μεταξύ τους, και συνεπώς σχηματίζονται διασταυρώσεις καθ' όλη την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης (Gercek, 1986).

Η δομική ευστάθεια λοιπόν των διασταυρωμένων υπόγειων εκσκαφών είναι ζωτική προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία των γεωτεχνικών έργων και των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων όπου συναντώνται. Ωστόσο, η μεγαλύτερη πιθανότητα αστάθειας σε υπόγειες εκσκαφές παρατηρείται στα σημεία τομής τους λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας που τα χαρακτηρίζει, η οποία δημιουργεί σύνθετη ανακατανομή των τάσεων και συνεπώς επιπρόσθετη παραμόρφωση και διαταραχή στην εκσκαφή και στην περιβάλλουσα βραχομάζα (Gercek 1986, Hsiao et al. 2008, Gkikas & Nomikos, 2020).

Συγκεκριμένα, η πιθανότητα δομικής αστάθειας είναι πιο έντονη στην περιοχή της διασταύρωσης για έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους λόγους (Bieniawski 1984(από το paper Fugelso), Gercek, 1986):

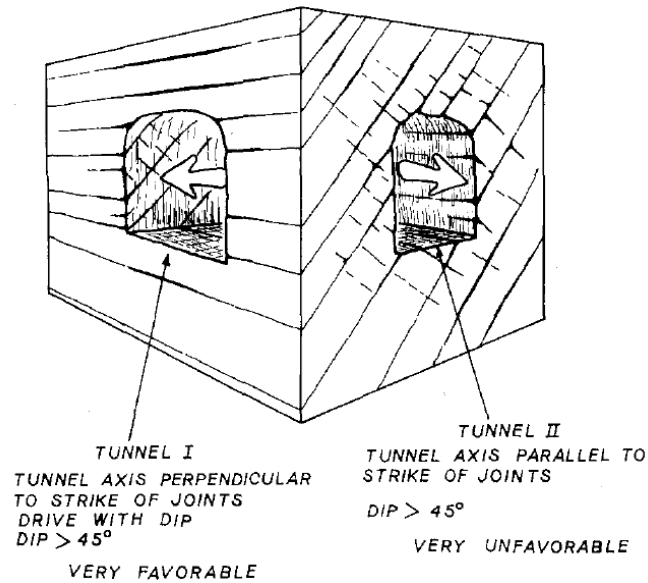
- 1) Το απαιτούμενο μήκος της οροφής, στο σημείο της διασταύρωσης, το οποίο χρήζει υποστήριξης (ενεργό άνοιγμα (unsupported span)) είναι μεγαλύτερο από το πλάτος

των ενεργών ανοιγμάτων των επιμέρους εκσκαφών που τέμνονται. Σύμφωνα κιόλας με τα υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας (όπως RMR και Q), μεγαλύτερο άνοιγμα ανυποστήριχτης υπόγειας οροφής αντιστοιχεί σε μικρότερο χρόνο αυτοϋποστήριξης (Stand-up Time), όπως διακρίνεται στο Σχ. 2.1.



Σχήμα 2.1 Συσχέτιση ανυποστήριχτου ανοίγματος (W) με το χρόνο αυτοϋποστήριξης των επιμέρους υπόγειων εκσκαφών και της διασταύρωσής τους (W_2 , W_1 και W_i , το άνοιγμα της οροφής της κύριας σήραγγας (TUNNEL I), της δευτερεύουσας σήραγγας (TUNNEL II) και της διασταύρωσής τους αντίστοιχα, ενώ t_2 , t_1 και t_i , ο χρόνος αυτοϋποστήριξης της κύριας σήραγγας, της δευτερεύουσας και της διασταύρωσής τους αντίστοιχα) (Gercek, 1986)

- 2) Είναι πιθανό ότι ένας ευνοϊκός προσανατολισμός ασυνεχειών (δηλαδή διακλάσεις, στρώσεις, ρήγματα) για την διάνοιξη μίας υπόγειας εκσκαφής, μπορεί να καταστεί δυσμενής για την διάνοιξη μιας άλλης. Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας περίπτωσης απεικονίζεται στο Σχ. 2.2.



Σχήμα 2.2 Υπόγεια διασταύρωση σηράγγων, όπου ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχομάζας καθίσταται ευνοϊκός για σήραγγα η οποία διανοίγεται κάθετα στην κλίση τους (TUNNEL I), ενώ γίνεται δυσμενής για άλλη που κατασκευάζεται παράλληλα στην κλίση των ασυνεχειών (TUNNEL II) (Gercek, 1986)

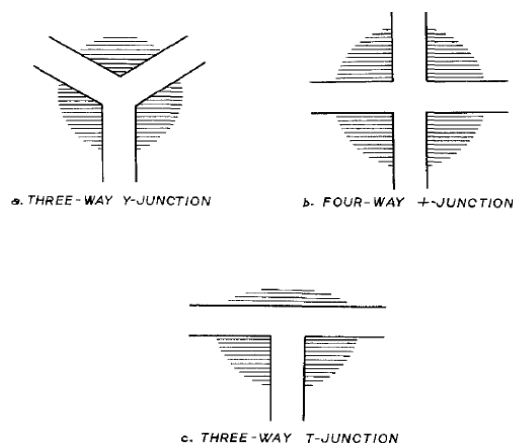
- 3) Οι γεωστατικές τάσεις που επικρατούν στην περιοχή της διασταύρωσης μετατρέπονται σε τρισδιάστατο εντατικό πεδίο προς ανάλυση λόγω της απότομης αλλαγής της γεωμετρίας του υπόγειου ανοίγματος.
- 4) Σε μια υπόγεια διασταύρωση, η υποστήριξη που παρέχεται από τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής αφαιρείται. Η απομάκρυνση αυτής της στήριξης και η δημιουργία πρόσθετων ελεύθερων επιφανειών μπορεί να ευνοήσουν την έκθεση ορισμένων ασταθών τεμάχων πετρώματος ή σφηνών σε μια βραχομάζα που χαρακτηρίζεται από πολυάριθμες ασυνέχειες.

Οι διασταυρώσεις λοιπόν, για τους παραπάνω αναφερθέντες λόγους, καθίστανται ως τα δομικά πιο ευάλωτα τμήματα των υπόγειων διανοίξεων και η σταθερότητα της περιβάλλουσας βραχομάζας στα τμήματα αυτά αποτελεί την σημαντικότερη προϋπόθεση για τη λειτουργικότητα του υπόγειου έργου. Την επίτευξη αυτής της ευστάθειας επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό ποικίλοι παράγοντες όπως η ανακατανομή των τάσεων στο περιβάλλον πέτρωμα και οι προκαλούμενες παραμορφώσεις, ο συντελεστής των πλευρικών ωθήσεων (K_0), η γωνία διασταύρωσης, η μέθοδος διάνοιξης και το μέγεθος της διατομής των επιμέρους εκσκαφών, οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω (Gercek 1986, Liu et al. 2020).

2.1 Ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή της διασταύρωσης

Κατά τη διάνοιξη ενός υπόγειου έργου οι συνοριακές συνθήκες περιμετρικά της εκσκαφής υποβάλλονται σε μεταβολή, με αποτέλεσμα την μετατροπή του προϋπάρχοντος τρισδιάστατου πεδίου τάσεων (πρωτογενές εντατικό πεδίο) μέσα στη βραχομάζα, σε ένα νέο, δευτερογενές. Το νέο αυτό εντατικό πεδίο (δευτερογενές ή επαγόμενο) οφείλεται είτε στην τεχνητή διαταραχή από την μεταβολή των οριακών συνθηκών των τάσεων λόγω της υπόγειας εκσκαφής είτε στη μεταβολή της φυσικής κατάστασης της βραχομάζας, όπως π.χ. τη στερεοποίησή της. (Σοφιανός, 2015).

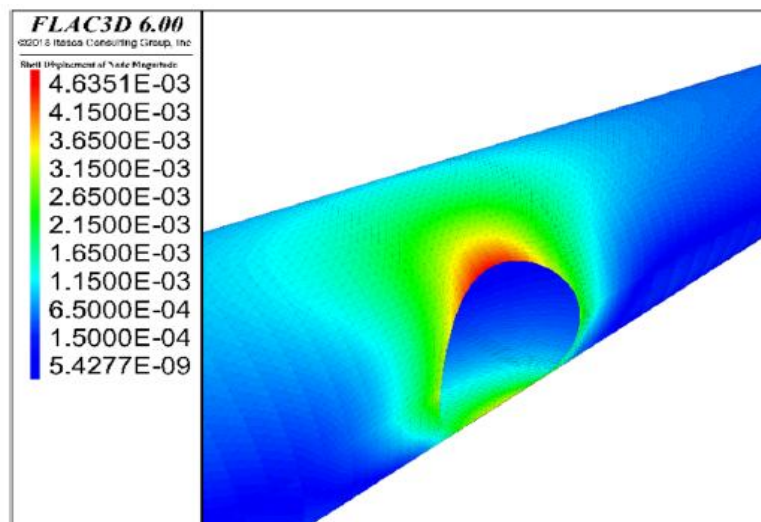
Όταν δύο ή περισσότερες υπόγειες σήραγγες διασταυρωθούν, το δευτερογενές αυτό εντατικό πεδίο καθίσταται ως ένα περίπλοκο, τρισδιάστατο πρόβλημα (Hsiao et al. 2008). Συγκεκριμένα, κατά τη διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας, η οποία θα τμήσει την ήδη υπάρχουσα (κύρια), η περιβάλλουσα βραχομάζα υποβάλλεται σε ανακατανομή των τάσεων που της ασκούνται προκαλώντας την επιπλέον φόρτιση της υπάρχουσας σήραγγας στην περιοχή της διασταύρωσης. Όταν αυτά τα επιπρόσθετα φορτία υπερβούν την αντοχή του συστήματος υποστήριξής της θα δημιουργήσουν μια δυνητικά ασταθής ζώνη η οποία θα προκαλέσει δομικές αστοχίες, ειδικότερα σε υπεδάφη με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά (Chortis & Kavvadas, 2020). Η υπολογιζόμενη έκταση αυτής της ασταθούς ζώνης επιρροής της περιοχής διασταύρωσης των σηράγγων είναι είτε 2.4B ή 1.6B (όπου B είναι η διάμετρος της δευτερεύουσας σήραγγας η οποία τέμνει την ήδη υπάρχουσα), θεωρώντας ως μέγεθος αναφοράς είτε την προκαλούμενη παραμόρφωση είτε την τάση αντίστοιχα (Li et al. 2016). Άλλοι ερευνητές έχουν προτείνει διαφορετικό εύρος της ζώνης αυτής όπως θα αναλυθεί παρακάτω.



Σχήμα 2.1.1 Έκταση της ασταθούς ζώνης, προκαλούμενη από την υπόγεια τομή σηράγγων, για τρεις διαφορετικούς τρόπους διασταύρωσης (Gercek, 1986)

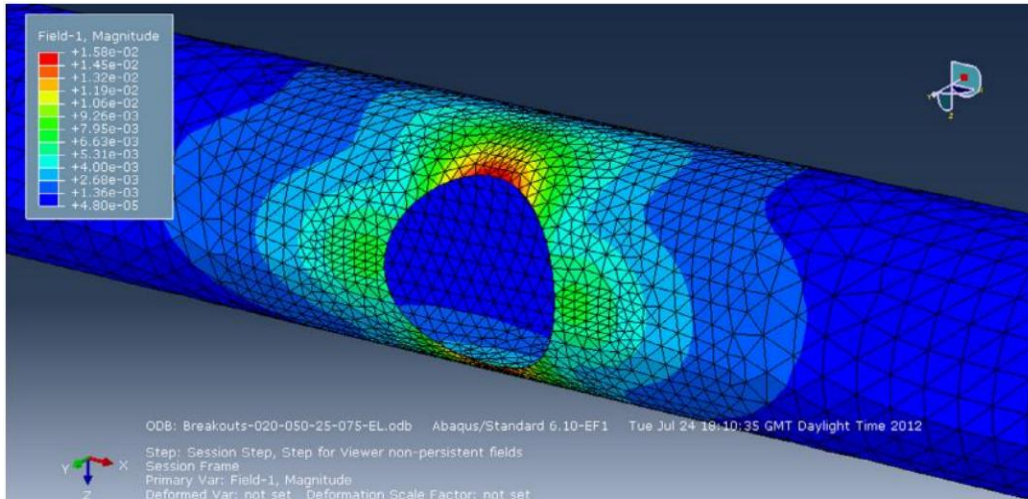
Γενικά, οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται περιμετρικά της εγκάρσιας διατομής των επιμέρους σηράγγων στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονά τους (springline) αυξάνονται προς την γωνία διασταύρωσής τους (δηλαδή προς την ζώνη επιρροής) όπου και λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους (Gercek, 1986). Από αυτές τις μέγιστες τάσεις στην περιοχή της διασταύρωσης, οι εφελκυστικές (εφαπτομενικές και αξονικές) είναι ίσες ή ελαφρώς μικρότερες από αυτές που αναπτύσσονται σε τμήματα των τεμνόμενων σηράγγων εκτός του σημείου τομής τους. Αντίθετα, οι θλιπτικές τάσεις στην γωνία της διασταύρωσης είναι προσεγγιστικά 60% μεγαλύτερες από αυτές που εντοπίζονται στις επιμέρους τεμνόμενες σήραγγες μακριά από το τμήμα της διασταύρωσης (Riley, 1964).

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά κάθετες διασταυρώσεις σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (οι οποίες εξετάζονται και στην παρούσα διπλωματική εργασία), το τμήμα τους που δέχεται την σημαντικότερη επίδραση εντοπίζεται στο ύψος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1.1. Λόγω της σταδιακής διάνοιξής της, προκαλείται η σύγκλιση της περιβάλλουσας βραχομάζας προς τον κενό χώρο που έχει εκσκαφθεί για την όρυξή της, παρασέρνοντας μαζί της την επένδυση της κύριας, ήδη διανοιγμένης, σήραγγας (Gkikas & Nomikos, 2020).



Εικόνα 2.1.1 Μετατοπίσεις στην περιοχή κάθετης διασταύρωσης σηράγγων σε υδροστατικό εντατικό πεδίο. Παρατηρείται το τμήμα που δέχεται την μεγαλύτερη επίδραση στην στέψη της δευτερεύουσας σήραγγας (Gkikas & Nomikos, 2020)

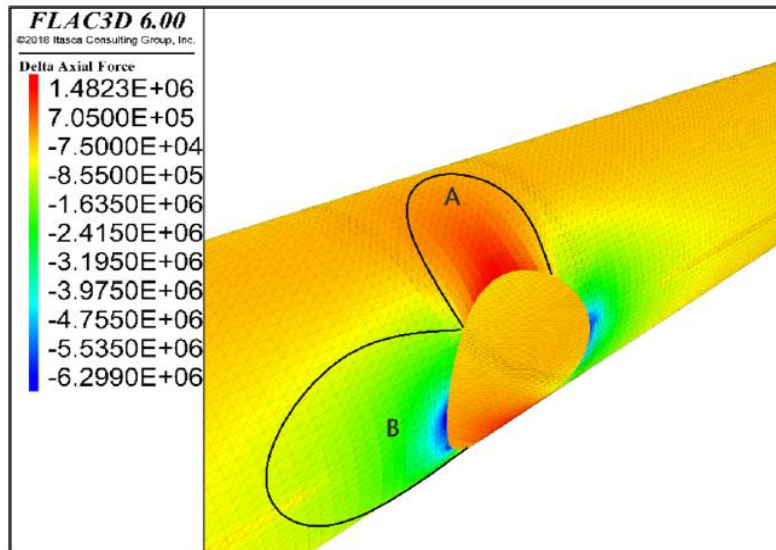
Σε αντίστοιχα συμπεράσματα κατέληξαν και οι Spyridis & Bergmeister (2015) για κάθετη διασταύρωση κυκλικών σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.1.2 Μετατοπίσεις στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Spyridis & Bergmeister, 2015)

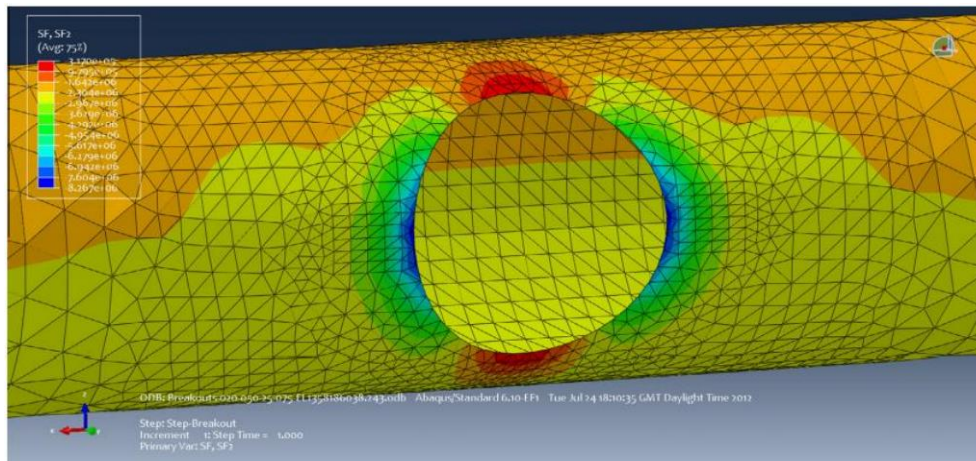
Μετά τη διάνοιξη και την τοποθέτηση συστήματος υποστήριξης στη δευτερεύουσα σήραγγα, οι εφαπτομενικές τάσεις (hoop stresses) στην περιοχή της διασταύρωσης δέχονται έντονη επίδραση σε δύο διακριτές περιοχές όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1.3. Η περιοχή Α, η οποία εντοπίζεται στην επένδυση της κύριας σήραγγας επάνω από τη στέψη της δευτερεύουσας, δέχεται έντονη αποφόρτιση και είναι πιθανή η εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων, ειδικά κατά την εκσκαφή σε δύσκολες συνθήκες υπεδάφους. Ο μηχανισμός δημιουργίας των επιπρόσθετων μετατοπίσεων, που αναλύεται στην προηγούμενη παράγραφο, σταδιακά αποφορτίζει τις εφαπτομενικές θλιπτικές τάσεις στην επένδυση της υπάρχουσας (κύριας) σήραγγας, καθιστώντας έτσι δυνατή την ανάπτυξη των προαναφερθέντων εφελκυστικών τάσεων (Gkikas & Nomikos, 2020).

Αντίστοιχα, η περιοχή Β που καταλαμβάνει τα πλευρικά τοιχώματα (παρειές) της κύριας και της δευτερεύουσας σήραγγας δέχεται έντονη φόρτιση. Οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύχθηκαν εντός της βραχομάζας λόγω της διάνοιξης της κύριας σήραγγας, σε συνδυασμό με τις δημιουργούμενες τάσεις λόγω διάνοιξης της δευτερεύουσας, κάμπτονται προς τις παρειές των διασταυρωμένων σηράγγων και οδηγούν στην ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων και πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτές οι τάσεις με την σειρά τους έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία εφαπτομενικών θλιπτικών τάσεων στην ήδη τοποθετημένη επένδυση της κύριας σήραγγας, αλλά δεν επηρεάζουν την επένδυση της δευτερεύουσας σήραγγας (Gkikas & Nomikos, 2020).



Εικόνα 2.1.3 Μεταβολή των τάσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας σε δύο διακριτές περιοχές A και B, στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής της με την κύρια σήραγγα, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Gkikas & Nomikos, 2020)

Παρόμοια αποτελέσματα έδωσαν αντίστοιχα και οι Spyridis & Bergmeister (2015) για κάθετη διασταύρωση κυκλικών σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1.4. Με θετικές τιμές (πιο θερμό, ερυθρό χρώμα) παρουσιάζονται οι εφελκυστικές τάσεις και με αρνητικές τιμές (πιο ψυχρό, μπλε χρώμα) εμφανίζονται οι θλιπτικές τάσεις.



Εικόνα 2.1.4 Τάσεις κατά την διαμήκη διεύθυνση της κύριας σήραγγας, κυκλικής διατομής, μετά την διάνοιξη δευτερεύουσας σήραγγας (εξίσου κυκλικής διατομής) στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής τους εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Spyridis & Bergmeister, 2015)

Οι παραπάνω αναλύσεις παρουσιάζουν τις τάσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση της κύριας σήραγγας και συνεπώς κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας, στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής τους. Όσον αφορά την ανάλυση της ανακατανομής

των τάσεων περιμετρικά της εγκάρσιας διατομής της κύριας σήραγγας, έχει πραγματοποιηθεί μελέτη από τους Chortis & Kanvadas (2020) σε διασταύρωση μορφής σταυρού, κυκλικών σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου.

Η ανακατανομή των τάσεων στην κύρια σήραγγα, παρουσιάζεται σε ένα μόνο τεταρτημόριο της περιφέρειας του κυκλικού ανοίγματός της ($\theta=0^\circ-90^\circ$), λόγω της συμμετρίας που χαρακτηρίζει τις τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου (υδροστατικό) καθώς και τη γεωμετρία του υπόγειου έργου και τη διατομή της σήραγγας.

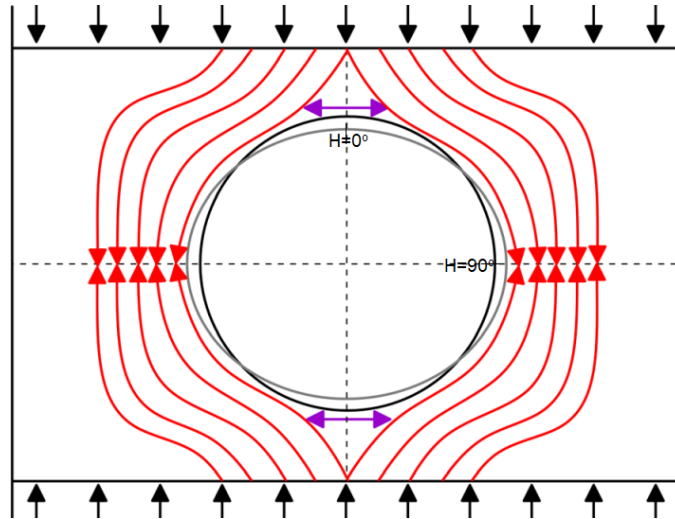
Το τεταρτημόριο λοιπόν, πλησίον της περιοχής της διασταύρωσης, χωρίζεται σε δύο χαρακτηριστικά τμήματα: (1) Από τη στέψη της κύριας σήραγγας ($\theta=0^\circ$) έως το σημείο $\theta=30^\circ$ του πλευρικού της τοιχώματος (Τμήμα 1) και (2) από τον οριζόντιο άξονα της κύριας σήραγγας ($\theta=90^\circ$) έως το προαναφερθέν σημείο $\theta=30^\circ$ (Τμήμα 2).

Στο τμήμα 1, παρατηρείται είτε θλιπτική αποφόρτιση και εφελκυστική φόρτιση είτε ταυτόχρονη θλιπτική και εφελκυστική φόρτιση του τμήματος της εκσκαφής, ανάλογα με τη μέθοδο διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας (κατεύθυνση της εκσκαφής της από ή προς την υπάρχουσα (κύρια) σήραγγα, αντίστοιχα). Όταν η κατεύθυνση διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας έχει ως αφετηρία την κύρια και απομακρύνεται από αυτήν, τότε οι επιπλέον εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται, λόγω της τομής των σηράγγων, είναι εφελκυστικές, υποδεικνύοντας την αποφόρτιση του τμήματος 1. Το ελάχιστο μέγεθος (θλιπτικών ή εφελκυστικών) εφαπτομενικών και ακτινικών τάσεων παρατηρείται στη στέψη της εκσκαφής ($\theta=0^\circ$) (Chortis & Kanvadas 2020).

Στο τμήμα 2, η μεταβολή του εντατικού πεδίου λόγω της διασταύρωσης των σηράγγων έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλου μεγέθους θλιπτικών τάσεων. Οι μέγιστες εφαπτομενικές και ακτινικές θλιπτικές τάσεις παρατηρούνται στον κύριο οριζόντιο άξονα της σήραγγας ($\theta=90^\circ$) και στη διχοτόμο του τεταρτημορίου της εκσκαφής ($\theta=45^\circ$) αντίστοιχα (Chortis & Kanvadas 2020).

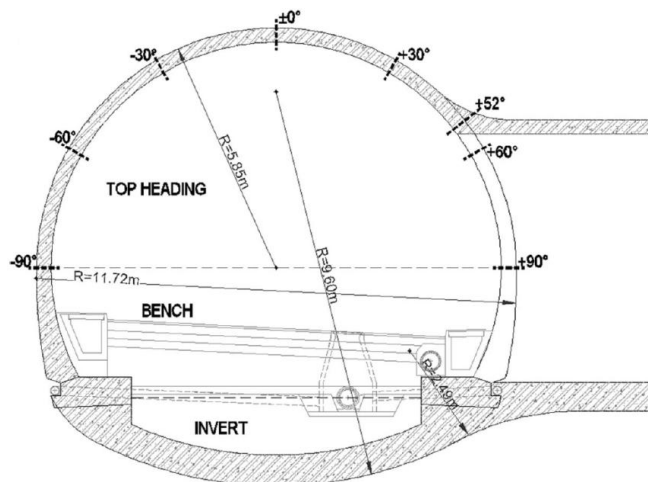
Συμπερασματικά, οι εφαπτομενικές τάσεις εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα της κύριας σήραγγας ($\theta=90^\circ$) όπου χαρακτηρίζονται ως θλιπτικές, ενώ η ελάχιστη τιμή τους παρατηρείται στη στέψη ($\theta=0^\circ$) όπου εμφανίζουν θλιπτικό ή εφελκυστικό χαρακτήρα (Chortis & Kanvadas 2020, Gkikas & Nomikos 2020). Η ανακατανομή αυτή των εφαπτομενικών τάσεων στην περιφέρεια της κύριας σήραγγας λόγω διάνοιξης της δευτερεύουσας απεικονίζεται στο Σχ. 2.1.2. Αντίστοιχα, οι ακτινικές τάσεις αποκτούν την μέγιστη τιμή τους στη διχοτόμο του κεντρικού οριζόντιου άξονα με

τη στέψη της κύριας σήραγγας ($\theta=45^\circ$), ενώ η ελάχιστη τιμή τους εντοπίζεται στην οροφή ($\theta=0^\circ$). Αυτή η κατηγοριοποίηση των τάσεων σε χαρακτηριστικά τμήματα της κυκλικής διατομής της εκσκαφής μπορεί να υιοθετηθεί ως γενικό μοτίβο και είναι ανεξάρτητη από άλλες μεταβλητές παραμέτρους (Chortis & Kavnadas, 2020).



Σχήμα 2.1.2 Ανακατανομή των επαπτομενικών τάσεων περίξ της διατομής της κύριας σήραγγας και η μεταβολή της γεωμετρίας του ανοίγματός της, πλησίον της περιοχής της κάθετης διασταύρωσής της με κυκλική σήραγγα εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (με κόκκινο απεικονίζονται οι θλιπτικές τάσεις, με μωβ οι εφελκυστικές και με μαύρο οι τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου) (Chortis & Kavnadas, 2020)

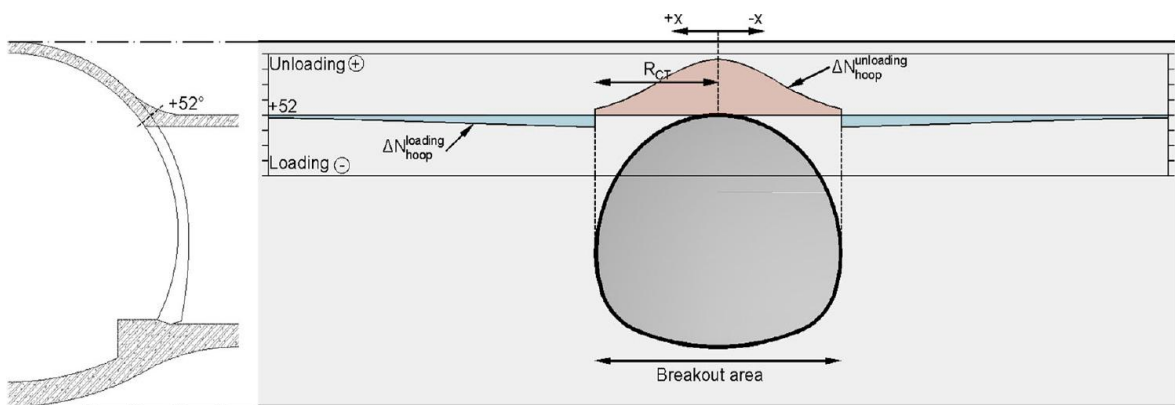
Ανάλυση της ανακατανομής των τάσεων, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, γύρω από την εγκάρσια διατομή της κύριας σήραγγας (όπως περιγράφηκε παραπάνω) έχει πραγματοποιηθεί και από τους Gkikas & Nomikos (2020), όμως για τμήμα της κύριας σήραγγας το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της διασταύρωσής της με την δευτερεύουσα (όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.1.3).



Σχήμα 2.1.3 Εγκάρσια διατομή της κύριας σήραγγας στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσής της με την δευτερεύουσα (Gkikas & Nomikos, 2020)

Στην περιοχή λοιπόν εντός της διασταύρωσης, στο τμήμα μεταξύ της στέψης ($\theta=0^\circ$) της κύριας σήραγγας και του σημείου τομής της παρειάς της με την οροφή της δευτερεύουσας (στην Εικόνα 9 αυτό το σημείο εντοπίζεται στην θέση $\theta=52^\circ$), αναπτύσσονται πρόσθετες εφαπτομενικές τάσεις, λόγω της τομής των δύο σηράγγων, που χαρακτηρίζονται ως εφελκυστικές. Το φαινόμενο αυτό υποδεικνύει την αποφόρτιση του εξεταζόμενου τμήματος. Αντίθετα, υπό συνθήκες επιπρόσθετης φόρτισης τίθεται η περιοχή από $\theta=-90^\circ$ έως $\theta=-30^\circ$, εντός της οποίας αναπτύσσονται πρόσθετες εφαπτομενικές θλιπτικές τάσεις. (Gkikas & Nomikos, 2020)

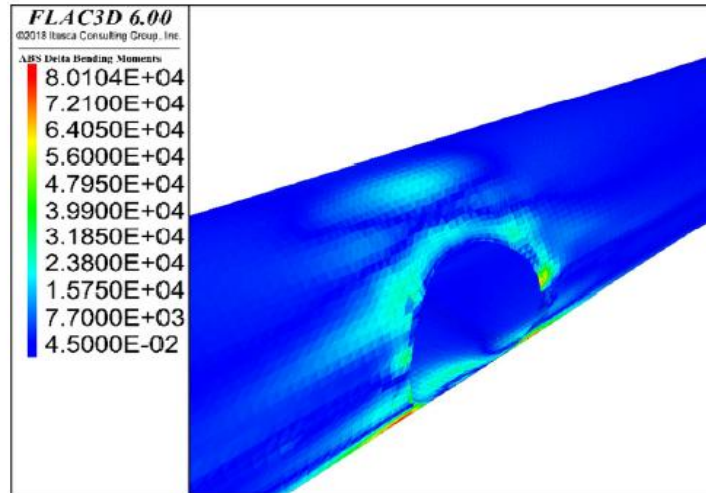
Αντιθέτως, η περιοχή εκτός της εγγύτητας της διασταύρωσης επιβαρύνεται με πρόσθετες θλιπτικές τάσεις. Στην περιοχή αυτή, η κατανομή των πρόσθετων εφαπτομενικών τάσεων (κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας και συνεπώς κατά τη διαμήκη της κύριας), περιγράφεται από μια εξίσωση δύο κλάδων. Ο ένας κλάδος αφορά τη ζώνη αποφόρτισης (ισχύει για $|x| < R_{CT}$, όπου R_{CT} η ακτίνα στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας) και ο άλλος τη ζώνη φόρτισης (ισχύει για $|x| > R_{CT}$) (Gkikas & Nomikos, 2020). Η κατανομή αυτή παρουσιάζεται γραφικά στην εγκάρσια διατομή της δευτερεύουσας σήραγγας στο Σχ. 2.1.4.



Σχήμα 2.1.4 Πρόσθετες εφαπτομενικές τάσεις στην περιοχή εκτός εγγύτητας της διασταύρωσης για το σημείο τομής της παρειάς της κύριας σήραγγας με την στέψη της δευτερεύουσας (Αριστερά: εγκάρσια ημιδιατομή κύριας σήραγγας, Δεξιά: εγκάρσια διατομή δευτερεύουσας σήραγγας) (Gkikas & Nomikos, 2020)

Όσον αφορά τις καμπτικές ροπές, μετά τη διάνοιξη και την τοποθέτηση συστήματος υποστήριξης στη δευτερεύουσα σήραγγα, οι εφαπτομενικές ροπές κάμψης της επένδυσης της κύριας επηρεάζονται σε ολόκληρη την περιοχή της διασταύρωσης. Οι απόλυτες τιμές των πρόσθετων εφαπτομενικών καμπτικών ροπών παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1.5. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στον πυθμένα της κύριας σήραγγας, στην περιοχή της

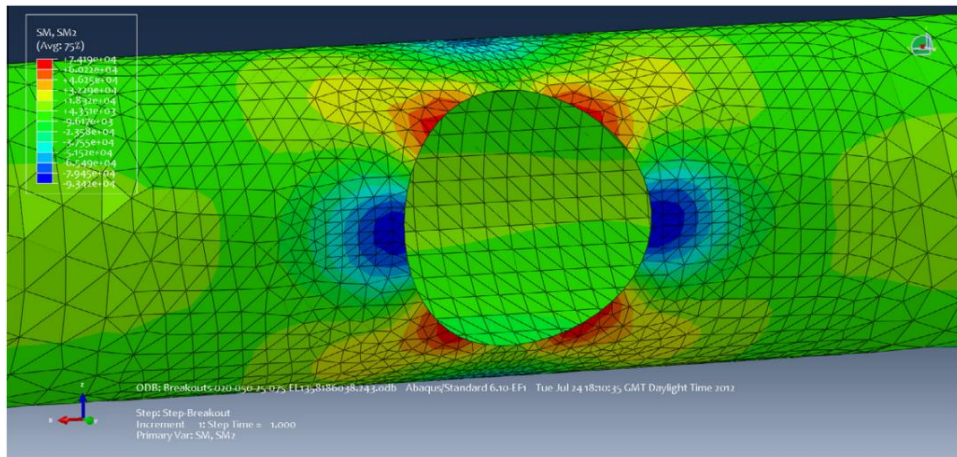
διασταύρωσης, λόγω της αποφόρτισης που προκαλείται στο σημείο αυτό από την διάνοιξη της δευτερεύουσας. Αυτές οι ροπές κάμψης αναπτύσσονται στην ήδη εγκατεστημένη επένδυση της κύριας σήραγγας και δεν επηρεάζουν την επένδυση της δευτερεύουσας καθώς οι καμπτικές ροπές που της ασκούνται στην περιοχή της διασταύρωσης έχουν χαμηλότερες τιμές από τις ροπές που αναπτύσσονται σε τμήματά της σήραγγας πιο μακριά από το σημείο της υπόγειας τομής (Gkikas & Nomikos, 2020).



Εικόνα 2.1.5 Απόλυτες τιμές των πρόσθετων επαπτομενικών καμπτικών ροπών μετά την διάνοιξη της δευτερεύουσας κυκλικής σήραγγας στο σημείο διασταύρωσής της με την κύρια, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Gkikas & Nomikos, 2020)

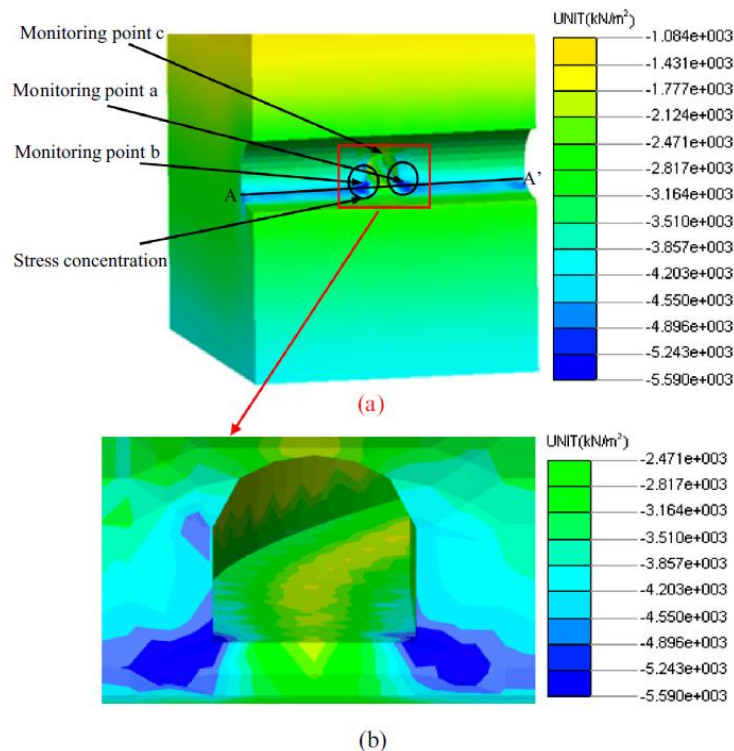
Ωστόσο, η καταγραφή της μέγιστης τιμής των καμπτικών ροπών στο δάπεδο της κύριας σήραγγας είναι εν μέρει ένα αριθμητικό ζήτημα, καθώς το μοντέλο της προσομοίωσης δεν προσδίδει στο μέτρο ελαστικότητας υψηλότερες τιμές, υπό συνθήκες αποφόρτισης. Συνεπώς, προκαλείται μια μη ρεαλιστική ανύψωση του δαπέδου μετά την αφαίρεση του υλικού (συνθήκες αποφόρτισης), δηλαδή μετά την διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας (Gkikas & Nomikos, 2020).

Κατά τους Spyridi & Bergmeister (2015) οι επαπτομενικές καμπτικές ροπές για αντίστοιχη κάθετη διασταύρωση κυκλικών σηράγγων εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου παρουσιάζονται πιο συμμετρικά, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1.6. Παρατηρείται ότι οι ροπές λαμβάνουν θετικές τιμές (δηλαδή είναι εφελκυστικές) δεξιά και αριστερά της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας (διακρίνονται με κόκκινο χρώμα), ενώ έχουν αρνητικές τιμές (θλιπτικές) στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα (διακρίνονται με μπλε απόχρωση).



Εικόνα 2.1.6 Εφαπτομενικές ροπές κάμψης μετά την διάνοιξη της δευτερεύουσας κυκλικής σήραγγας στο σημείο της κάθετης διασταύρωσής της με την ήδη υπάρχουσα (κύρια), εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (Spyridis & Bergmeister, 2015)

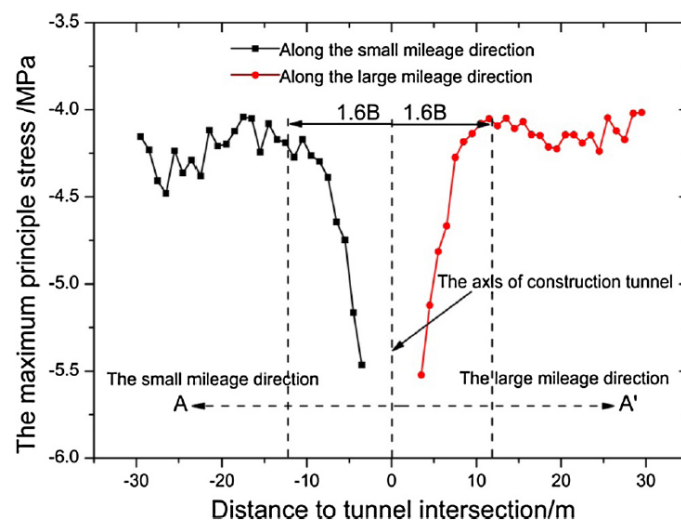
Οι παραπάνω αναλύσεις ανακατανομής των τάσεων στην περιοχή της διασταύρωσης δύο σηράγγων αφορούσαν κυκλικές και σχεδόν κυκλικές διατομές εκσκαφών. Με σκοπό την ανάλυση διαφορετικών σχημάτων διατομής τεμνόμενων σηράγγων, μελετήθηκε η ανακατανομή της μέγιστης κύριας τάσης στην περιοχή όπου διασταυρώνονται η κύρια και η δευτερεύουσα (πεταλοειδούς ανοίγματος) σήραγγα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1.7.



Εικόνα 2.1.7 Κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης κατά τον διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας η οποία τέμνεται από δευτερεύουσα σήραγγα πεταλοειδούς διατομής: (α) Διαμήκη τομή της κύριας σήραγγας, (β) Μεγέθυνση της εγκάρσιας διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας στο σημείο της διασταύρωσης (Li et al. 2016)

Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων (stress concentration) βρίσκεται στην περιοχή της διασταύρωσης των σηράγγων και συγκεκριμένα στις γωνίες του δαπέδου της εκσκαφής (σημεία a και b στο Σχ. 2.1.7 (a)). Αυτό συμβαίνει καθώς η γεωμετρία της όρυξης στα σημεία αυτά δεν είναι ομαλή όπως το τοξοειδές σχήμα της στέψης της σήραγγας και ως αποτέλεσμα οι τάσεις δεν εκτρέπονται (φαινόμενο που παρατηρείται σε κυκλική διατομή εκσκαφής όπως εξετάστηκε παραπάνω) αλλά αντιθέτως ευνοείται η συσσώρευσή τους στις γωνίες του δαπέδου. Οι τιμές της τάσης στα δύο σημεία αναφοράς (a και b) είναι σχεδόν ίσες καθώς οι θέσεις τους είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα της σήραγγας (Li et al. 2016).

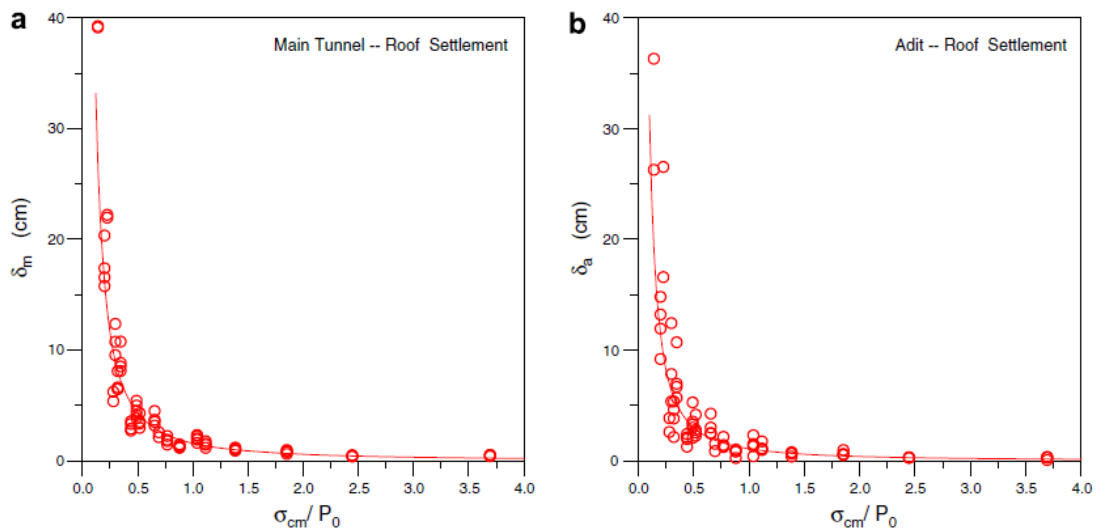
Τέλος, στο Σχ. 2.1.5 καταγράφεται η διακύμανση της μέγιστης κύριας τάσης κατά μήκος του διαμήκη άξονα A-A' της κύριας σήραγγας (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3). Είναι εμφανές ότι η επιβαλλόμενη τάση αυξάνεται καθώς η απόσταση από το σημείο τομής των σηράγγων μειώνεται και λαμβάνει την μέγιστη τιμή της εντός της περιοχής διασταύρωσής τους. Η ζώνη επιρροής της κατανομής των τάσεων που δημιουργείται εξαιτίας της τομής των υπόγειων εκσκαφών εντοπίζεται για απόσταση $1.6B$ (όπου B είναι η διάμετρος της δευτερεύουσας σήραγγας) από το κέντρο της διασταύρωσης (Li et al. 2016). Το γεγονός ότι η υπολογιζόμενη τάση δεξιά και αριστερά της διασταύρωσης δεν είναι πανομοιότυπη οφείλεται στην επίδραση των διακυμάνσεων στο πάχος των υπερκείμενων πετρωμάτων της περιοχής μελέτης των Li et al. (2016).



Σχήμα 2.1.5 Διακύμανση της μέγιστης κύριας τάσης κατά μήκος του διαμήκη άξονα A-A' της κύριας σήραγγας (Li et al. 2016)

2.2 Μετατοπίσεις εντός της ζώνης επιρροής της διασταύρωσης

Η προκαλούμενη ανακατανομή των τάσεων του εντατικού πεδίου λόγω της όρυξης μίας υπόγειας διασταύρωσης σηράγγων (όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα) έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας ασταθούς ζώνης ή αλλιώς ζώνης επιρροής της διασταύρωσης, εντός της οποίας παρατηρούνται μετατοπίσεις και παραμορφώσεις της βραχομάζας. Για ένα δεδομένο εντατικό πεδίο, η ζώνη αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή της διασταύρωσης. Συγκεκριμένα, διασταυρώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν μικρότερο αριθμό τεμνόμενων σηράγγων έχουν και μικρότερο εύρος ζώνης επιρροής, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 3. Επίσης, έντονη επίδραση στο μέγεθος της ζώνης έχουν η γεωμετρία των επιμέρους τεμνόμενων σηράγγων καθώς και ο σχετικός προσανατολισμός τους (Gercek, 1986). Αντίθετα, για ένα μη δεδομένο εντατικό πεδίο, η παραμόρφωση της υπόγειας εκσκαφής μεταβάλλεται σύμφωνα με το λόγο της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής της βραχομάζας (σ_{cm}) ως προς τις γεωστατικές τάσεις (strength/stress ratio (σ_{cm}/P_0)). Η κατακόρυφη μετατόπιση της οροφής στο τμήμα της υπόγειας διασταύρωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου σ_{cm}/P_0 , όπως καταγράφεται στο Σχ. 2.2.1. Συγκεκριμένα, η μετατόπιση αυτή αυξάνεται απότομα για τιμές του λόγου σ_{cm}/P_0 μικρότερες από 0.5 (Hsiao et al. 2008).



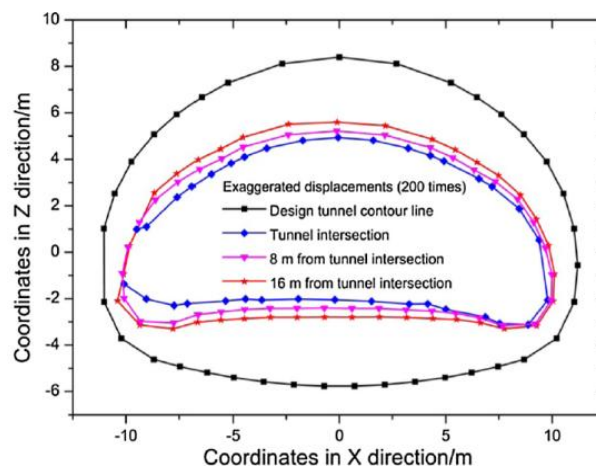
Σχήμα 2.2.1 Συσχέτιση της κατακόρυφης μετατόπισης της οροφής και του λόγου σ_{cm}/P_0 της περιβάλλουσας βραχομάζας μίας περιοχής διασταύρωσης σηράγγων: (a) Κατακόρυφη μετατόπιση της οροφής της κύριας σήραγγας, (b) Κατακόρυφη μετατόπιση οροφής της δευτερεύουσας σήραγγας (Hsiao et al. 2008)

Το εύρος λοιπόν της ζώνης επιρροής, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών οι οποίοι έχουν καταλήξει σε διαφορετικά συμπεράσματα για την έκτασή της. Πιο συγκεκριμένα, κατά τους Li et al. (2016), όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μέγεθος της ζώνης ορίζεται ίσο με $2.4B$ ή $1.6B$ (όπου B είναι η διάμετρος της δευτερεύουσας σήραγγας η οποία τέμνει την ήδη υπάρχουσα κύρια), θεωρώντας ως μέγεθος αναφοράς είτε την προκαλούμενη παραμόρφωση είτε την τάση αντίστοιχα. Οι Chortis και Kanvadas (2020) υπολόγισαν ότι το εύρος της ζώνης ισούται με δύο διαμέτρους ($2D$) της κύριας σήραγγας, ξεκινώντας από το κέντρο της διασταύρωσης, και εξασθενεί σε απόσταση όπου η διακύμανση των τάσεων μειώνεται σε αμελητέα επίπεδα. Αντίθετα, οι Spyridis και Bergmeister (2015) ισχυρίζονται ότι η έκταση της ζώνης είναι μία διάμετρος ($1d$) της δευτερεύουσας σήραγγας από τη διασταύρωση, ενώ οι Liu et al. (2009) κατέληξαν στο ότι ισούται με 2.5 διαμέτρους της κύριας σήραγγας ($2.5D$) από το σημείο τομής των σηράγγων. Οι αποκλίσεις αυτές για το μέγεθος της ζώνης επιρροής οφείλονται στις διαφορετικές παραδοχές ή τεχνικές αριθμητικής μοντελοποίησης που χρησιμοποίησε κάθε μελετητής. Για παράδειγμα, οι Spyridis και Bergmeister (2015) διεξήγαγαν ελαστικές αριθμητικές αναλύσεις για διασταύρωση ρηγών σηράγγων και προσομοίωσαν την κατασκευή της κύριας σήραγγας σε ένα μόνο βήμα χωρίς να λάβουν υπόψη την αποφόρτιση της βραχομάζας μοντελοποιώντας μόνο τη διάνοιξη του υπόγειου έργου. Αντίστοιχα, οι Liu et al. (2009) εφάρμοσαν ελαστοπλαστικές αριθμητικές αναλύσεις, υποθέτοντας μια βήμα προς βήμα μέθοδο διάνοιξης, για τη μελέτη μη κυκλικών διασταυρούμενων σηράγγων μικρού βάθους, όπου το φαινόμενο εκτροπής των τάσεων περιμετρικά του υπόγειου ανοίγματος δεν αναπτύσσεται πλήρως εντός του μοντελοποιημένου περιβάλλοντος γεωυλικού.

Γενικά, η προκαλούμενη παραμόρφωση της βραχομάζας η οποία βρίσκεται πλησίον μιας διασταύρωσης σηράγγων είναι αισθητά εντονότερη σε σύγκριση με τις παραμορφώσεις που παρατηρούνται σε πιο απομακρυσμένα τμήματα. Συνεπώς, οι μετατοπίσεις του πετρώματος το οποίο περιβάλλει το υπόγειο έργο αυξάνονται με τη μείωση της απόστασης από την περιοχή της διασταύρωσης, στην οροφή της οποίας λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους. Η μέγιστη αυτή τιμή είναι κατά 28% υψηλότερη από τις τιμές των μετατοπίσεων που παρατηρούνται στη στέψη των επιμέρους σηράγγων μακριά από το σημείο τομής τους (Li et al. 2016). Αντίστοιχα, το εύρος της πλαστικής ζώνης είναι σημαντικά μεγαλύτερο εντός της περιοχής της διασταύρωσης όπου λόγω της αμφίδρομης αποφόρτισης της βραχομάζας (προκαλούμενη από τη διάνοιξη τόσο της δευτερεύουσας

όσο και της κύριας σήραγγας) κατανέμεται μη συμμετρικά κυρίως στα πλευρικά τοιχώματα και την στέψη της υπόγειας εκσκαφής. Συνεπώς, η βραχομάζα καθίσταται πιο επιρρεπής σε καταπονήσεις εντός του τμήματος της τομής των σηράγγων (Li et al. 2016 και Liu et al. 2017).

Πιο αναλυτικά, για την ορθότερη διερεύνηση της κατανομής της παραμόρφωσης γύρω από την υπόγεια διασταύρωση πραγματοποιήθηκε μελέτη από τους Li et al. (2016). Συγκεκριμένα, διεξήχθη ανάλυση των μετατοπίσεων περιμετρικά της εγκάρσιας διατομής της κύριας σήραγγας, οι οποίες αυξήθηκαν κατά 200 φορές (exaggerated displacements) ώστε να είναι περισσότερο ευδιάκριτες προς ανάλυση. Το Σχ. 2.2.2 παρουσιάζει το εγκάρσιο άνοιγμα της σήραγγας και το πώς αυτό έχει παραμορφωθεί (κατά 200 φορές περισσότερο) πλησίον της περιοχής της διασταύρωσης, οχτώ και δεκαέξι μέτρα πιο μακριά από αυτήν. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η παραμόρφωση και στα τρία εξεταζόμενα τμήματα ήταν παρόμοια. Λόγω της διάνοιξης της εκσκαφής και συνεπώς δημιουργίας κενού χώρου, προκαλείται αποφόρτιση της περιβάλλουσας βραχομάζας, η οποία μετατοπίζεται προς το δημιουργούμενο άνοιγμα του υπόγειου έργου. Είναι εμφανές ότι η παραμόρφωση της κύριας σήραγγας είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής της από τη δευτερεύουσα (δηλαδή της απόστασής της από το σημείο τομής τους). Συνεπώς, οι μετατοπίσεις στη διασταύρωση των σηράγγων είναι μεγαλύτερες από εκείνες που καταγράφονται οχτώ μέτρα μακριά από αυτή και ομοίως, οι μετατοπίσεις στο τμήμα των οχτώ μέτρων από τη διασταύρωση είναι μεγαλύτερες από εκείνες σε απόσταση δεκαέξι μέτρων. Αυτό υποδεικνύει ότι τα τμήματα τα οποία βρίσκονται κοντά στη διασταύρωση των σηράγγων επηρεάζονται περισσότερο από εκείνα τα οποία εντοπίζονται σε μεγάλη απόσταση από αυτήν (Li et al. 2016).



Σχήμα 2.2.2 Υπεραυξημένες μετατοπίσεις (exaggerated displacements) της κύριας σήραγγας σε τρία διαφορετικά τμήματα της εγκάρσιας διατομής της (με μαύρο απεικονίζεται η κανονική διατομή δίχως μετατοπίσεις, με μπλε το παραμορφωμένο τμήμα στο σημείο της διασταύρωσης και με πορτοκαλί και κόκκινο τα τμήματα για 8m και 16m αντίστοιχα από την περιοχή της διασταύρωσης) (Li et al. 2016).

Η παραπάνω ανάλυση αφορούσε την προκαλούμενη παραμόρφωση, λόγω της κατασκευής της υπόγειας διασταύρωσης, στην εγκάρσια διατομή της κύριας σήραγγας. Όσον αφορά τη διερεύνηση της παραμόρφωσης στην εγκάρσια διατομή της δευτερεύουσας, μελετήθηκαν οι πρόσθετες μετατοπίσεις κατά τον εγκάρσιο άξονά της, σε θέσεις όπου το μέτωπό της τέμνεται από το πλευρικό τοίχωμα της κύριας σήραγγας (δύο τέτοιες θέσεις αντιστοιχούν στις γωνίες $\theta=60^\circ$ και $\theta=90^\circ$, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.2.3). Η κατανομή των πρόσθετων μετατοπίσεων, εντός του υδροστατικού εντατικού πεδίου (για κάθε γωνία θ), μπορεί να εκφραστεί με μια γκαουσιανή κατανομή (Gkikas & Nomikos, 2020):

$$\Delta u_{MT}(x) = \Delta u_{MT}(\xi) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{2L_{MT}^u}}^2$$

όπου x είναι η πλευρική απόσταση από τον κεντρικό άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας ($x=0$), $\Delta u_{MT}(x)$ η πρόσθετη μετατόπιση, $\Delta u_{MT}(\xi)$ η μέγιστη επιπρόσθετη μετατόπιση στην περιοχή της διασταύρωσης που εμφανίζεται σε πλευρική απόσταση $x=\xi$ από τον κεντρικό άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας και L_{MT}^u η απόσταση από το σημείο $x=\xi$ έως το σημείο καμπής της γκαουσιανής κατανομής.

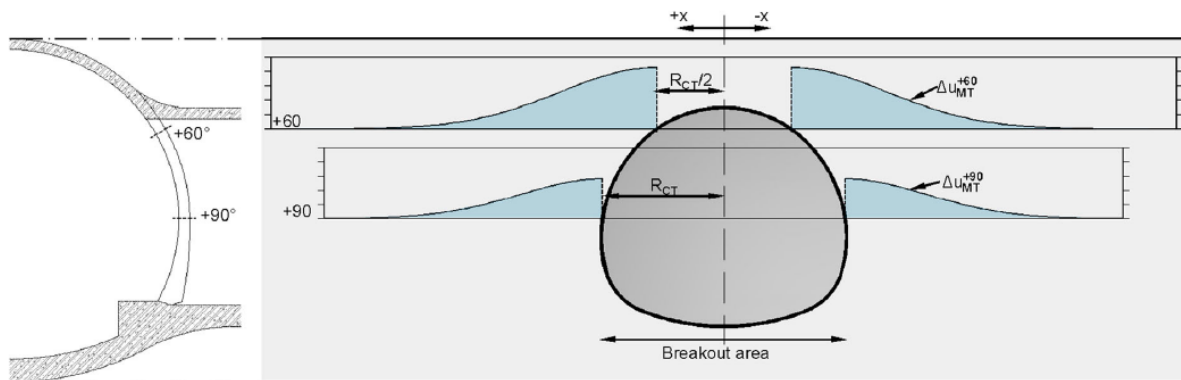


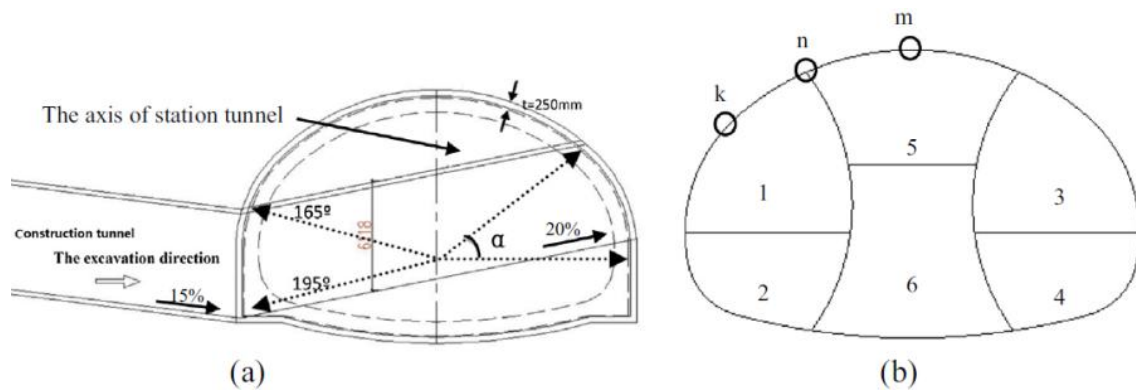
Fig. 6 Schematic representation of the additional displacements distribution for $\theta = 60^\circ$ and $\theta = 90^\circ$

Σχήμα 2.2.3 Κατανομή πρόσθετων μετατοπίσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας σε σημεία του μετώπου της τα οποία τέμνονται από το πλευρικό τοίχωμα της κύριας ($\theta=60^\circ$ και $\theta=90^\circ$) (Αριστερά: εγκάρσια ημιδιατομή κύριας σήραγγας, Δεξιά: εγκάρσια διατομή δευτερεύουσας σήραγγας) (Gkikas & Nomikos, 2020)

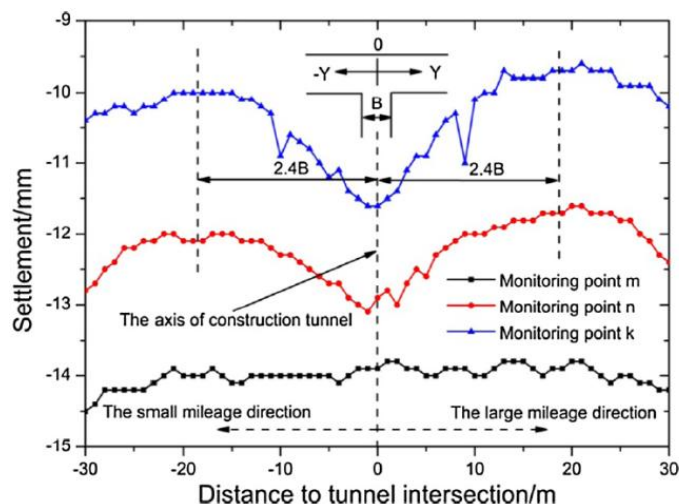
Σύμφωνα με τη μέθοδο υπολογισμού των πρόσθετων μετατοπίσεων με τη χρήση της γκαουσιανής κατανομής, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η μεγαλύτερη παραμόρφωση κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας εντοπίζεται στη στέψη της. Συγκεκριμένα, εντοπίζεται στο σημείο τομής της στέψης της με το πλευρικό τοίχωμα της

κύριας σήραγγας στο σημείο της διασταύρωσης (θέση $\theta=52^\circ$ Εικόνας 9). Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των 3D αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Εικόνα 2.1.1 και 2.1.2) τα οποία αναφέρουν αντίστοιχα ότι το τμήμα που δέχεται τη σημαντικότερη επίδραση, και συνεπώς τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις, εντοπίζεται στο ύψος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας.

Τέλος, αναφορικά με τις πρόσθετες μετατοπίσεις που δημιουργούνται κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας, παρουσιάζεται στο Σχ. 2.2.5 το διάγραμμα μεταβολής της κατακόρυφης μετατόπισης της οροφής της κύριας σήραγγας, κατά τη διαμήκη διεύθυνσή της. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μελέτη σε τρία σημεία της στέψης της (τα σημεία k, n και m, όπως απεικονίζονται στο Σχ. 2.2.4).



Σχήμα 2.2.4 (α) Εγκάρσια διατομή της κύριας σήραγγας στο σημείο διασταύρωσής της με την δευτερεύουσα, (β) Σημεία στη στέψη της κύριας σήραγγας για τα οποία πραγματοποιήθηκε μελέτη καθιζήσεων κατά την διαμήκη διεύθυνσή της (Li et al. 2016)



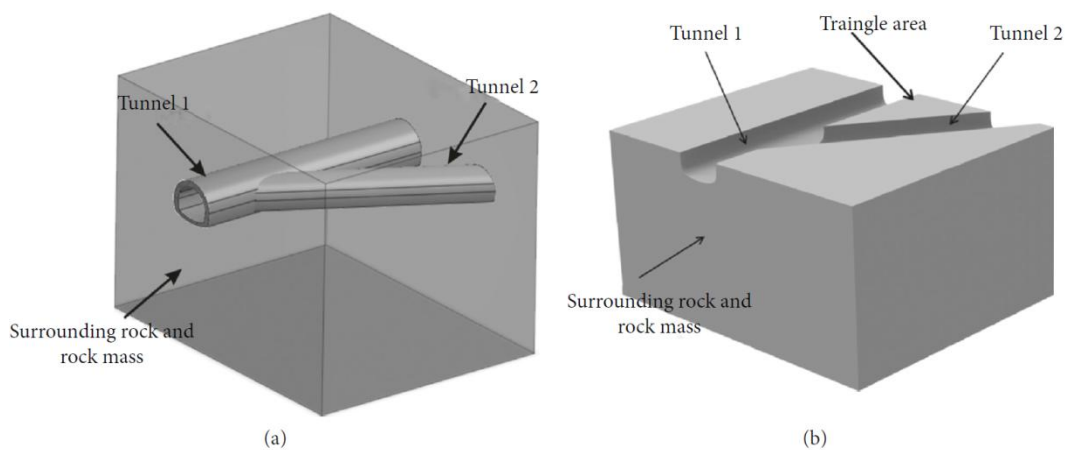
Σχήμα 2.2.5 Καμπύλες μεταβολής των καθιζήσεων στα σημεία k, n και m στην οροφή της κύριας σήραγγας, κατά τον διαμήκη άξονά της (με μπλε χρώμα απεικονίζεται η μεταβολή των καθιζήσεων στο σημείο k, με κόκκινο στο σημείο n και με μαύρο χρώμα στο σημείο m) (Li et al. 2016)

Οι διακυμάνσεις των καθιζήσεων στα σημεία n και k είναι παρόμοιες. Και οι δύο λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους στο σημείο της διασταύρωσης και μετά σταδιακά μειώνονται με την αύξηση της απόστασης από αυτήν (Hsiao et al. 2008, Li et al. 2016). Συγκεκριμένα, η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο k , εντός της περιοχής της διασταύρωσης, αυξήθηκε κατά 28% συγκριτικά με τις καθιζήσεις που καταγράφονται σε τμήματα της κύριας σήραγγας τα οποία βρίσκονται σε απόσταση $2.4B$ (όπου B είναι η διάμετρος της δευτερεύουσας σήραγγας) από το σημείο τομής των σηράγγων (απόσταση δηλαδή ίση με την έκταση της ζώνης επιρροής της διασταύρωσης, σύμφωνα με τους Li et al. 2016). Αντίθετα, η καμπύλη μεταβολής των καθιζήσεων στο σημείο m της οροφής της κύριας σήραγγας ήταν σχεδόν επίπεδη, που σημαίνει ότι το σημείο αυτό επηρεάστηκε ελάχιστα από την κατασκευή της διασταύρωσης. Η αύξηση που παρατηρείται στις καθιζήσεις για απόσταση μεγαλύτερη από $2.4B$ (δηλαδή μεγαλύτερη από την έκταση της ζώνης επιρροής), οφείλεται στο αυξημένο πάχος των υπερκείμενων πετρωμάτων που συναντάται σε αυτές τις αποστάσεις σε σύγκριση με την περιοχή της διασταύρωσης (Li et al. 2016).

2.3 Γωνία διασταύρωσης των σηράγγων

Ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει τόσο την κατανομή των τάσεων όσο και τις προκαλούμενες παραμορφώσεις, στην περιοχή μιας υπόγειας διασταύρωσης σηράγγων, είναι η γωνία τομής τους.

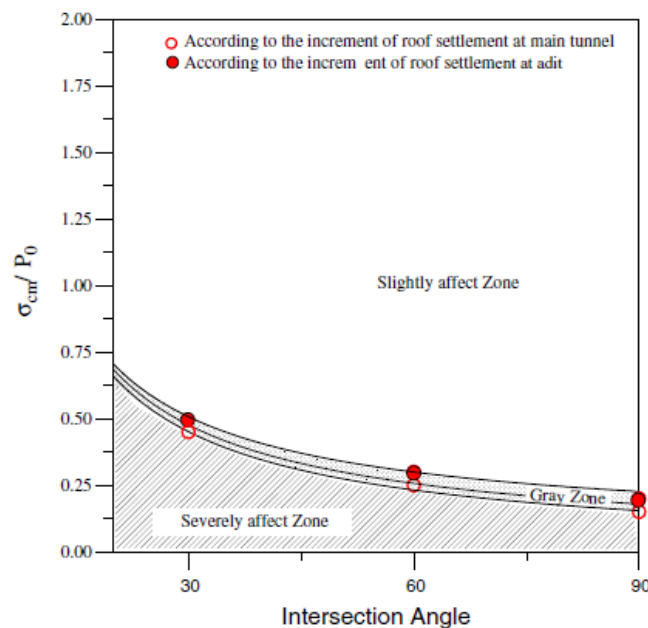
Όταν πραγματοποιηθεί η διασταύρωση της δευτερεύουσας σήραγγας με την κύρια, υπό οξεία ή αμβλεία γωνία, τότε η συγκέντρωση των τάσεων στην περιβάλλουσα βραχομάζα καθίσταται εντονότερη εντός του δημιουργούμενου τριγωνικού τμήματος (triangle area, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.3.1). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση της ευστάθειας του περιβάλλοντος πετρώματος και συνεπώς της υπόγειας διασταύρωσης. Αντίθετα, όσο η γωνία τομής των σηράγγων μεταβάλλεται σταδιακά σε κάθετη (90°), η περιβάλλουσα βραχομάζα αντίστοιχα γίνεται βαθμιαία πιο σταθερή (Liu et al. 2020). Συνεπώς, για διασταυρώσεις της μορφής Y και X (οξεία γωνία τομής των σηράγγων) η ζώνη επιρροής της διασταύρωσης αυξάνεται σημαντικά ενώ για διασταυρώσεις της μορφής T και + (κάθετη γωνία τομής των σηράγγων) η ζώνη επιρροής εξαλείφεται σε μικρή απόσταση από το κέντρο της διασταύρωσης (για ελαστική βραχομάζα) (Gercek, 1986).



Σχήμα 2.3.1 (α) Σχηματική απεικόνιση της υπόγειας διασταύρωσης της κύριας σήραγγας (Tunnel 1) με την δευτερεύουσα (Tunnel 2) υπό οξεία γωνία, (β) Απεικόνιση του δημιουργούμενου τριγωνικού τμήματος (triangle area) λόγω της διασταύρωσης των σηράγγων (Liu et al. 2020)

Πιο αναλυτικά, οι Hsiao et al. (2008) κατασκεύασαν ένα διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο αξιολογείται το κατά πόσο μία περιοχή, κοντά σε μια διασταύρωση σηράγγων, επηρεάζεται από τη γωνία τομής τους, για διάφορες τιμές του λόγου σ_{cm}/P_0 (όπου σ_{cm} η μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας σε θλίψη και P_0 οι γεωστατικές τάσεις). Το

διάγραμμα αυτό (Σχ. 2.3.2) απεικονίζει μία καμπύλη γραμμή η οποία οριοθετεί τις έντονα επηρεασμένες περιοχές, λόγω της διασταύρωσης των σηράγγων υπό συγκεκριμένες γωνίες, από τις περιοχές που δέχονται αμυδρή επιρροή. Συνεπώς, το γράφημα αυτό παρέχει ένα κριτήριο αξιολόγησης της πιθανής επίδρασης που μπορεί να προκαλέσει η διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας, ανάλογα με τη γωνία τομής της με την κύρια. Στη σκιασμένη περιοχή του Σχ. 2.3.2, η επίδραση της διασταύρωσης αναμένεται να είναι δυσχερής, ενώ πάνω από τη σκιασμένη περιοχή, δεν αναμένονται σοβαρές επιπτώσεις (Hsiao et al. 2008).

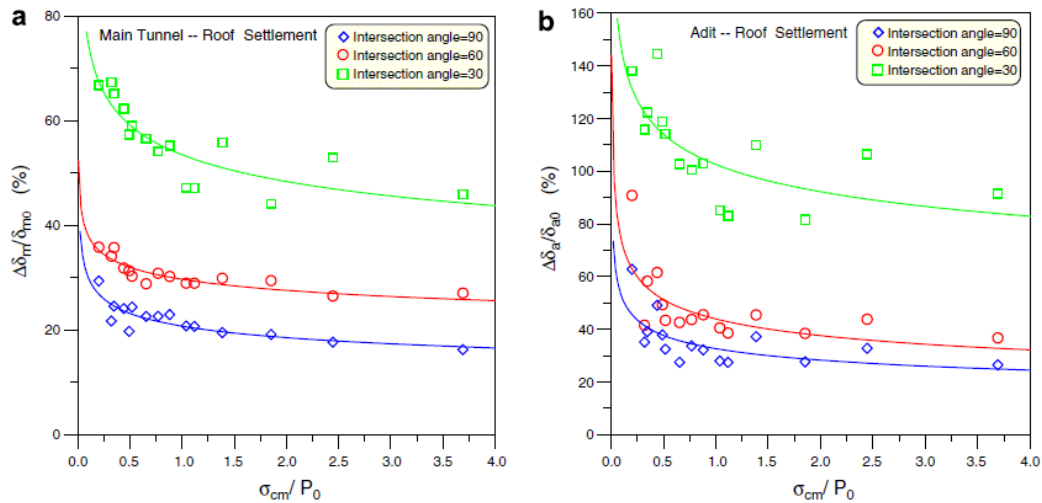


Σχήμα 2.3.2 Διάγραμμα αξιολόγησης της επίδρασης που έχει η γωνία τομής των σηράγγων στην ευστάθεια της υπόγειας διασταύρωσής τους (Hsiao et al. 2008)

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι η ασφαλέστερη γωνία διασταύρωσης σηράγγων είναι αυτή των 90° , συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν πολλοί ερευνητές όπως οι Gercek (1986), Li et al. (2015), Gharouni-Nik & Farmahini Farahani (2016) και οι Liu et al. (2020). Αντίθετα, για πιο οξείες γωνίες τομής, συνίσταται η κατασκευή της υπόγειας διασταύρωσης να πραγματοποιηθεί εντός βραχομάζας με καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά ($\sigma_{cm}/P_0 > 0.25$) ώστε να αποφευχθούν αρνητικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του υπόγειου έργου (Hsiao et al. 2008).

Για την εκτίμηση της επίδρασης που έχει η γωνία τομής των σηράγγων στην παραμόρφωσή τους, αναλύεται η σχέση των πρόσθετων καθιζήσεων της οροφής, τόσο της κύριας ($\Delta\delta_m/\delta_{m0}$) όσο και της δευτερεύουσας σήραγγας ($\Delta\delta_a/\delta_{a0}$), με τη γωνία διασταύρωσης. Η σχέση αυτή απεικονίζεται στα διαγράμματα του Σχ. 2.3.3, όπου $\Delta\delta_m$

είναι η επιπρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης της κύριας σήραγγας λόγω διάνοιξης της δευτερεύουσας, δ_{m0} είναι η κατακόρυφη μετατόπιση της οροφής της κύριας σήραγγας η οποία προκλήθηκε από την εκσκαφή της, $\Delta\delta_a$ συμβολίζει την πρόσθετη μετατόπιση της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας στην περιοχή της διασταύρωσης και δ_{a0} αποτελεί την μετατόπιση της οροφής της δευτερεύουσας σήραγγας μακριά από το σημείο τομής των σηράγγων.

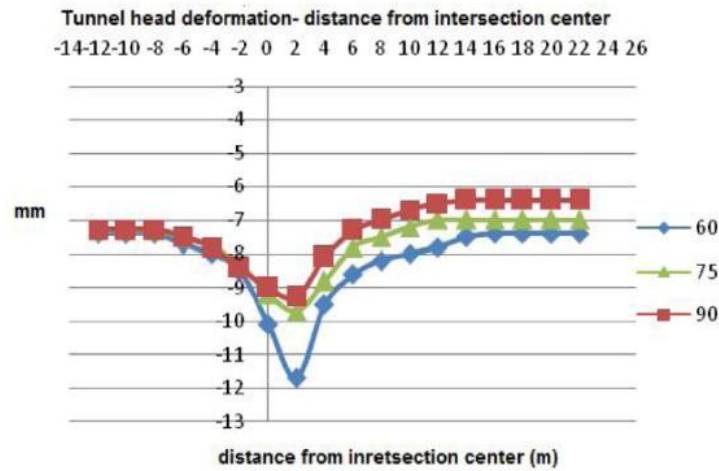


Σχήμα 2.3.3 Σχέση μεταξύ της πρόσθετης κατακόρυφης μετατόπισης της οροφής των σηράγγων και της γωνίας διασταύρωσής τους: (α) Επιπρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης της κύριας σήραγγας, (β) Επιπρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας (Hsiao et al. 2008)

Διακρίνεται από τα διαγράμματα ότι η πρόσθετη κατακόρυφη μετατόπιση της οροφής στην περίπτωση της διασταύρωσης των σηράγγων υπό γωνία 30° είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την περίπτωση των 60° και 90° (Hsiao et al. 2008). Επομένως, το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι όσο μικρότερη είναι η γωνία διασταύρωσης των σηράγγων, τόσο εντονότερα επηρεάζεται η περιβάλλουσα βραχομάζα και συνεπώς υποβάλλεται σε δυσμενέστερες παραμορφώσεις.

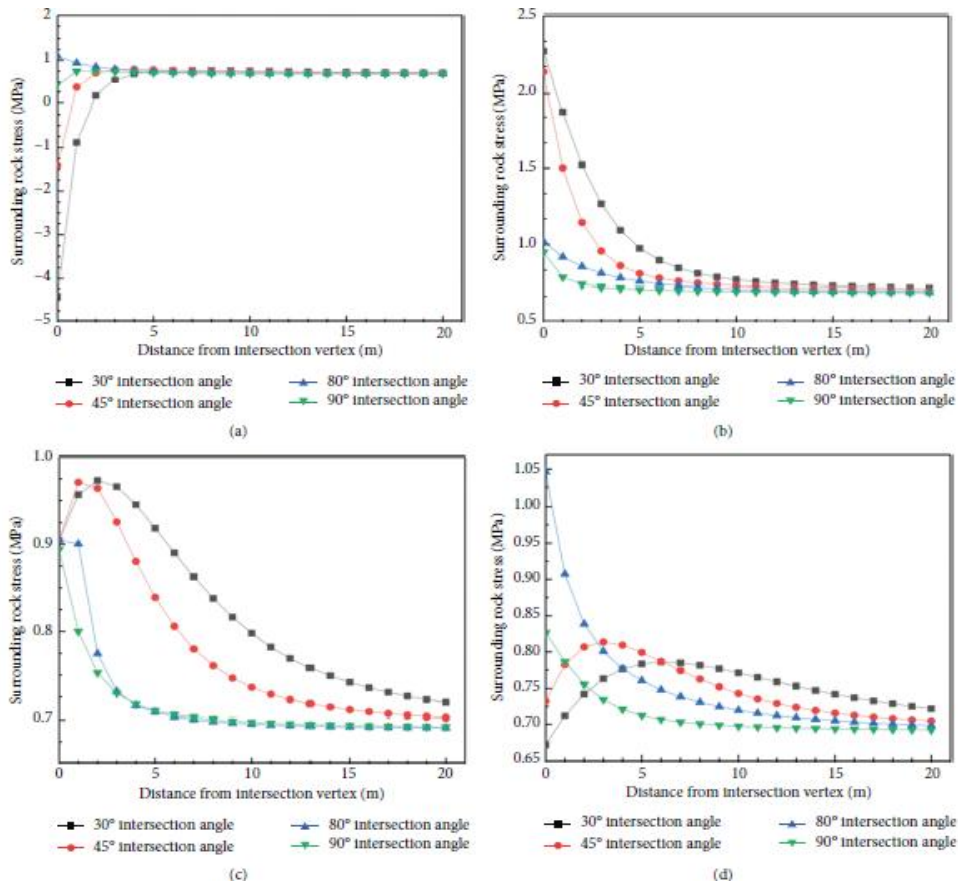
Σε αντίστοιχα αποτελέσματα κατέληξαν και οι Gharouni-Nik & Farmahini Farahani (2016) οι οποίοι μελέτησαν τις προκαλούμενες παραμορφώσεις οροφής, για γωνίες τομής των σηράγγων ίσες με 60° , 75° και 90° , συγκριτικά με την απόσταση από το κέντρο του σημείου διασταύρωσης. Οι μεταβολές των παραμορφώσεων για τις τρεις διαφορετικές γωνίες τομής, όπως απεικονίζονται στο Σχ. 2.3.4, υποδεικνύουν αντίστοιχα ότι οι μικρότερες γωνίες διασταύρωσης των σηράγγων είναι και οι πιο δυσχερείς. Επίσης, οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων, και για τις τρεις περιπτώσεις, εντοπίζονται στην

περιοχή της υπόγειας διασταύρωσης, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις μελέτες του προηγούμενου υποκεφαλαίου.

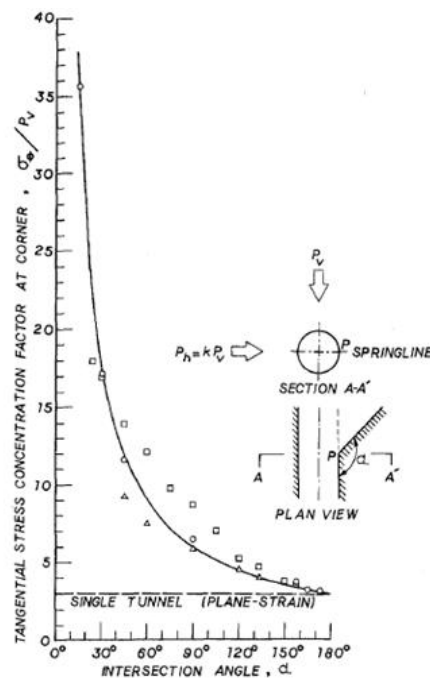


Σχήμα 2.3.4 Παραμορφώσεις της στέψης, για γωνίες τομής των σηράγγων 60° (μπλε χρώμα), 75° (πράσινο χρώμα) και 90° (κόκκινο χρώμα), συγκριτικά με την απόσταση από το κέντρο του σημείου διασταύρωσής τους (Gharouni-Nik & Farmahini Farahani, 2016)

Τέλος, αναφορικά με την επίδραση της γωνίας διασταύρωσης των σηράγγων στο εντατικό πεδίο, είναι εμφανές από το Σχ. 2.3.5 ότι η συγκέντρωση των τάσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας στο δημιουργούμενο τριγωνικό τμήμα (triangle area), μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της γωνίας διασταύρωσης (δηλαδή οι τάσεις που ασκούνται στην περιβάλλουσα βραχομάζα τείνουν να ισοσταθμιστούν με τις αρχικές τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου). Οι πιο δυσμενείς και επικίνδυνες περιπτώσεις είναι της διασταύρωσης υπό μικρές γωνίες ($<30^\circ$), κατά τις οποίες αναπτύσσονται κυρίως εφελκυστικές τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα (Liu et al. 2020). Η συγκέντρωση αυτή των εφελκυστικών τάσεων γίνεται εντονότερη στο ύψος του κεντρικού οριζώντιου άξονα (springline) της διασταύρωσης και είναι αντιστρόφως ανάλογη της γωνίας τομής των σηράγγων, όπως διακρίνεται και στο Σχ. 2.3.6 (Gercek, 1986). Με την αύξηση της γωνίας διασταύρωσης, ο ρυθμός μεταβολής των τάσεων που τείνουν να γίνουν ίσες με τις τάσεις του αρχικού εντατικού πεδίου, αυξάνεται, γεγονός που υποδηλώνει ότι η περιβάλλουσα βραχομάζα καθίσταται ασφαλέστερη για την ευστάθεια του υπόγειου έργου. Συνεπώς, όταν η γωνία τομής οριστεί ως 90° τότε το εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται θεωρείται ως το πιο ευνοϊκό και ασφαλές (Liu et al. 2020). Η μεταβολή των τάσεων συγκριτικά με την απόσταση από το σημείο της διασταύρωσης πραγματοποιείται συναρτήσει του μεγέθους της διατομής των δύο τεμνόμενων σηράγγων, η επίδραση του οποίου θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.



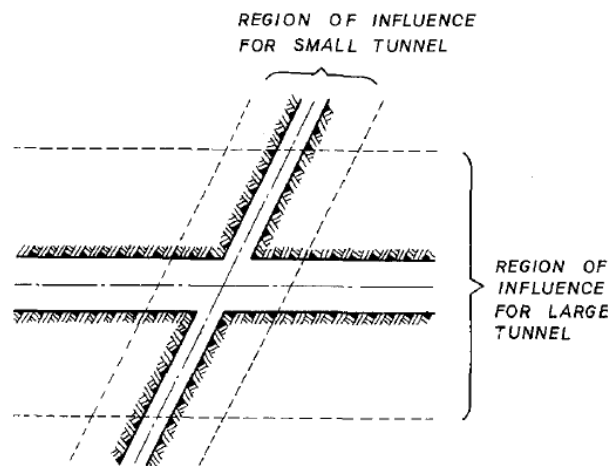
Σχήμα 2.3.5 Μεταβολή των τάσεων της περιβάλλουσας βραχομάζας σε σχέση με την απόσταση από το σημείο της διασταύρωσης, για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις μεγέθους της διατομής του σημείου διασταύρωσης: (a) Διατομή ίση με μία διάμετρο τεμνόμενης σήραγγας, (b) Διατομή ίση με δύο διαμέτρους τεμνόμενης σήραγγας, (c) Διατομή ίση με τρεις διαμέτρους τεμνόμενης σήραγγας, (d) Διατομή ίση με τέσσερις διαμέτρους τεμνόμενης σήραγγας (Liu et al. 2020).



Σχήμα 2.3.6 Υπολογισμός του λόγου συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων στην γωνία τομής δύο κυκλικών σηράγγων στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα, (σημείο P), σε σχέση με την γωνία διασταύρωσης, όπου P_v η κατακόρυφη τάση του εντατικού πεδίου και P_h η πλευρική (Gercek, 1986)

2.4 Μέγεθος των τεμνόμενων σηράγγων

Ένας άλλος ζωτικός παράγοντας στην κατασκευή μιας υπόγειας διασταύρωσης σηράγγων είναι το μέγεθος της διατομής των επιμέρους τεμνόμενων εκσκαφών. Όταν δύο σήραγγες, ίδιου σχήματος αλλά διαφορετικού μεγέθους, διασταυρωθούν, τότε η σήραγγα με τη μεγαλύτερη διάμετρο θα έχει και την εντονότερη επίδραση στις τάσεις που ασκούνται στην περιβάλλουσα βραχομάζα (Gercek, 1986).



Σχήμα 2.4.1 Επίδραση του μεγέθους της σήραγγας στην έκταση της ζώνης επιρροής της (region of influence). Είναι εμφανές ότι η ζώνη επιρροής της σήραγγας με την μεγαλύτερη διατομή (LARGE TUNNEL) είναι εντονότερη από αυτήν που δημιουργεί η σήραγγα με την μικρότερη διατομή (SMALL TUNNEL) (Gercek, 1986)

Συγκεκριμένα, η αύξηση της διαμέτρου των τεμνόμενων σηράγγων προκαλεί την αύξηση των μέγιστων εφαπτομενικών και ακτινικών θλιπτικών τάσεων. Οι ελάχιστες (θλιπτικές ή εφελκυστικές) ακτινικές τάσεις δεν επηρεάζονται από το μέγεθος της διατομής των σηράγγων. Αντίθετα, οι ελάχιστες εφαπτομενικές τάσεις δέχονται έντονη επιρροή και μεταβάλλονται από θλιπτικές σε εφελκυστικές ανάλογα με τη μέθοδο διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας (δηλαδή ανάλογα με την κατεύθυνση της εκσκαφής της από ή προς την ήδη υπάρχουσα, κύρια σήραγγα). Συγκεκριμένα, αυξάνοντας τη διάμετρο της δευτερεύουσας σήραγγας προκαλείται είτε μείωση των εφελκυστικών τάσεων είτε ακόμη και η πλήρης αποφυγή από το να αναπτυχθούν (Chortis & Kanvadas, 2020). Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των διαμέτρων των τεμνόμενων σηράγγων τόσο αυξάνεται και η ζώνη επίδρασης της περιοχής διασταύρωσής τους (Liu et al. 2020). Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η περίπτωση διασταύρωσης σηράγγων με διατομή ίδιου μεγέθους.

2.5 Συντελεστής πλευρικών ωθήσεων

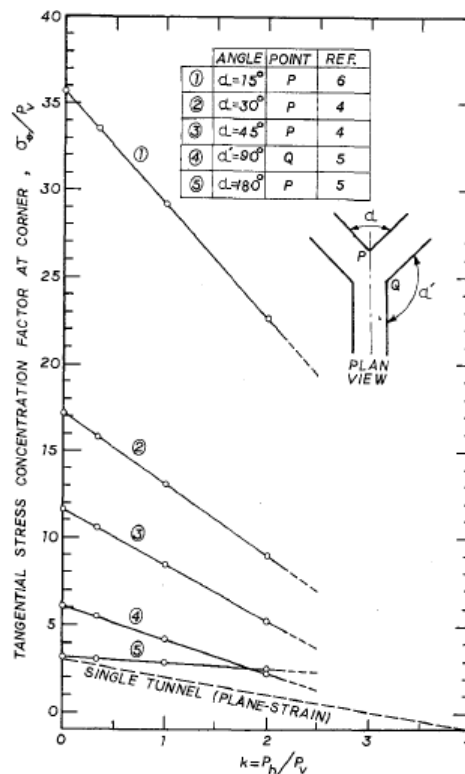
Ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων (K_o) επηρεάζει το μέγεθος των μέγιστων εφαπτομενικών και ακτινικών τάσεων. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερη είναι η φόρτιση που δέχεται το σύστημα υποστήριξης της υπόγειας εκσκαφής. Όσον αφορά τις ελάχιστες εφαπτομενικές και ακτινικές τάσεις, οι υψηλές τιμές του K_o μειώνουν ή αποτρέπουν πλήρως την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων (Chortis and Kanvadas, 2020).

Πιο αναλυτικά, σε κάθετη διασταύρωση κυκλικών σηράγγων (η οποία αποτελεί την περίπτωση προς εξέταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας) οι εφαπτομενικές τάσεις μεταβάλλονται από έναν συνδυασμό θλιπτικών και εφελκυστικών σε αποκλειστικά θλιπτικές, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων. Συγκεκριμένα, η αύξηση του K_o συμβάλει στη μείωση των εφελκυστικών τάσεων στην οροφή, δημιουργώντας ένα θλιπτικό εντατικό πεδίο περιμετρικά της υπόγειας διασταύρωσης (Chortis and Kanvadas, 2020). Στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα, ο συντελεστής συγκέντρωσης των εφαπτομενικών τάσεων στη γωνία της διασταύρωσης (δηλαδή η εφαπτομενική τάση επί του κεντρικού οριζόντιου άξονα στο σημείο της γωνίας τομής των σηράγγων σ_o (σημεία P και Q στο Σχήμα 17) ως προς την κατακόρυφη τάση του φυσικού εντατικού πεδίου P_v) μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ($K_o = P_h/P_v$). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στο Σχ. 2.5.1 το οποίο παρουσιάζει τα αποτελέσματα για διασταύρωση κυκλικών σηράγγων ίδιας διατομής (Gercek, 1986). Κατά τη διαμήκη διεύθυνση της κύριας σήραγγας, το εντατικό πεδίο στη στέψη και στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονά της δεν επηρεάζεται από το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων (Chortis and Kanvadas, 2020).

Η παραπάνω ανάλυση της επιρροής του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων από τους Chortis & Kanvadas (2020) αφορούσε την περίπτωση κάθετης διασταύρωσης σηράγγων, κυκλικής διατομής, όπου η δευτερεύουσα σήραγγα διανοίγεται με κατεύθυνση προς την κύρια, ήδη υπάρχουσα, σήραγγα. Στην περίπτωση όπου η κατεύθυνση διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας είναι αντίθετη (δηλαδή με αφετηρία από την κύρια σήραγγα), τότε, κατά την εγκάρσια διεύθυνση, οι πρόσθετες θλιπτικές τάσεις στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα είναι ανεξάρτητες από τον K_o , ενώ οι εφελκυστικές τάσεις στην οροφή της διασταύρωσης είναι αντιστρόφως ανάλογες με το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων (Chortis and Kanvadas, 2020).

Γενικά, η αύξηση του K_0 προκαλεί στην περιφέρεια της κύριας σήραγγας την ανάπτυξη τάσεων μεγαλύτερου μεγέθους. Συγκεκριμένα, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας, οι ακτινικές τάσεις στην οροφή και στον κεντρικό οριζόντιο άξονα δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων. Αντίθετα, στο τμήμα $\theta=30^\circ-60^\circ$ της διατομής της κύριας σήραγγας, η αύξηση του K_0 σηματοδοτεί αντίστοιχα την αύξηση των ακτινικών τάσεων οι οποίες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους. Κατά την εγκάρσια διεύθυνση της κύριας σήραγγας, οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τον κεντρικό οριζόντιο άξονα της είναι ανάλογες του K_0 , ενώ στην οροφή, το μέγεθος και το είδος των ασκούμενων τάσεων (θλιπτικές ή εφελκυστικές) καθορίζονται από το συνδυασμό του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων με την κατεύθυνση διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας ως προς την κύρια (Chortis and Kanvadas, 2020).

Συνεπώς, γίνεται εμφανές ότι η μέθοδος κατασκευής της τομής των σηράγγων (δηλαδή η κατεύθυνση με την οποία θα διανοιχθεί η δευτερεύουσα σήραγγα ως προς την κύρια) αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση του δευτερογενούς εντατικού πεδίου που δημιουργείται λόγω του υπόγειου έργου και θα εξεταστεί παρακάτω.

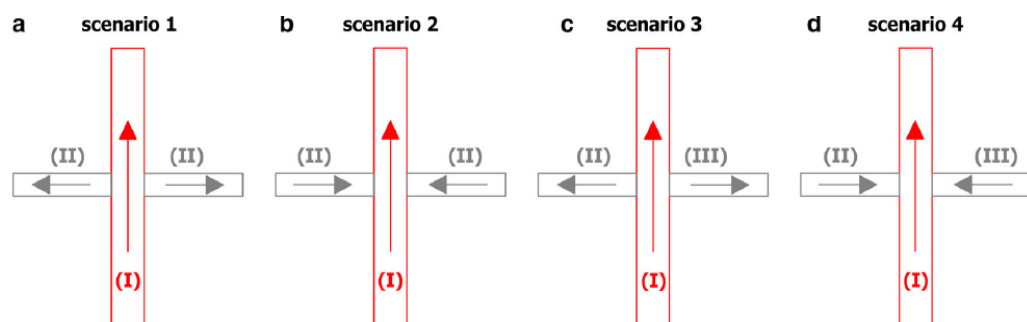


Σχήμα 2.5.1 Γραμμική μεταβολή του συντελεστή συγκέντρωσης των εφαπτομενικών τάσεων κατά τον κεντρικό οριζόντιο άξονα στην γωνία διασταύρωσης των σηράγγων (σημεία P και Q) για διάφορες τιμές του K_0 (Gercek, 1986)

2.6 Κατεύθυνση διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας

Η κατεύθυνση διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας ως προς την κύρια αποτελεί μια ακόμη κρίσιμη παράμετρο για το εντατικό πεδίο που δημιουργείται στην περιοχή της υπόγειας διασταύρωσης. Διερεύνηση αυτής της παραμέτρου πραγματοποιήθηκε από τους Chortis & Kavnadas (2020) για τέσσερα εναλλακτικά σενάρια κάθετης τομής κυκλικών σηράγγων (περίπτωση η οποία θα μελετηθεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία). Τα σενάρια, όπως παρουσιάζονται και στο Σχ. 2.6.1, είναι τα εξής:

- Σενάριο 1: Ταυτόχρονη εκσκαφή τόσο του δεξιού όσο και του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας με διάνοιξη που ξεκινάει από την κύρια σήραγγα και απομακρύνεται από αυτήν.
- Σενάριο 2: Ταυτόχρονη εκσκαφή τόσο του δεξιού όσο και του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας με κατεύθυνση διάνοιξης προς την κύρια σήραγγα.
- Σενάριο 3: Εκσκαφή του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας με διάνοιξη που ξεκινάει από την κύρια σήραγγα και απομακρύνεται από αυτήν και αντίστοιχη διαδικασία στην συνέχεια για το δεξί τμήμα της δευτερεύουσας σήραγγας.
- Σενάριο 4: Εκσκαφή του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας με κατεύθυνση διάνοιξης προς την κύρια σήραγγα και αντίστοιχη διαδικασία στην συνέχεια για το δεξί τμήμα της δευτερεύουσας σήραγγας.



Σχήμα 2.6.1 Τέσσερα εναλλακτικά σενάρια κάθετης διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων ως προς την κατεύθυνση και την σειρά διάνοιξης των δύο τμημάτων (δεξιού και αριστερού) της δευτερεύουσας σήραγγας. Τα βέλη προσδιορίζουν την κατεύθυνση της διάνοιξης, η κύρια και η δευτερεύουσα σήραγγα απεικονίζονται με κόκκινο και με γκρι χρώμα αντίστοιχα, ενώ οι λατινικοί αριθμοί ορίζουν την σειρά με την οποία πραγματοποιούνται οι διανοίξεις (Chortis & Kavnadas, 2020)

Τα τέσσερα προαναφερθέντα σενάρια διερευνούν διασταύρωση σηράγγων μορφής σταυρού “+”. Ωστόσο, η μη ταυτόχρονη διάνοιξη των δύο τμημάτων της δευτερεύουσας σήραγγας (σενάριο 3 και 4) επιτρέπει την προσομοίωση και τη μελέτη υπόγειας τομής σηράγγων της μορφής “T”, η οποία αποτελεί και μορφή προς ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Γενικά, το εντατικό πεδίο, που δημιουργείται στην περιοχή της διασταύρωσης, όταν η δευτερεύουσα σήραγγα διανοίγεται με κατεύθυνση προς την κύρια, χαρακτηρίζεται ως λιγότερο δυσμενές σε σύγκριση με το εντατικό πεδίο που διαμορφώνεται από την περίπτωση διάνοιξης με αντίθετη κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση, αναπτύσσονται υψηλότερες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις, ενώ στη δεύτερη, οι τιμές των θλιπτικών τάσεων είναι χαμηλότερες και των εφελκυστικών ορίζονται ως πρακτικά αμελητέες (Chortis & Kavvadas, 2020).

Συγκεκριμένα, για το σενάριο 3, η διάνοιξη αρχικά του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας αυξάνει τις εφαπτομενικές θλιπτικές τάσεις στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα της εγκάρσιας διατομής της (στην περιοχή διασταύρωσής της με την κύρια σήραγγα) και αντίθετα τις μειώνει, σε σχεδόν μηδενικά επίπεδα, στο τμήμα της οροφής (Chortis & Kavvadas, 2020). Αντίστοιχα αποτελέσματα αναφέρουν και οι Spyridis & Bergmeister (2015) και Gkikas & Nomikos (2020) (βλ. υποκεφάλαιο 2.1). Πιο αναλυτικά, κατά τη διάνοιξη του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας αυξάνονται οι θλιπτικές τάσεις στον κεντρικό οριζόντιο άξονα, όπου και σταθεροποιούνται με την ολοκλήρωση της εκσκαφής, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στην οροφή. Στη συνέχεια, η διάνοιξη του δεξιού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας αυξάνει ελαφρώς τις θλιπτικές τάσεις κατά τον κεντρικό οριζόντιο άξονά της, ενώ δεν επηρεάζει τις εφελκυστικές τάσεις της οροφής (Chortis & Kavvadas, 2020).

Για το σενάριο 4, οι εντατικές συνθήκες καθίστανται πιο ευνοϊκές καθώς στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα της εγκάρσιας διατομής της δευτερεύουσας σήραγγας οι εφαπτομενικές θλιπτικές τάσεις λαμβάνουν χαμηλότερες τιμές από ότι οι αντίστοιχες του σεναρίου 3. Στην οροφή, οι εφαπτομενικές τάσεις αναπτύσσουν τόσο θλιπτικό όσο και εφελκυστικό χαρακτήρα, σε σύγκριση με τον αποκλειστικά εφελκυστικό που παρατηρείται στο σενάριο 3. Πιο αναλυτικά, η διάνοιξη αρχικά του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας προκαλεί την αύξηση των θλιπτικών τάσεων κατά τον κεντρικό οριζόντιο άξονα της εγκάρσιας διατομής της. Η αύξηση αυτή εξαρτάται από την απόσταση

από το σημείο διασταύρωσής της με την κύρια σήραγγα όπου και εντοπίζεται η μέγιστη τιμή. Όσον αφορά την οροφή της εκσκαφής, κατά τη διάνοιξη του αριστερού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας, οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται υποβάλλονται σε θλιπτικές και εφελκυστικές διακυμάνσεις οι οποίες όμως σταθεροποιούνται στο σημείο της διασταύρωσης. Η μετέπειτα διάνοιξη του δεξιού τμήματος της δευτερεύουσας σήραγγας οδηγεί σε ελαφριά αύξηση του μεγέθους των θλιπτικών τάσεων επί του κεντρικού οριζόντιου άξονα αλλά δεν επηρεάζει τις τιμές των εφελκυστικών τάσεων στην οροφή (Chortis & Kavvadas, 2020).

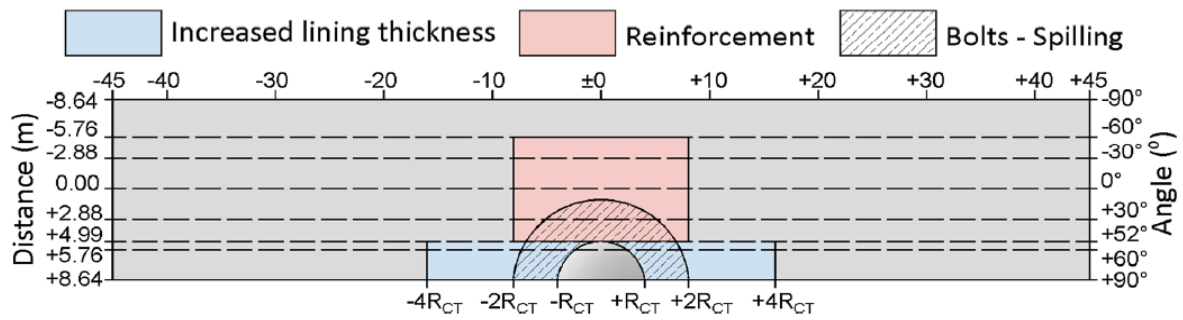
Συνεπώς, αναπτύσσονται δύο εντατικές καταστάσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας στην περιοχή διασταύρωσής της με την κύρια. Η πρώτη εντοπίζεται στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα της εγκάρσιας διατομής της, όπου παρατηρείται πρόσθετη καταπόνηση και ως αποτέλεσμα ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων, ανεξαρτήτως σεναρίου διάνοιξης. Η δεύτερη, βρίσκεται στην περιοχή της στέψης, και με βάση το εφαρμοζόμενο σενάριο διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας, είτε προκαλείται αποφόρτιση η οποία ευνοεί την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων (σενάριο 3), είτε διαμορφώνεται μια κατάσταση φόρτισης (αρχικά) και αποφόρτισης (εν συνεχεία) η οποία αποδίδει τόσο θλιπτικό όσο και εφελκυστικό χαρακτήρα στις δημιουργούμενες τάσεις οι οποίες λαμβάνουν αμελητέες τιμές (σενάριο 4) (Chortis & Kavvadas, 2020).

Παραπάνω μελετήθηκαν οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας ανάλογα με την κατεύθυνση διάνοιξης της ως προς την κύρια. Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διαμήκη διεύθυνση, το μέγεθός τους είναι μικρότερο (κατά απόλυτη τιμή) από αυτό των εφαπτομενικών τάσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα, ενώ είναι σχεδόν ίσο στο τμήμα της οροφής. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το σενάριο 3, όπως παρατηρείται και για τις εφαπτομενικές τάσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση, έτσι και για τις τάσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση, διακρίνεται ο θλιπτικός τους χαρακτήρας στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα και ο εφελκυστικός τους στο ύψος της στέψης. Αντίστοιχα για το σενάριο 4, οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διαμήκη διεύθυνση, στο ύψος του κεντρικού οριζόντιου άξονα, χαρακτηρίζονται ως θλιπτικές, ενώ στο ύψος της οροφής παρουσιάζουν εναλλαγές μεταξύ εφελκυσμού και θλίψης, όπως αντίστοιχα παρατηρείται και για τις τάσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δευτερεύουσας σήραγγας (Chortis & Kavvadas, 2020).

2.7 Υποστήριξη της περιοχής διασταύρωσης των σηράγγων

Κρίσιμο ζήτημα για την ευστάθεια μιας υπόγειας διασταύρωσης σηράγγων αποτελεί ο σχεδιασμός της απαιτούμενης υποστήριξής της. Για την αποτελεσματική επίτευξή του πρέπει να εξεταστούν δύο παράγοντες: (1) το είδος του εφαρμοζόμενου συστήματος υποστήριξης και (2) η έκταση εντός της οποίας θα πρέπει να τοποθετηθεί.

(1) Όσον αφορά το σύστημα υποστήριξης, πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του σύμφωνα με την ανάλυση της ανακατανομής των τάσεων που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.1. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της διασταύρωσης, το τμήμα πάνω από το σημείο τομής της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας με την παρειά της κύριας (βλ. περιοχή Α, Εικόνας 2.1.3) δέχεται έντονη αποφόρτιση και συνεπώς την επίδραση εφελκυστικών τάσεων. Στο τμήμα αυτό προτείνεται, από τους Gkikas & Nomikos (2020), η ενίσχυση της επένδυσης με μεταλλικό πλέγμα ή/και μεταλλικούς δοκούς ώστε να αποφευχθούν αστοχίες λόγω εφελκυσμού. Στο Σχ. 2.7.1 παρουσιάζεται με ροζ χρώμα το εύρος αυτού του τμήματος, που μπορεί να εκτείνεται έως και δύο διαμέτρους της δευτερεύουσας σήραγγας ($2R_{CT}$). Η περιοχή στα πλευρικά τοιχώματα της κύριας και της δευτερεύουσας σήραγγας (βλ. περιοχή Β, Εικόνα 2.1.3) υποβάλλεται σε έντονη φόρτιση και ως αποτέλεσμα αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις. Στην περιοχή αυτή προτείνεται η αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή η τοποθέτηση διευρυμένου πέλματος (elephant's foot), όταν εμφανιστεί ανάγκη, ώστε να αποφευχθούν αστοχίες της επένδυσης σε θλίψη. Στο Σχ. 2.7.1 παρουσιάζεται με μπλε χρώμα το εύρος αυτής της περιοχής, που μπορεί να εκτείνεται έως και τέσσερις διαμέτρους της δευτερεύουσας σήραγγας ($4R_{CT}$). Τέλος, σε βραχομάζες όπου παρατηρούνται ασυνέχειες, ευνοείται η έκθεση ασταθών τεμάχων ή/και σφηνών πετρώματος κατά την διάνοιξη της υπόγειας διασταύρωσης αυξάνοντας τις πιθανότητες δομικής αστάθειάς της. Συνεπώς, προτείνεται η τοποθέτηση πρόσθετων ηλώσεων, δοκών και μεταλλικού πλέγματος για την συγκράτηση επιρρεπών τεμάχων της βραχομάζας. Η περιοχή αυτή της πρόσθετης υποστήριξης για βραχομάζες με έντονη παρουσία ασυνεχειών απεικονίζεται στο Σχ. 2.7.1 με γκρι διακεκομμένο μοτίβο (Gkikas & Nomikos, 2020).

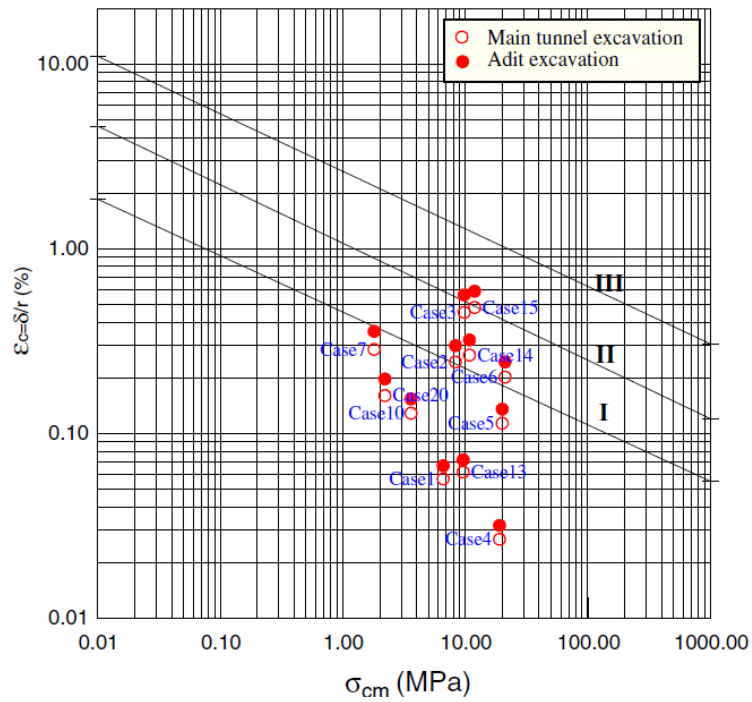


Σχήμα 2.7.1 Μέτρα υποστήριξης των διαφόρων τμημάτων της περιοχής κάθετης διασταύρωσης σηράγγων (Gkikas & Nomikos, 2020)

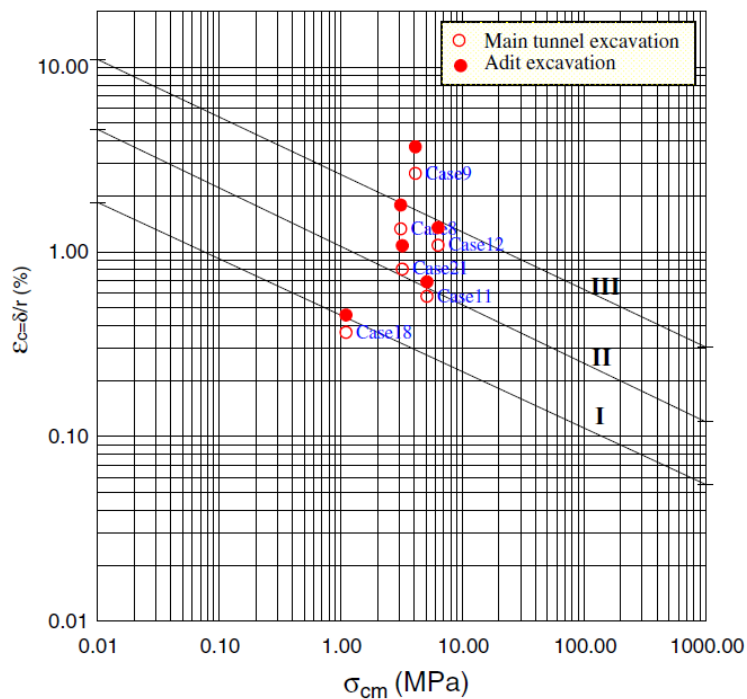
Μετά τον προσδιορισμό των απαιτούμενων μέτρων υποστήριξης, σημαντικό βήμα αποτελεί η εκτίμηση του βαθμού ενίσχυσής τους στην περιοχή της υπόγειας διασταύρωσης, καθώς οι επιβαλλόμενες τάσεις και καταπονήσεις στην τελική επένδυση αυξάνονται κατά έναν παράγοντα ίσο με 1.5 σε σύγκριση με τις τάσεις που ασκούνται στις επιμέρους τεμνόμενες σήραγγες εκτός της περιοχής διασταύρωσής τους (Pottler, 1992).

Οι Hsiao et al. (2008), για τον σκοπό αυτό, δημιούργησαν τρία επίπεδα επικινδυνότητας για την ευστάθεια της υπόγειας διασταύρωσης (I, II και III) με βάση την προκαλούμενη παραμόρφωση στη στέψη των τεμνόμενων σηράγγων (ϵ_c) και τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή της βραχομάζας (σ_{cm}). Όταν η μετρούμενη παραμόρφωση της στέψης σε συνδυασμό με τη μονοαξονική αντοχή της βραχομάζας σε θλίψη αντιστοιχούν σε επίπεδο χαμηλότερο από το επίπεδο II, τότε η εκσκαφή παραμένει σταθερή, χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων αστάθειας. Αντίθετα, όταν ο συνδυασμός των ϵ_c και σ_{cm} ξεπεράσει το επίπεδο III, ενδέχεται να παρουσιαστούν φαινόμενα σύγκλισης του υπόγειου ανοίγματος. Η περιοχή μεταξύ των επιπέδων II και III αποτελεί μια ζώνη μετάβασης. Εντός αυτής, ορισμένα τμήματα του υπόγειου έργου είναι σταθερά ενώ άλλα παρουσιάζουν προβλήματα αστοχίας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η περίπτωση κάθετης διασταύρωσης σηράγγων για διαφορετικά είδη βραχομάζας και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχ. 2.7.2 - 2.7.4.

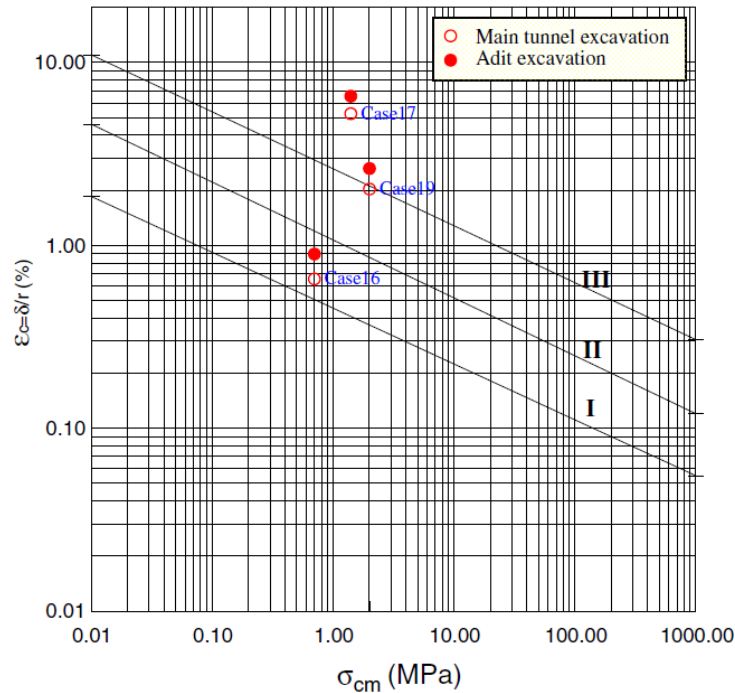
Παρατηρείται ότι οι κάθετες διασταυρώσεις σηράγγων οι οποίες διανοίγονται εντός βραχομάζας με λόγο $\sigma_{cm}/P_o \geq 0.5$ (Σχ. 2.7.2) (όπου σ_{cm} η αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη και P_o η γεωστατική τάση), χαρακτηρίζονται ως ευσταθείς δίχως έντονα προβλήματα μετατοπίσεων και παραμορφώσεων. Όσον αφορά διασταυρώσεις εντός βραχομάζας με λόγο $0.25 \leq \sigma_{cm}/P_o \leq 0.5$ (Σχ. 2.7.3) ή $\sigma_{cm}/P_o \leq 0.5$ (Σχ. 2.7.4), παρατηρούνται τόσο δυσμενείς όσο και ευνοϊκές περιπτώσεις για την σταθερότητά τους.



Σχήμα 2.7.2 Εκτίμηση ευστάθειας κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός βραχομάζας με λόγο $\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$ (Hsiao et al. 2008)



Σχήμα 2.7.3 Εκτίμηση ευστάθειας κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός βραχομάζας με λόγο $0.25 \leq \sigma_{cm}/P_0 \leq 0.5$ (Hsiao et al. 2008)



Σχήμα 2.7.4 Εκτίμηση ευστάθειας κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός βραχομάζας με λόγο $\sigma_{cm}/P_o \leq 0.5$ (Hsiao et al. 2008)

Με βάση τα παραπάνω επίπεδα επικινδυνότητας προτείνονται τρεις κατηγορίες ενίσχυσης του συστήματος υποστήριξης της υπόγειας τομής των σηράγγων:

1. Τοποθέτηση του ίδιου συστήματος υποστήριξης, στην περιοχή της διασταύρωσης, με το αντίστοιχο των επιμέρους τεμνόμενων σηράγγων, με τοπικές ενισχύσεις (όπως αύξηση του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή πύκνωση της διάταξης των ήλων ή/και αύξηση του μήκους τους).
2. Μείωση του βαθμού ταξινόμησης της βραχομάζας στην περιοχή της διασταύρωσης (π.χ. μείωση κατά δύο τρίτα της τιμής Q που χαρακτηρίζει τη βραχομάζα, σύμφωνα με το αντίστοιχο σύστημα ταξινόμησης) και τοποθέτηση ενισχυμένου συστήματος υποστήριξης.
3. Τοποθέτηση νέου συστήματος υποστήριξης, πιο ενισχυμένου, στην περιοχή διασταύρωσης των σηράγγων.

Η πρώτη κατηγορία σχεδιασμού συστήματος υποστήριξης αφορά διασταυρώσεις σηράγγων που διανοίγονται σε καλής ποιότητας βραχομάζας, εντός της οποίας δεν αναμένονται έντονες παραμορφώσεις. Η ενίσχυση του συστήματος υποστήριξης στην κατηγορία αυτή αποσκοπεί κυρίως στην αποφυγή τοπικών αστοχιών τεμαχών και δημιουργούμενων σφηνών του πετρώματος. Συνεπώς, αυτού του είδους σχεδιασμός υποστήριξης αντιστοιχεί σε διασταυρώσεις που πραγματοποιούνται σε βραχομάζες που

χαρακτηρίζονται από $\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$, καθώς δεν αναμένονται έντονες συγκλίσεις των τοιχωμάτων της υπόγειας εκσκαφής. Όπως γίνεται εμφανές και από το Σχ. 2.7.2, για περιπτώσεις κάθετης διασταύρωσης σηράγγων εντός γεωυλικού με $\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$, το επίπεδο επικινδυνότητας παρέμεινε σχεδόν κάτω από το επίπεδο II (Hsiao et al. 2008).

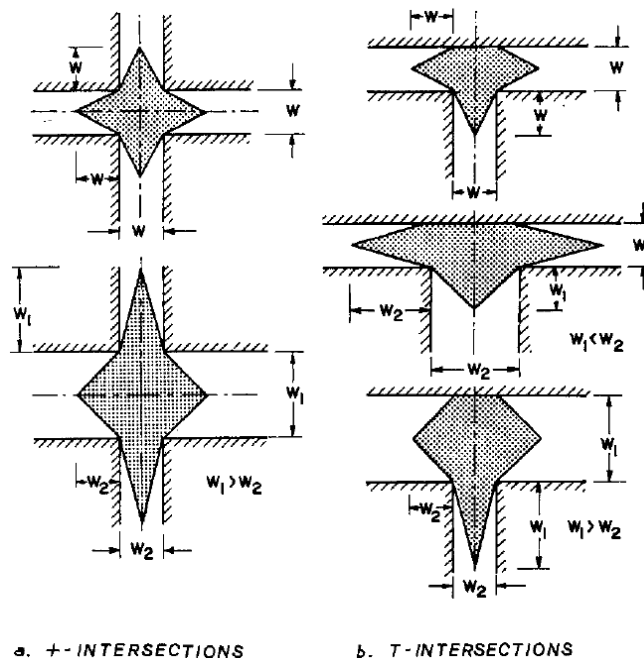
Η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία σχεδιασμού υποστήριξης προτείνουν έντονα ενισχυμένα μέτρα στήριξης για την περιοχή της διασταύρωσης. Αφορούν βραχομάζες εντός των οποίων οι προκαλούμενες μετατοπίσεις παραπέμπουν σε επίπεδα επικινδυνότητας μεταξύ II και III (Σχ. 2.7.3). Ειδικότερα, όταν οι μετατοπίσεις ξεπεράσουν το επίπεδο III (Σχ. 2.7.4), η τοποθέτηση μόνο ενισχυμένων μέτρων υποστήριξης για τη μείωση των παραμορφώσεων συνήθως δεν επαρκεί. Απαιτούνται επίσης βοηθητικά μέτρα, όπως ειδική μέθοδο διάνοιξης της υπόγειας εκσκαφής ή/και βελτίωση του εδαφικού υλικού με τη μέθοδο των εδαφοπασάλων, δηλαδή την ανάμειξη του γεωυλικού με τσιμέντο ώστε να επιτευχθεί η προενίσχυσή του (Hsiao et al. 2008).

Οι παραπάνω κατηγορίες υποστήριξης της υπόγειας διασταύρωσης σηράγγων για διάφορες γεωλογικές συνθήκες υπεδάφους και είδη βραχομάζας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.7.1.

Guidelines for support design in tunnel intersection area	
Geological condition	Support design suggestions
Slightly or non-squeezing rock ($\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$)	<ul style="list-style-type: none"> • Only strengthening support system to prevent potential wedge failure in the intersection area, such as increasing the thickness of shotcrete, and the density or length of rock bolt • Monitoring instruments should be installed to examine tunnel stability
Moderately squeezing rock $0.25 \leq \sigma_{cm}/P_0 \leq 0.5$	<ul style="list-style-type: none"> • Reducing rock mass rating in order to install heavier support work or design a more conservative support system in the intersection area. • Monitoring instruments should be installed to examine tunnel stability. Carry out detailed visual inspection on tunnel conditions and increase monitoring frequency during construction
Severely squeezing rock ($\sigma_{cm}/P_0 \leq 0.25$)	<ul style="list-style-type: none"> • Conservative excavation processes and support system should be used in the intersection area. Auxiliary measures, such as ground improvement, should be made if necessary. 3D numerical analysis is suggested to assess the appropriateness of tunnel design. • Monitoring instruments should be installed to examine tunnel stability. Carry out detailed inspection on tunnel conditions and increase monitoring frequency during construction

Πίνακας 2.7.1 Σχεδιασμός συστήματος υποστήριξης διασταύρωσης σηράγγων για διάφορα είδη βραχομάζας και φυσικών εντατικών συνθηκών (Hsiao et al. 2008)

Πιο αναλυτικά (όπως αναφέρθηκε στην πρώτη κατηγορία υποστήριξης), όταν η ευστάθεια της υπόγειας εκσκαφής επιτυγχάνεται από ήλους, στην περιοχή της διασταύρωσης απαιτείται είτε αύξηση της πυκνότητάς τους (δηλαδή μεγαλύτερος αριθμός ήλων ανά τετραγωνικό μέτρο) είτε αύξηση του μήκους τους. Η περιοχή τοποθέτησής τους πρέπει να καλύπτει όλη την έκταση της οροφής της διασταύρωσης, καθώς και τμήματα της στέψης των επιμέρους τεμνόμενων σηράγγων, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.7.5, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη υποστήριξη. Συνίσταται, για πιο απαιτητικά και δυσμενή γεωλογικά χαρακτηριστικά υπεδάφους, να εφαρμόζεται ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών, δηλαδή αύξηση του μήκους των ήλων με ταυτόχρονη πύκνωση της διάταξής τους στην περιοχή της διασταύρωσης (Gercek, 1986).



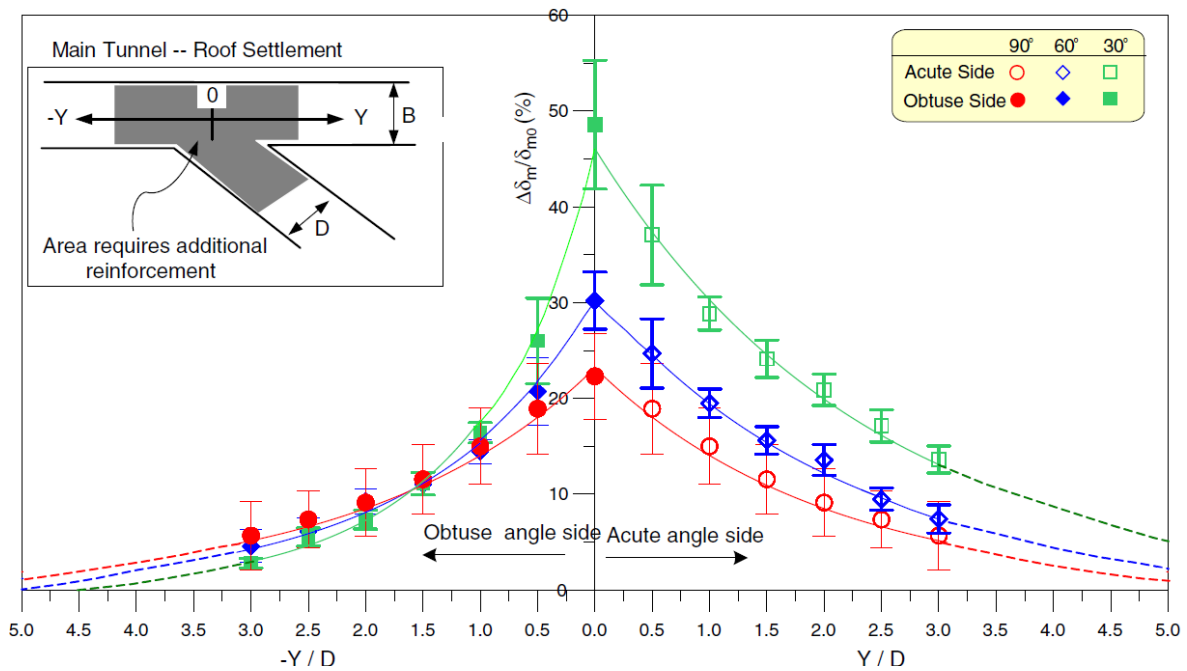
Σχήμα 2.7.5 Εύρος ενίσχυσης των ήλων στην οροφή κάθετης διασταύρωσης σηράγγων μορφής σταυρού (a) και T (b) (Gercek, 1986)

(2) Όσον αφορά τον προσδιορισμό της περιοχής εντός της οποίας πρέπει να τοποθετηθούν τα μέτρα υποστήριξης της υπόγειας τομής των σηράγγων, λαμβάνονται υπόψη οι πρόσθετες μετατοπίσεις που προκαλούνται από τη διάνοιξη της διασταύρωσής τους. Συγκεκριμένα, τα τμήματα της εκσκαφής με περίπου 10% αύξηση της παραμόρφωσής τους πρέπει να ενισχυθούν με πρόσθετη υποστήριξη (Liu et al. 2017). Ωστόσο, τα τμήματα αυτά μεταβάλλονται ανάλογα με τη γωνία διασταύρωσης των σηράγγων και συνεπώς μεταβάλλεται και η έκταση της περιοχής στην οποία θα τοποθετηθούν τα πρόσθετα μέτρα στήριξης.

Γενικά, παρατηρείται ότι το εύρος εφαρμογής της πρόσθετης υποστήριξης είναι αντιστρόφως ανάλογο της γωνίας τομής των σηράγγων (Gharouni-Nik et al. 2016, Hsiao et al. 2008). Συγκεκριμένα, για γωνία 45° , η περιοχή της ενισχυμένης υποστήριξης εκτείνεται από το κέντρο της διασταύρωσης, κατά μήκος της κύριας σήραγγας, για απόσταση ίση με μία διάμετρό της στην πλευρά της αμβλείας γωνίας και προσεγγιστικά τρεις διαμέτρους της στην πλευρά της οξείας γωνίας (Tsuchiyama et al. 1988). Για γωνία 60° , το μέγιστο μήκος επιπλέον υποστήριξης ορίζεται ίσο με τρεισήμισι-τέσσερις διαμέτρους της κύριας σήραγγας, ενώ για γωνία 90° ισούται με δύομιση διαμέτρους από το κέντρο της διασταύρωσης (Gharouni-Nik et al. 2014).

Πιο αναλυτικά, στο Σχ. 2.7.6 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των πρόσθετων μετατοπίσεων που προκαλούνται στις επιμέρους σήραγγες (εξαιτίας της μεταξύ τους τομής) με την απόσταση από το κέντρο της διασταύρωσής τους, η οποία εξετάζεται για τρεις διαφορετικές γωνίες (30° , 60° και 90°). Με βάση τη σχέση αυτή αξιολογείται η έκταση της περιοχής που χρήζει επιπλέον υποστήριξης. Για κάθετη γωνία διασταύρωσης (90°), η περιοχή αυτή περιλαμβάνει τμήματα του υπόγειου έργου που σημειώνουν ποσοστό αύξησης της παραμόρφωσής τους ίσο με 10-20%, ενώ για μικρότερες γωνίες (30° και 60°), η ενίσχυση του συστήματος υποστήριξης πραγματοποιείται σε τμήματα με 10-15% αύξηση των μετατοπίσεών τους. Γενικά, όπως προαναφέρθηκε, όσο μικρότερη είναι η γωνία διασταύρωσης των σηράγγων τόσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα του υπόγειου έργου που απαιτεί ενισχυμένα μέτρα στήριξης και συγκεκριμένα, το τμήμα αυτό, εκτείνεται περισσότερο από την πλευρά της σχηματιζόμενης οξείας γωνίας στην περιοχή της διασταύρωσης καθώς εκεί εντοπίζονται οι μεγαλύτερες επιπρόσθετες μετατοπίσεις, όπως γίνεται εμφανές και στο Σχ. 2.7.6 (Hsiao et al. 2008).

Στον Πίνακα 2.7.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παραπάνω προτεινόμενες περιοχές ενίσχυσης του συστήματος υποστήριξης της υπόγειας εκσκαφής για τις αντίστοιχες κατηγορίες γεωλογικών συνθηκών υπεδάφους και αντοχής βραχομάζας του Πίνακα 2.7.1. Αναφέρεται ότι οι περιοχές αυτές αποτελούν ενδεικτικές προτάσεις για μια αρχική μελέτη και σχεδιασμό της απαιτούμενης υποστήριξης στην περιοχή της διασταύρωσης. Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν αριθμητικές αναλύσεις και 3D μοντελοποιήσεις της υπόγειας εκσκαφής, ειδικά όταν αντιμετωπίζονται δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του έργου και η ευστάθεια της υπόγειας τομής των σηράγγων (Hsiao et al. 2008).



Σχήμα 2.7.6 Σχέση μεταξύ των πρόσθετων μετατοπίσεων, που προκαλούνται στις επιμέρους τεμνόμενες σήραγγες, με την απόσταση από το κέντρο της διασταύρωσής τους (Hsiao et al. 2008)

Suggestions for area with additional support

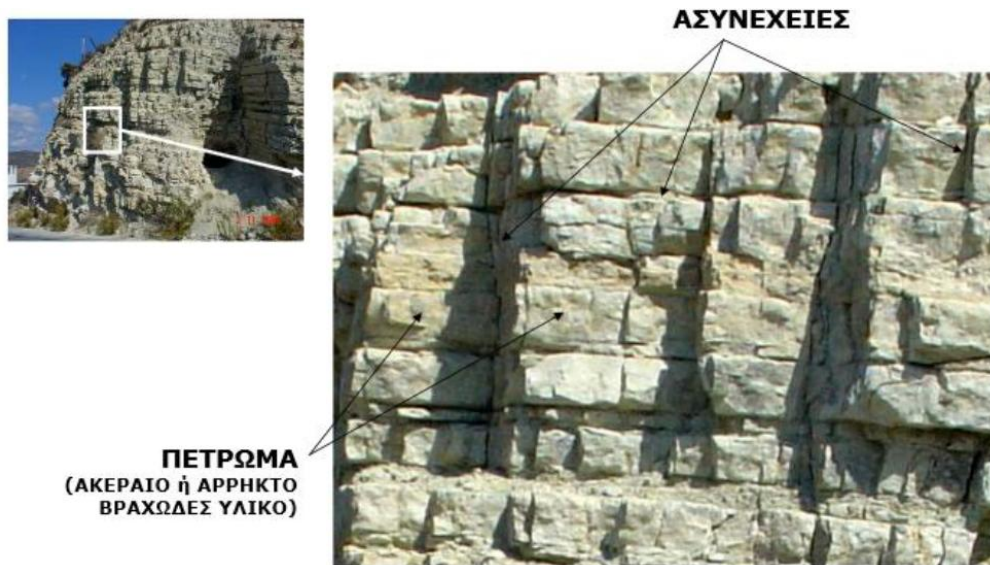
Geological condition	Extent suggestions for additional system support		
Slightly or non-squeezing rock ($\sigma_{cm}/P_0 \geq 0.5$)	No additional system support need in intersection area, only support in preventing potential wedge failure		
Moderately squeezing rock ($0.25 \leq \sigma_{cm}/P_0 \leq 0.5$)		Acute angle side	Obtuse angle side
	90°	1.0D*	1.0D
	60°	1.5D	1.0D
	30°	2.5D	1.0D
Severely squeezing rock ($\sigma_{cm}/P_0 \leq 0.25$)		Acute angle side	Obtuse angle side
	90°	1.5D	1.5D
	60°	2.5D	1.5D
	30°	3.5D	1.5D

*D: span of access tunnel.

Πίνακας 2.7.2 Προτεινόμενες περιοχές ενίσχυσης του συστήματος υποστήριξης της υπόγειας διασταύρωσης για διάφορα είδη βραχομάζας και φυσικών εντατικών συνθηκών, όπου D το μήκος του εγκάρσιου ανοίγματος της δευτερεύουσας σήραγγας (Hsiao et al. 2008)

3 Ανισότροπη βραχομάζα

Μία βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως ανισότροπη όταν περιέχει ένα μικρό αριθμό ασυνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, σχιστότητα κ.α.) και οι ιδιότητές της (φυσικές, μηχανικές και υδραυλικές) μεταβάλλονται ανάλογα με την κατεύθυνση της φόρτισης ως προς την κλίση των ασυνεχειών (Σχ. 3.2). Η αντοχή της εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή και τη διεύθυνση των ασυνεχειών, ενώ όταν στη βραχομάζα επικρατούν σύνολα ασυνεχειών (Εικόνα 3.1 και Σχ. 3.1), τότε η αντοχή της εξαρτάται και από το πλήθος και την εμμονή τους (όπου εμμονή (persistence) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της έκτασης ή του μεγέθους μίας ασυνέχειας σε ένα επίπεδο (ISRM, 1978)) (Νομικός, 2015).

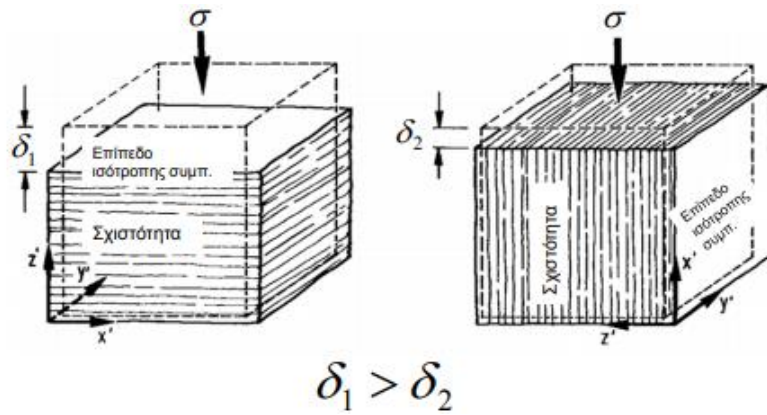


Εικόνα 3.1 Ανισότροπη βραχομάζα με εμφανής σύνολα ασυνεχειών (Παπαδαντωνάκης, 2015)



Σχήμα 3.1 Δομή ανισότροπης βραχομάζας κατά Hoek (1983) (Νομικός, 2015)

Αντίθετα, μία βραχομάζα η οποία αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ασυνεχειών διαφορετικής διεύθυνσης μεταξύ τους, δηλαδή είναι ισχυρά διακλασμένη, συμπεριφέρεται ως ένα ισότροπο μέσο καθώς οι ιδιότητές παραμένουν σταθερές ανεξαρτήτως διεύθυνσης (Νομικός, 2015).



Σχήμα 3.2 Μεταβολή της παραμορφωσιμότητας ανισότροπης βραχομάζας, με βάση την κλίση των ασυνεχειών της (σχιστότητα) και την κατεύθυνση της φόρτισης (σ), όπου δ_1 και δ_2 είναι οι αντίστοιχες παραμορφώσεις για οριζόντια και κάθετη κλίση των ασυνεχειών (Wittke, 1990)

Οι κύριες κατηγορίες πετρωμάτων που εμφανίζουν ανισότροπη συμπεριφορά είναι τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωμένα. Στα πετρώματα αυτά, η ανισοτροπία πηγάζει από τη στρωσιγενή δομή και τη σχιστότητα που αναπτύσσεται κατά τις διεργασίες του σχηματισμού τους. Παραδείγματα τέτοιων πετρωμάτων αποτελούν ο φλύσχης, που χαρακτηρίζεται από εναλλασσόμενες στρώσεις αργίλου και ψαμμίτη, και ο φυλλίτης, μεταμορφωμένο πέτρωμα με έντονη παρουσία σχιστότητας (Fortsakis et al. 2012).

Στρωσιγενή δομή

Στρώμα είναι μία λιθολογική ενότητα, μεγάλης συνήθως έκτασης, της οποίας η άνω και η κάτω επιφάνεια είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και ο πετρογραφικός της χαρακτήρας δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται το φαινόμενο της εναλλαγής στρώσεων διαφόρων πετρωμάτων σε μία κατακόρυφη τομή, διότι κατά την ιζηματογένεση ενδέχεται να διακοπεί η απόθεση ενός υλικού Α και να συνεχιστεί με την απόθεση ενός άλλου υλικού Β. Ως αποτέλεσμα, αυτή η εναλλαγή γεωλογικών υλικών μεταβάλει τις ιδιότητες της βραχομάζας σε κάθε αλλαγή στρώσης. Συνεπώς, η στρωσιγενή δομή, που χαρακτηρίζει τα ιζηματογενή πετρώματα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο οριζόντιων ή/και κεκλιμένων επιπέδων το οποίο διακόπτει τη συνέχεια του άρρηκτου βράχου. Για το λόγο αυτό αποτελεί ένα σύνολο επιφανειών ολικής ασυνέχειας του πετρώματος που οδηγεί σε ανισότροπη συμπεριφορά.

Σχιστότητα

Είναι η ιδιότητα που παρουσιάζουν πολλά πετρώματα, υπό την επίδραση κατευθυνόμενης πίεσης, να διαχωρίζονται σε πλάκες λόγω παράλληλου ιστού. Η πίεση αυτή μπορεί είτε να είναι τεκτονική, είτε να οφείλεται στο βάρος των υπερκειμένων πετρωμάτων. Με την

επίδρασή της, τα επιμήκη και φυλλώδη ορυκτά του πετρώματος αναδιατάσσονται ώστε ο μεγαλύτερος άξονας τους να είναι κάθετος στη διεύθυνσή της. Μέσω αυτής της διαδικασίας, τα πετρώματα εμφανίζουν μέγιστη θλιπτική αντοχή όταν η διεύθυνση του φορτίου είναι κάθετη προς το επίπεδο της σχιστότητάς τους και ελάχιστη όταν τα φορτία εφαρμόζονται σε γωνία 30° έως 45° ως προς αυτό. Συνεπώς, η σχιστότητα μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας ως προς τη διεύθυνση προσδίδοντάς της ανισότροπη συμπεριφορά.

Επομένως, μία ανισότροπη βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως ένα δομικό στοιχείο έντονης πολυπλοκότητας εξαιτίας της ύπαρξης ασυνεχειών διαφορετικού μεγέθους, διεύθυνσης και μηχανικών χαρακτηριστικών που της προσδίδουν ασυνεχείς, ανομοιογενείς και μη γραμμικά ελαστικές ιδιότητες. Ως αποτέλεσμα, ο σωστός σχεδιασμός ενός γεωτεχνικού έργου, με σκοπό να επιτευχθεί η ασφάλεια και η λειτουργικότητά του, οφείλει να λάβει υπόψη τις μεταβολές της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας της διακλασμένης βραχομάζας ως προς τους άξονες του φυσικού εντατικού πεδίου. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη διάνοιξη σηράγγων, πρέπει οι άξονές τους να είναι σε συμφωνία τόσο με τη διεύθυνση του φυσικού εντατικού πεδίου όσο και με την κατεύθυνση των κύριων ασυνεχειών ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του υπόγειου έργου (Bidgoli, 2014).

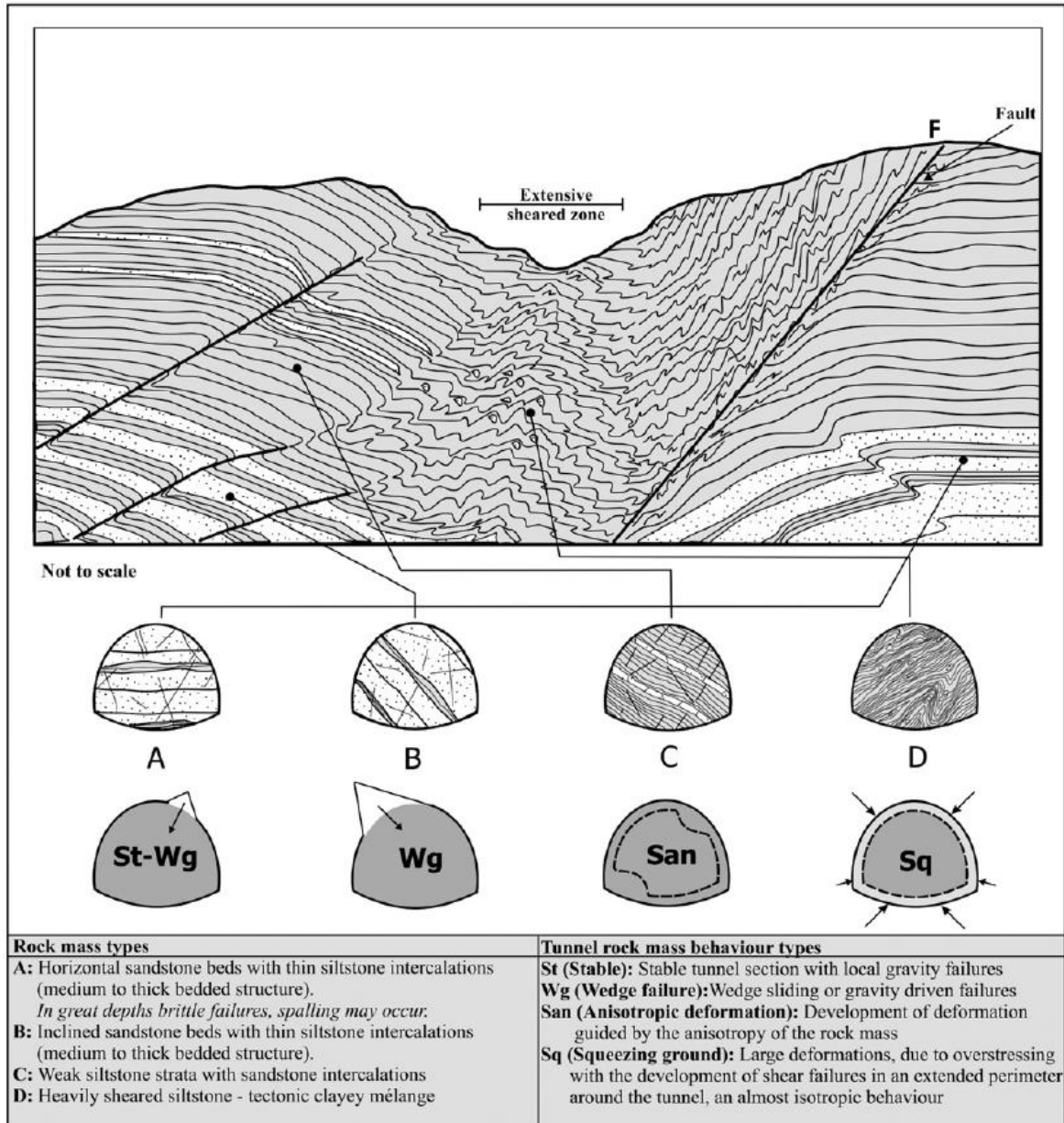
3.1 Διάνοιξη σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα

Μία συνήθης τεχνική στον κλάδο της σηραγοποιίας είναι η θεώρηση της βραχομάζας ως ένα ισότροπο μέσο κατά το σχεδιασμό υπόγειων έργων. Η ανακρίβεια αυτής της θεώρησης είναι αποδεκτή μόνο σε ομοιόμορφα διακλασμένες, έντονα τεκτονισμένες ή αποσαρθρωμένες βραχομάζες οι οποίες δεν περιέχουν κύριες ασυνέχειες που ελέγχουν τη μηχανική τους συμπεριφορά. Ωστόσο, σε περιπτώσεις γεωυλικών με έντονη παρουσία ασυνεχειών, όπως ιζηματογενείς σχηματισμοί με στρωσιγενή δομή ή μεταμορφωμένες λιθολογικές ενότητες με παρουσία σχιστότητας, παρατηρείται ανισότροπη συμπεριφορά και καθίσταται απαραίτητη η ανάλυσή της στη μελέτη σχεδιασμού της υπόγειας εκσκαφής (Fortsakis et al. 2012). Συνεπώς, τα επίπεδα ασυνεχειών που χαρακτηρίζουν την δομή μίας ανισότροπης βραχομάζας, επηρεάζουν την μηχανική της συμπεριφορά, γεγονός που απεικονίζεται στο Σχ. 3.1.1, όπου παρουσιάζονται διάφοροι τύποι βραχομάζας με στρωσιγενή δομή και η αντίστοιχη απόκρισή τους κατά την υπόγεια διάνοιξη σήραγγας.

Επομένως, όταν η περιβάλλουσα βραχομάζα ενός υπόγειου έργου αποτελείται από δομικά στοιχεία που χαρακτηρίζονται ως ασυνέχειες (όπως σχιστότητα και στρώσεις), τότε τα μηχανικά χαρακτηριστικά της μειώνονται σημαντικά, κατά συγκεκριμένες διευθύνσεις, και δυσχεραίνεται η εκτέλεση της εκσκαφής (Everitt & Lajati, 2004, Bewick and Kaiser, 2009). Συγκεκριμένα:

- Επηρεάζεται η αντοχή της βραχομάζας ανάλογα με τη διεύθυνση της φόρτισης ως προς τον προσανατολισμό των προαναφερθέντων δομικών στοιχείων.
- Αναπτύσσεται ένα μη ομοιόμορφο εντατικό πεδίο που οδηγεί αντίστοιχα στη δημιουργία μη ομοιόμορφης πλαστικής ζώνης γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.
- Σημειώνεται αστοχία της βραχομάζας, ακόμη και για χαμηλότερες τιμές τάσης, κατά συγκεκριμένες διευθύνσεις σε σχέση με την κλίση των ασυνεχειών.

Τα παραπάνω δυσμενή φαινόμενα αποτελούν την απόρροια ύπαρξης ασυνεχειών στη δομή της βραχομάζας που περιβάλλει την εκσκαφή ενός υπόγειου έργου. Η βαρύτητα και η έκταση των φαινομένων αυτών εξαρτώνται από τον αριθμό, την πυκνότητα (την απόσταση μεταξύ τους) και την κλίση των ασυνεχειών καθώς και από τις μηχανικές ιδιότητές τους όπως τη διατμητική αντοχή (Hoek and Marinos, 2009), παράμετροι οι οποίες θα εξεταστούν παρακάτω.

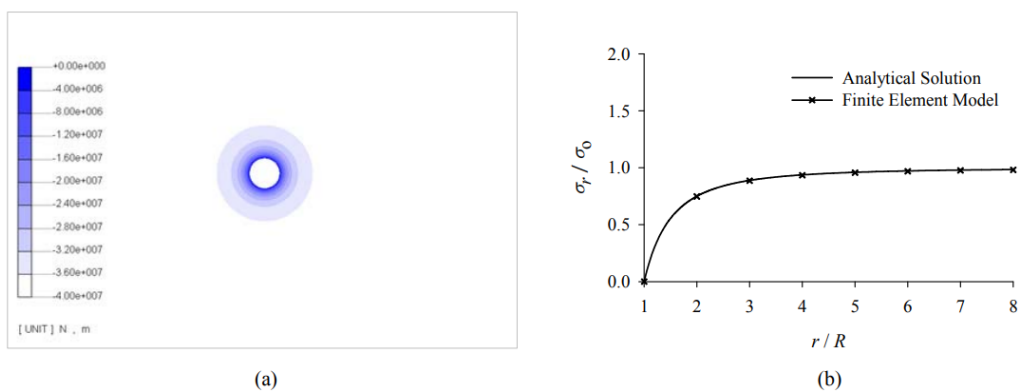


Σχήμα 3.1.1 Παραδείγματα στρωσιγενών βραχομάζων και η αναμενόμενη δομική συμπεριφορά τους κατά την διάνοιξη σήραγγας (Fortsakis et al. 2012)

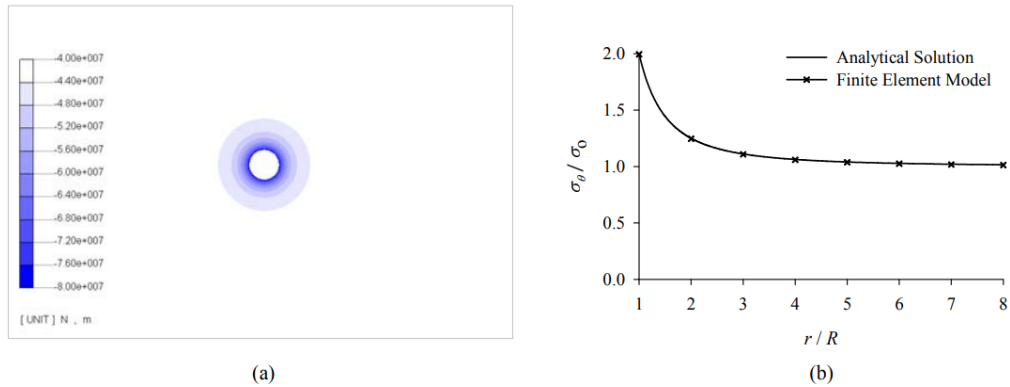
3.1.1 Σύγκριση διάνοιξης σήραγγων σε ισότροπη και ανισότροπη βραχομάζα

Όπως ήδη περιγράφηκε, η ύπαρξη ασυνεχειών στη δομή ενός πετρώματος επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές του ιδιότητες, όπως την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα. Ως αποτέλεσμα οι μηχανισμοί ευστάθειας και αστοχίας μίας σήραγγας η οποία διανοίγεται εντός αυτού του ανισότροπου πετρώματος, διαφέρουν αισθητά από αυτούς που εκδηλώνονται κατά τη διάνοιξη της σε ισότροπη βραχομάζα (Zhang et al. 2020).

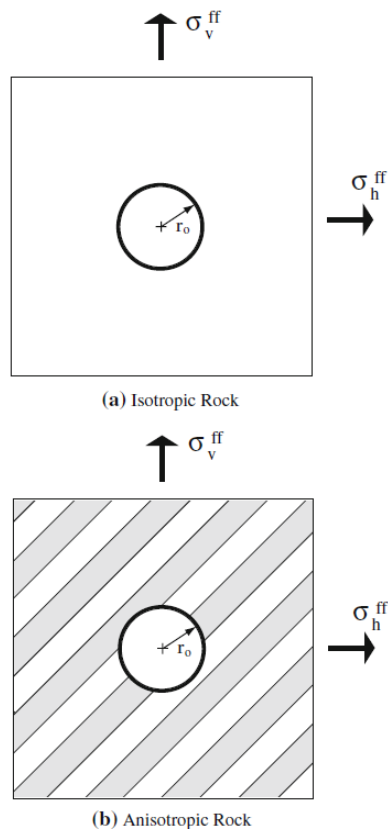
Πιο αναλυτικά, όσον αφορά την απόκριση της σήραγγας εντός ισότροπης βραχομάζας, υπάρχουν δύο άξονες συμμετρίας, καθένας κατά τη διεύθυνση των τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου (κάθετες (σ_v) και οριζόντιες (σ_h)), όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.1.1.3a. Οι μέγιστες τάσεις, μετατοπίσεις και καμπτικές ροπές που προκαλούνται στη σήραγγα, αναπτύσσονται κατά μήκος αυτών των αξόνων συμμετρίας και εξαρτώνται από τις διαστάσεις της σήραγγας, το μέγεθος των γεωστατικών τάσεων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ισότροπης βραχομάζας (Bobet, 2010). Οι αξονικές τάσεις στην περιφέρεια της ανυποστήριχτης σήραγγας είναι ίσες με μηδέν, λόγω δράσης-αντίδρασης, ενώ αντίθετα οι εφαπτομενικές τάσεις λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους. Όσο αυξάνεται η απόσταση από τα όρια της εκσκαφής, οι τιμές τόσο των ακτινικών όσο και των εφαπτομενικών τάσεων τείνουν να σταθεροποιηθούν στις τιμές του φυσικού εντατικού πεδίου καθώς φθίνει σταδιακά η επίδραση της ζώνης επιρροής της σήραγγας (Simanjuntak, 2014). Οι παραπάνω παρατηρήσεις για τις τάσεις γύρω από το υπόγειο άνοιγμα της σήραγγας παρουσιάζονται για ομοιόμορφο φυσικό εντατικό πεδίο σ_0 στα Σχ. 3.1.1.1 και Σχ. 3.1.1.2.



Σχήμα 3.1.1.1 Κατανομή ακτινικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : (a) Απεικόνιση της κατανομής των ακτινικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (b) Διάγραμμα μεταβολής των ακτινικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).



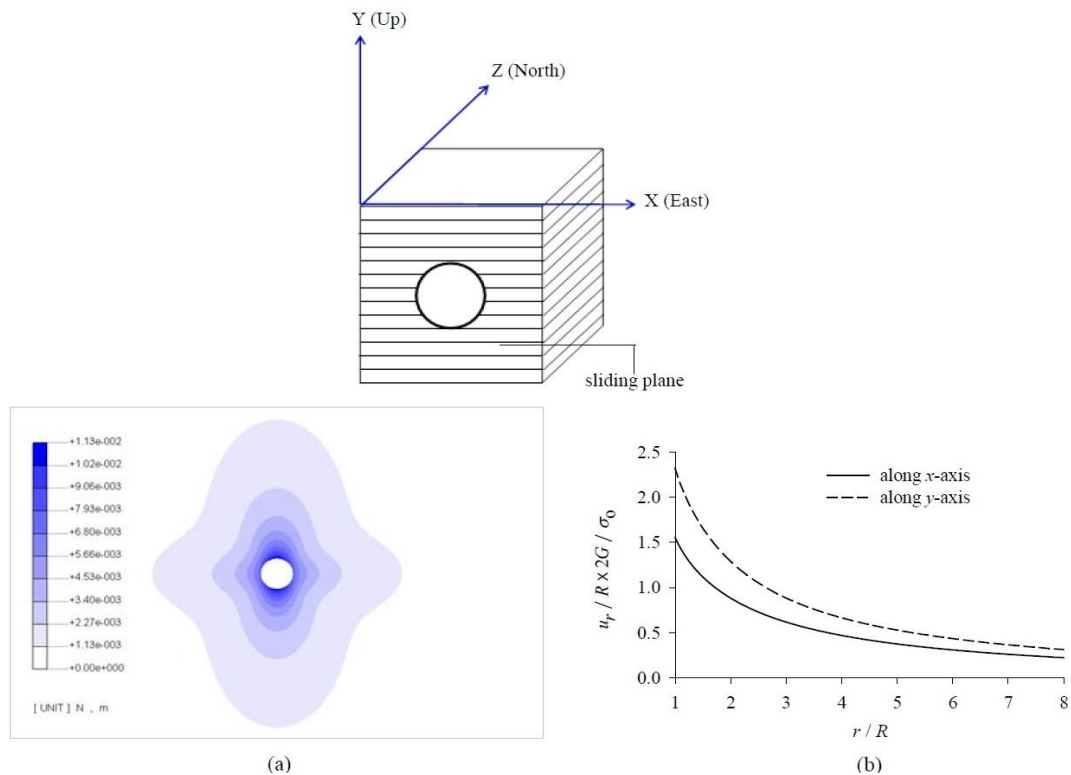
Σχήμα 3.1.1.2 Κατανομή εφαπτομενικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : (a) Απεικόνιση της κατανομής των εφαπτομενικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (b) Διάγραμμα μεταβολής των εφαπτομενικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).



Σχήμα 3.1.1.3 Διατομή κυκλικής σήραγγας ακτίνας r_0 εντός (a) ισότροπης βραχομάζας και (b) ανισότροπης βραχομάζας (Bobet., 2010).

Αντίθετα, όσον αφορά τη διάνοιξη σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα, οι άξονες ελαστικής συμμετρίας δεν συμπίπτουν πάντοτε με τις διευθύνσεις των τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου λόγω της έντονης επιρροής που ασκούν οι ασυνέχειες του πετρώματος. Συνεπώς, τα τμήματα όπου θα αναπτυχθούν οι μέγιστες τάσεις και μετατοπίσεις στη σήραγγα, εξαρτώνται από την κατεύθυνση των γεωστατικών τάσεων σε

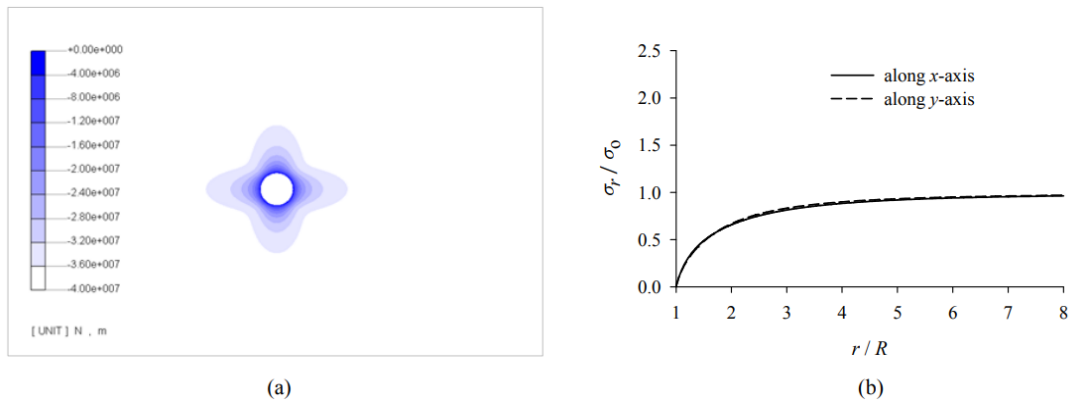
σχέση με τη διεύθυνση των επιπέδων ανισοτροπίας της βραχομάζας (Bobet, 2010). Συγκεκριμένα, για παράδειγμα σήραγγας εντός βραχομάζας με οριζόντια επίπεδα ασυνεχειών, παρατηρείται ότι οι προκαλούμενες μετατοπίσεις είναι αισθητά μεγαλύτερες όταν οι γεωστατικές τάσεις ασκούνται κάθετα στις ασυνέχειες (δηλαδή στη στέψη και στο ανάστροφο της σήραγγας), συγκριτικά με το όταν η φόρτιση από το φυσικό εντατικό πεδίο είναι παράλληλη με τη διεύθυνση των επιπέδων ανισοτροπίας (δηλαδή στα πλευρικά τοιχώματα της σήραγγας), όπως απεικονίζεται και στο Σχ. 3.2. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται διότι το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus, E), μίας ανισότροπης βραχομάζας, είναι μεγαλύτερο κατά τη διεύθυνση των ασυνεχειών, από ότι κάθετα σε αυτή (Tonon & Amadei, 2003, Simanjuntak, 2014). Η κατανομή αυτή των μετατοπίσεων περιμετρικά της κυκλικής διατομής της σήραγγας παρουσιάζεται στο Σχ. 3.1.1.4.



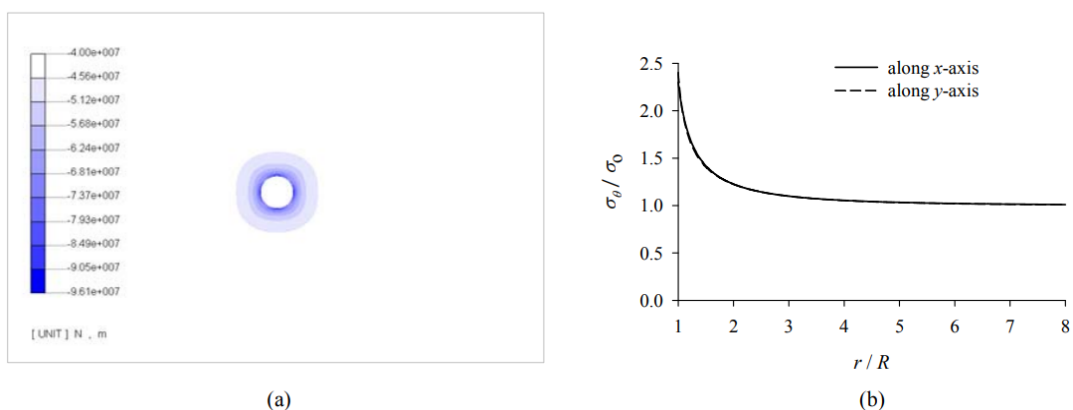
Σχήμα 3.1.1.4 Κατανομή μετατοπίσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : Πάνω: Κυκλική σήραγγα εντός ανισότροπης βραχομάζας με οριζόντια επίπεδα ασυνεχειών, (a) Απεικόνιση της κατανομής των μετατοπίσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (b) Διάγραμμα μεταβολής των μετατοπίσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).

Οι αξονικές τάσεις στην περιφέρεια της ανυποστήριχτης σήραγγας παραμένουν ίσες με μηδέν, λόγω δράσης-αντίδρασης, είτε πρόκειται για ισότροπη είτε για ανισότροπη βραχομάζα. Ωστόσο, για απόσταση μεγαλύτερη από την ακτίνα του υπόγειου ανοίγματος, η κατανομή των ακτινικών τάσεων είναι παρόμοια με αυτήν των μετατοπίσεων (Σχ.

3.1.1.4a), λόγω της οριζόντιας ανισοτροπίας που χαρακτηρίζει τη βραχομάζα (όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο). Αντίθετα, οι εφαπτομενικές τάσεις παρουσιάζουν μία πιο ομαλή κατανομή γύρω από τη διατομή της σήραγγας, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή τους στη στέψη και στο τόξο πυθμένα της εκσκαφής, ενώ την ελάχιστη, στις διχοτόμους της οροφής και του ανάστροφου με τα πλευρικά τοιχώματα του υπόγειου ανοίγματος. Όσο αυξάνεται η απόσταση από τα όρια της εκσκαφής, οι τιμές τόσο των ακτινικών όσο και των εφαπτομενικών τάσεων τείνουν να σταθεροποιηθούν στις τιμές του φυσικού εντατικού πεδίου καθώς φθίνει σταδιακά η επίδραση της ζώνης επιρροής της σήραγγας (Simanjuntak, 2014). Οι παραπάνω παρατηρήσεις για τις τάσεις γύρω από το υπόγειο άνοιγμα της σήραγγας παρουσιάζονται για ομοιόμορφο φυσικό εντατικό πεδίο σ_0 στα Σχ. 3.1.1.5 και Σχ. 3.1.1.6.



Σχήμα 3.1.1.5 Κατανομή ακτινικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : (a) Απεικόνιση της κατανομής των ακτινικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (b) Διάγραμμα μεταβολής των ακτινικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).



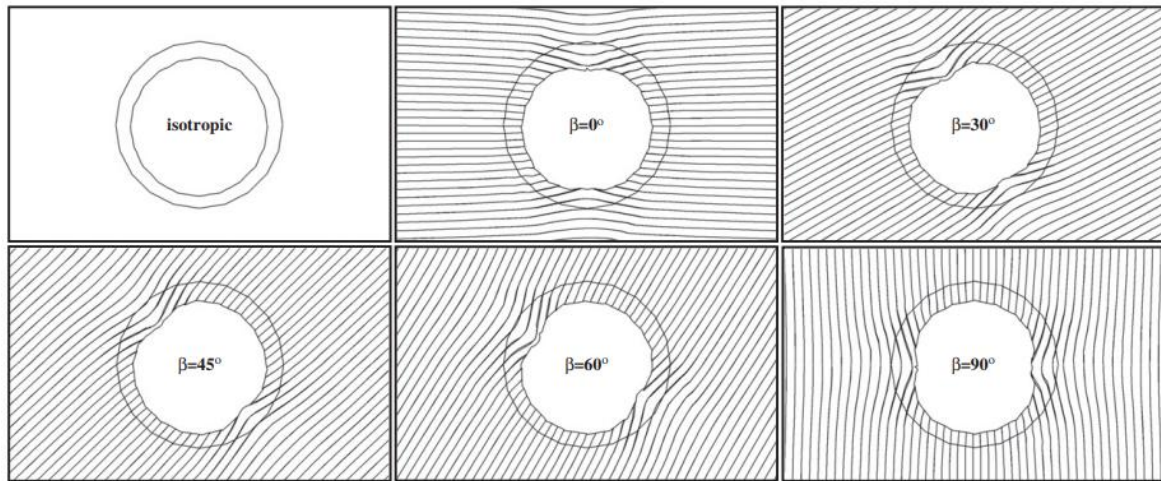
Σχήμα 3.1.1.6 Κατανομή εφαπτομενικών τάσεων γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας σε ομοιόμορφο εντατικό πεδίο σ_0 : (a) Απεικόνιση της κατανομής των εφαπτομενικών τάσεων στην περιφέρεια της κυκλικής διατομής, (b) Διάγραμμα μεταβολής των ακτινικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από το όριο του υπόγειου ανοίγματος (Simanjuntak, 2014).

3.1.2 Μετατοπίσεις και πλαστική ζώνη λόγω ανισοτροπίας της βραχομάζας

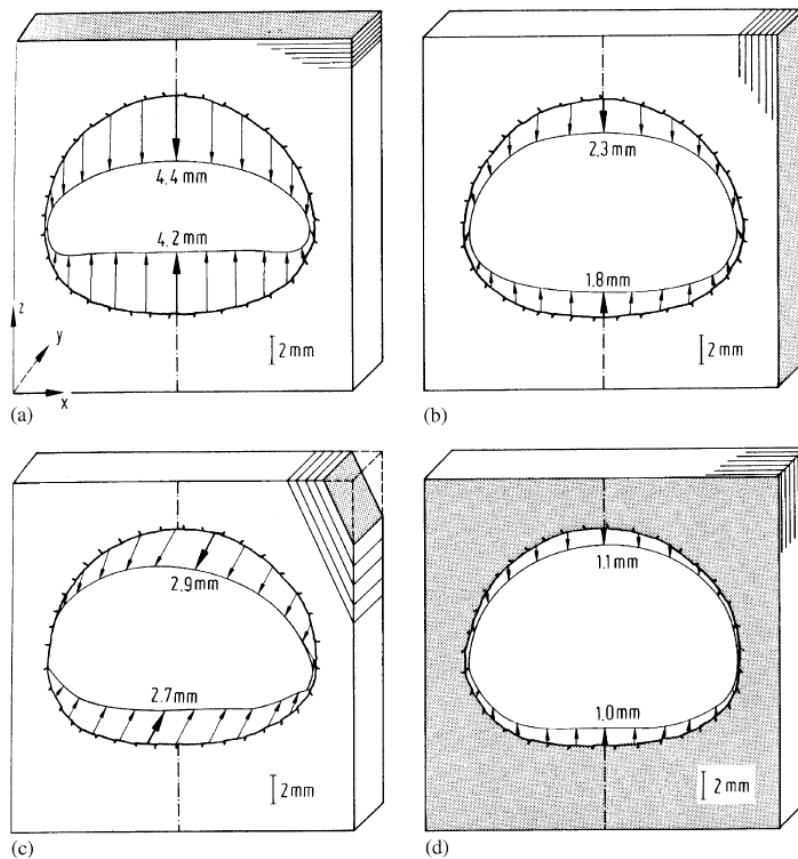
Οι κύριες ασυνέχειες στη δομή μίας ανισότροπης βραχομάζας μεταβάλλουν το εντατικό πεδίο γύρω από ένα υπόγειο έργο, καθώς η κατεύθυνση των γεωστατικών τάσεων προσανατολίζεται ανάλογα με τη διεύθυνση των επιπέδων ανισοτροπίας. Συγκεκριμένα, οι κύριες τάσεις αποκτούν διευθύνσεις παράλληλες και κάθετες στις κλίσεις των ασυνεχειών της βραχομάζας, περιμετρικά του ανοίγματος της εκσκαφής (Fortsakis et al. 2012).

Το δευτερογενές αυτό εντατικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται λόγω της υπόγειας διάνοιξης, μπορεί να αναλυθεί μηχανικά θεωρώντας τα τμήματα του άρρηκτου πετρώματος, ανάμεσα στα επίπεδα των ασυνεχειών, ως απλές δοκούς. Πιο αναλυτικά, οι επιφάνειες των ασυνεχειών χαρακτηρίζονται μηχανικά από την πολύ μικρή ή μηδενική εφελκυστική και διατμητική αντοχή τους σε σχέση με αυτή του άρρηκτου πετρώματος. Ως αποτέλεσμα, αναπτύσσεται η δυνατότητα απομάκρυνσης και ολίσθησης μεταξύ τους. Το φαινόμενο αυτό της ολίσθησης μεταξύ των τμημάτων του άρρηκτου πετρώματος επιτρέπει τη στροφή της ροής των τάσεων σε μορφή θόλου προς τον κενό χώρο της υπόγειας εκσκαφής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, κάθε επόμενο προς τα πάνω στρώμα έχει μικρότερο στατικό άνοιγμα από το προηγούμενο, που συνεπάγεται μικρότερο βέλος κάμψης και διαχωρισμό των στρωμάτων. Συνεπώς, προκαλούνται μετατοπίσεις κάθετα στην κλίση των ασυνεχειών, λόγω μικρότερης τιμής του μέτρου ελαστικότητας (Young's Modulus, E) κατά αυτήν τη διεύθυνση, και δημιουργείται ζώνη χαλάρωσης, η έκταση της οποίας εξαρτάται από τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας (Fortsakis et al. 2012, Σοφριανός, 2015).

Επομένως, οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων αναπτύσσονται στις περιοχές όπου τα επίπεδα της ανισοτροπίας εφάπτονται στη διατομή της σήραγγας και κατά συνέπεια κάμπτονται (ως απλές δοκοί) προς τον κενό χώρο του υπόγειου ανοίγματος. Σε αντίστοιχα συμπεράσματα, για διάνοιξη σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα, κατέληξαν και οι Tonon & Amadei (2003) (Σχ. 3.1.2.2), οι οποίοι αντίστοιχα κατέγραψαν τη μέγιστη προκαλούμενη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση της ελάχιστης τιμής του μέτρου ελαστικότητας του πετρώματος (Young's Modulus, E), δηλαδή κάθετα στην κλίση των κύριων ασυνεχειών.



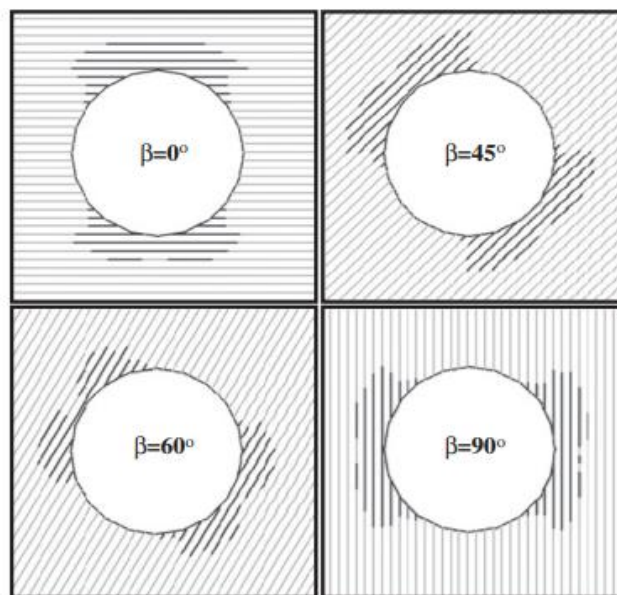
Σχήμα 3.1.2.1 Παραμορφώσεις κυκλικής διατομής σήραγγας, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (β) (Fortsakis et al. 2012)



Σχήμα 3.1.2.2 Κατανομή μετατοπίσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας, για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών (Tonon & Amadei, 2003)

Όσον αφορά την πλαστική ζώνη που δημιουργείται γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, ο αριθμός και η κλίση των ασυνεχειών επηρεάζουν την έκταση και τη μορφή της, εντός της ανισότροπης βραχομάζας. Συγκεκριμένα, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 3.1.2.1a&b, η πλαστική ζώνη γύρω από τη διατομή της υπόγειας εκσκαφής είναι συμμετρική όταν δεν

διακρίνονται ασυνέχειες στην περιβάλλουσα βραχομάζα. Αντίθετα, η ύπαρξη ασυνεχειών μεταβάλλει την κατανομή της πλαστικής ζώνης και την καθιστά ασύμμετρη καθώς εκτείνεται περισσότερο προς τις περιοχές όπου εντοπίζονται οι ασυνέχειες (Zhang et al. 2020). Πιο αναλυτικά, η μέγιστη έκταση της ζώνης παραμόρφωσης, περιμετρικά του ανοίγματος του υπόγειου έργου, αναπτύσσεται στις περιοχές όπου τα επίπεδα των ασυνεχειών εφάπτονται στη διατομή της εκσκαφής (Σχ. 3.1.2.3), καθώς στις περιοχές αυτές, τα τμήματα του άρρηκτου πετρώματος κάμπτονται προς τον κενό χώρο της υπόγειας διάνοιξης (σύμφωνα με τη θεώρηση της απλής δοκού, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο) (Fortsakis et al. 2012).

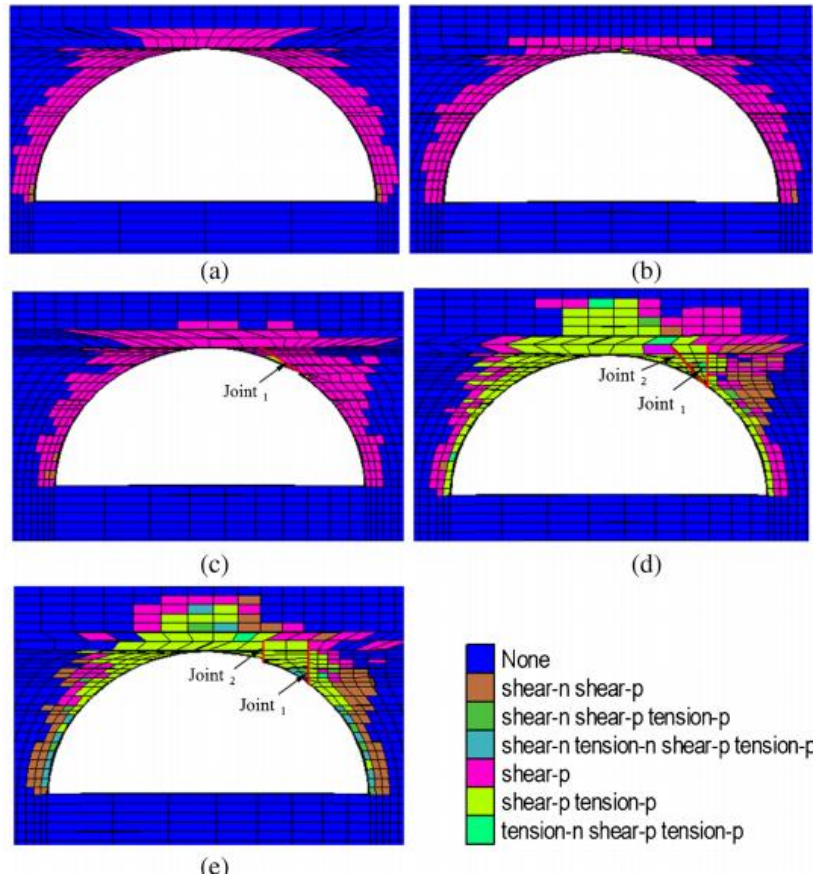


Σχήμα 3.1.2.3 Έκταση πλαστικής ζώνης γύρω από κυκλική διατομή σήραγγας, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου, για διάφορες κλίσεις ασυνεχειών της ανισότροπης βραχομάζας (Fortsakis et al. 2012)

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επιπέδων ανισοτροπίας στην περιβάλλουσα βραχομάζα μίας σήραγγας, τόσο περισσότερο εκτείνεται και το εύρος της πλαστικής ζώνης γύρω από αυτή. Αυτό γίνεται εμφανές κατά τη σύγκριση του μεγέθους της ζώνης παραμόρφωσης στην περίπτωση μίας ασυνέχειας περιμετρικά του ανοίγματος της σήραγγας (Εικόνα 3.1.2.1c), με την περίπτωση δύο ασυνεχειών (Εικόνα 3.1.2.1d&e) (Zhang et al. 2020).

Επίσης, η κλίση των επιπέδων ανισοτροπίας, τόσο ως προς τη διατομή της εκσκαφής (όπως αναλύθηκε παραπάνω, Σχ. 3.1.2.1) όσο και μεταξύ τους, επιδρά στο εύρος του πεδίου παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, όταν οι κύριες ασυνέχειες μίας ανισότροπης βραχομάζας έχουν διαφορετική κλίση μεταξύ τους, τότε δημιουργούν μία πιο περίπλοκα

διακλασμένη δομή, σχηματίζοντας περισσότερα ασταθή τεμάχια και ως αποτέλεσμα εντονότερη παραμόρφωση περιμετρικά του ανοίγματος του υπόγειου έργου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στην Εικόνα 3.1.2.1d, όπου η έκταση της πλαστικής ζώνης είναι μεγαλύτερη, σε σύγκριση με αυτή της Εικόνας 3.1.2.1e, καθώς οι δύο ασυνέχειες, Joint 1 και Joint 2, της περιβάλλουσας βραχομάζας έχουν διαφορετική κλίση μεταξύ τους (Zhang et al. 2020).

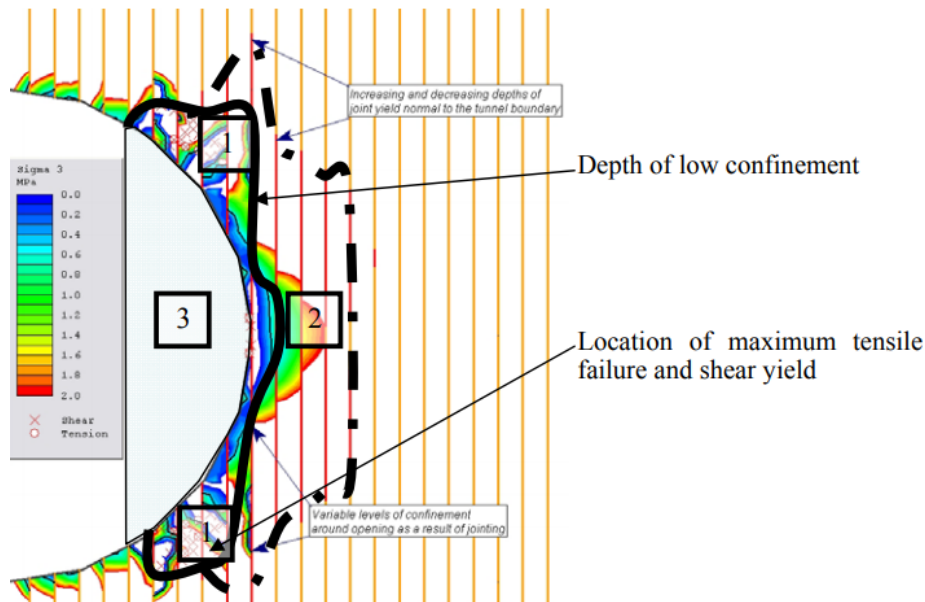


Εικόνα 3.1.2.1 Κατανομή πλαστικής ζώνης γύρω από υπόγειο ημικυκλικό άνοιγμα σήραγγας: (a), (b): Σε ισότροπο πέτρωμα, (c) Σε βραχομάζα με μία κύρια ασυνέχεια κλίσης 50° (Joint 1) στην περιφέρεια της σήραγγας, (d) Σε βραχομάζα με δύο κύριες ασυνέχειες, Joint 1 και Joint 2, κλίσης 90° και 50° αντίστοιχα, (e) Σε βραχομάζα με δύο κύριες ασυνέχειες, Joint 1 και Joint 2, ίδιας κλίσης 90° , όπου None συμβολίζει τις ελαστικές περιοχές, shear-p και tension-p αντιστοιχούν σε διατμητική (shear) και εφελκυστική (tension) αστοχία, αντίστοιχα, του προηγούμενου υπολογιστικού βήματος, ενώ shear-n και tension-n αντιστοιχούν σε διατμητική (shear) και εφελκυστική (tension) αστοχία, αντίστοιχα, του τρέχοντος υπολογιστικού βήματος (Zhang et al. 2020)

3.1.3 Κλίση ασυνεχειών και συντελεστής πλευρικών ωθήσεων

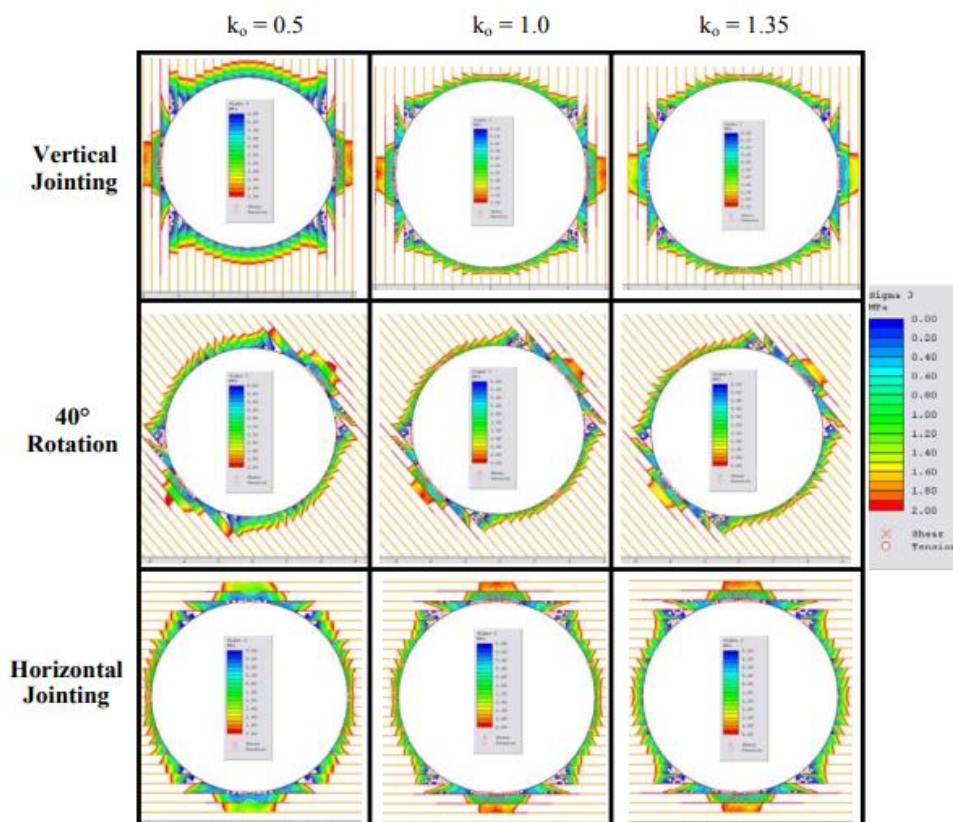
Οι μηχανισμοί αστοχίας μίας ανισότροπης βραχομάζας, γύρω από τη διάνοιξη μίας υπόγειας εκσκαφής, καθορίζονται από ένα συνδυασμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του άρρηκτου πετρώματος, του φυσικού εντατικού πεδίου και των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τα επίπεδα ανισοτροπίας. Μία από αυτές τις ιδιότητες, που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την έκταση και τη μορφή της αστοχίας του περιβάλλοντος πετρώματος, είναι η κλίση κατά την οποία αναπτύσσονται οι ασυνέχειες της ανισότροπης βραχομάζας, όπως ήδη έχει αναφερθεί στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (3.1.2).

Πιο αναλυτικά, ο προσανατολισμός των κύριων ασυνεχειών ως προς τη διατομή μίας υπόγειας εκσκαφής επηρεάζει την κατανομή των τάσεων γύρω από αυτή, δημιουργώντας ζώνες καταπόνησης σε συγκεκριμένες περιοχές περιμετρικά του υπόγειου ανοίγματος. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται στο ευρύτερο τμήμα όπου η διεύθυνση των κύριων ασυνεχειών εφάπτεται με τη διατομή της εκσκαφής (η περιοχή αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1.3.1 με μαύρο περίγραμμα). Στο τμήμα αυτό, η κλίση των ασυνεχειών ευθυγραμμίζεται με τη διεύθυνση των εφαπτομενικών τάσεων που ασκούνται στην περιφέρεια του υπόγειου ανοίγματος και ως αποτέλεσμα ευνοείται η αστοχία σε διάτμηση και ενισχύεται η έκταση της ζώνης παραμόρφωσης εντός της βραχομάζας (Bewick & Kaiser, 2009).



Εικόνα 3.1.3.1 Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (Sigma 3) γύρω από ημιδιατομή κυκλικής σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 90ο, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου: (x) Διατμητική αστοχία, (o) Εφελκυστική αστοχία, (1) Εσωτερική ζώνη απόκρισης της βραχομάζας, με την μέγιστη εφελκυστική και διατμητική αστοχία, (2) Εξωτερική ζώνη απόκρισης της βραχομάζας και (3) Περιοχή επιρροής από το σύνολο των κύριων ασυνεχειών (Bewick & Kaiser, 2009)

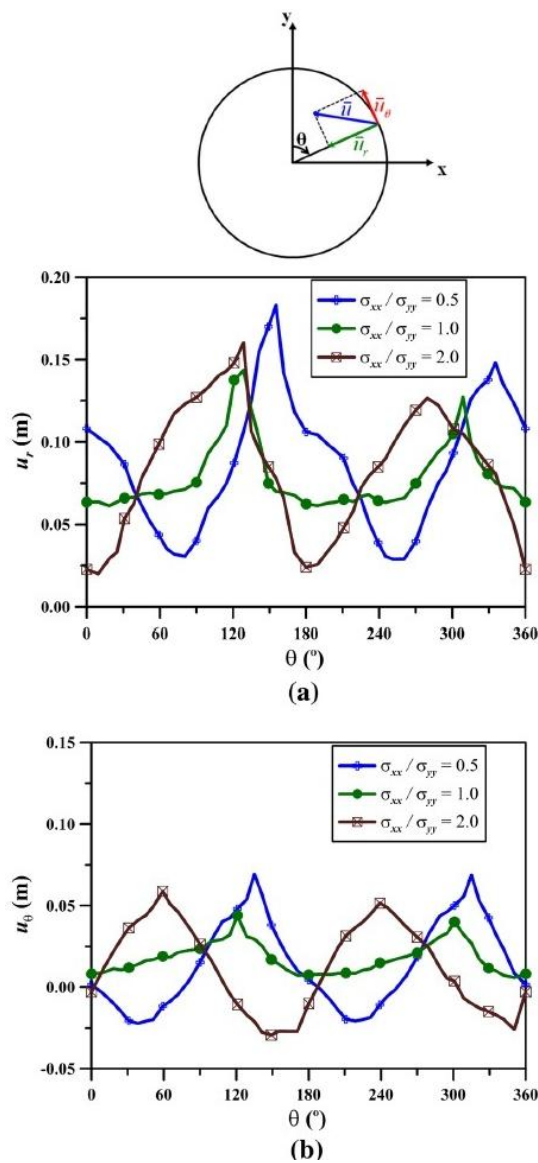
Συνεπώς, η κατανομή των τάσεων και η έκταση της παραμόρφωσης γύρω από το άνοιγμα μίας υπόγειας εκσκαφής, επηρεάζεται από την ανισοτροπία του περιβάλλοντος γεωυλικού, δηλαδή από τα επίπεδα των ασυνεχειών στη δομή του. Ως εκ τούτου, τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η κλίση αυτών των ασυνεχειών καθορίζουν άμεσα τα τμήματα στα οποία θα επηρεαστεί περισσότερο η ευστάθεια του περιβάλλοντος πετρώματος. Η επιρροή αυτή των επιπέδων ανισοτροπίας της βραχομάζας απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1.3.2 για κυκλικό άνοιγμα σήραγγας, υποδεικνύοντας ότι τα σημεία καταπόνησης του πετρώματος εξαρτώνται σε μεγαλύτερο βαθμό από την κλίση των ασυνεχειών και σε μικρότερο από τον συντελεστή πλευρικών ωθήσεων.



Εικόνα 3.1.3.2 Κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (σ_3) γύρω από κυκλικό άνοιγμα σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα για τρεις διαφορετικές κλίσεις ασυνεχειών (0° , 40° και 90°) και τρεις διαφορετικούς συντελεστές πλευρικών ωθήσεων ($K_0=0.5$, $K_0=1.0$ και $K_0=1.35$) (Bewick & Kaiser, 2009)

Όσον αφορά το συντελεστή πλευρικών ωθήσεων (K_0), παρόλο που συγκριτικά με την κλίση των ασυνεχειών η επίδρασή του δεν είναι τόσο αισθητή, παραμένει ένας σημαντικός παράγοντας με έντονη επίδραση στις τιμές των προκαλούμενων μετατοπίσεων. Συγκεκριμένα, τόσο οι ακτινικές όσο και οι εφαπτομενικές μετατοπίσεις περιμετρικά μίας υπόγειας εκσκαφής αυξάνονται όταν ο συντελεστής K_0 δεν λαμβάνει τιμή ίση με την μονάδα ($K_0 \neq 1$), δηλαδή όταν δεν υφίσταται κατάσταση υδροστατικού εντατικού πεδίου.

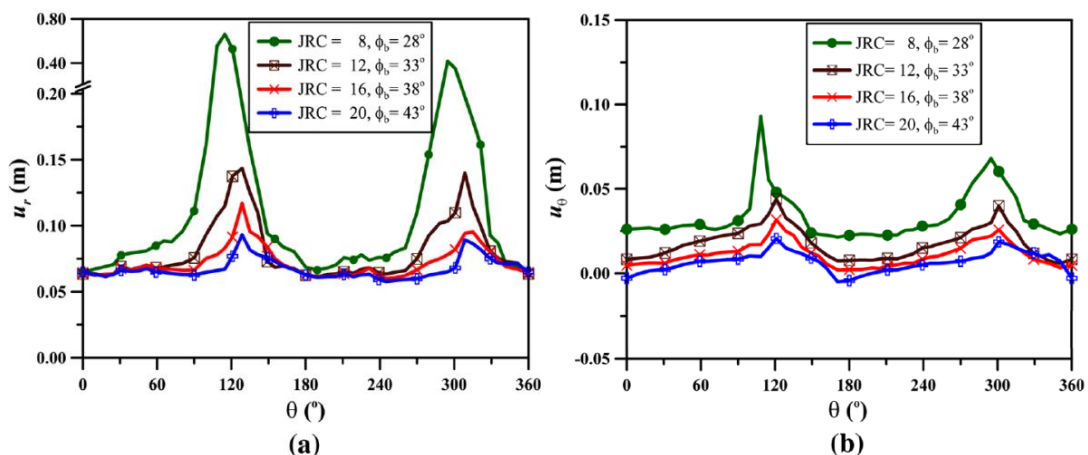
Συγκεκριμένα, οι επαπτομενικές μετατοπίσεις παρουσιάζουν τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές σε σύγκριση με τις αποκλειστικά θετικές που λάμβαναν υπό υδροστατικές συνθήκες. Αυτές οι μεταβολές στο πρόσημο των τιμών τους υποδεικνύουν την αλλαγή στην κατεύθυνση του διανύσματος των μετατοπίσεων σε διάφορα τμήματα περιμετρικά του υπόγειου ανοίγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την απόκλιση και συνεπώς την απομάκρυνση μεταξύ των άρρηκτων τεμαχών πετρώματος ανάμεσα στα επίπεδα ανισοτροπίας (joint opening), και τη δημιουργία περιοχών πιθανής αστάθειας (Wang, 2013). Οι μεταβολές αυτές των μετατοπίσεων παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1.3.1 για σήραγγα κυκλικής διατομής σε ανισότροπη βραχομάζα με κύριες ασυνέχειες κλίσης 30° .



Σχήμα 3.1.3.1 Μετατοπίσεις γύρω από κυκλική διατομή υπόγειας εκσκαφής σε ανισότροπη βραχομάζα με δύο σύνολα κύριων ασυνεχειών κλίσης 30° και -30° , για διάφορες τιμές του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων ($\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = 0.5, 1.0$ και 2.0): (a) Μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (u_r) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος, (b) Μέγεθος εφαπτομενικών μετατοπίσεων (u_θ) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος (Wang, 2013)

3.1.4 Διατμητική αντοχή ασυνεχειών

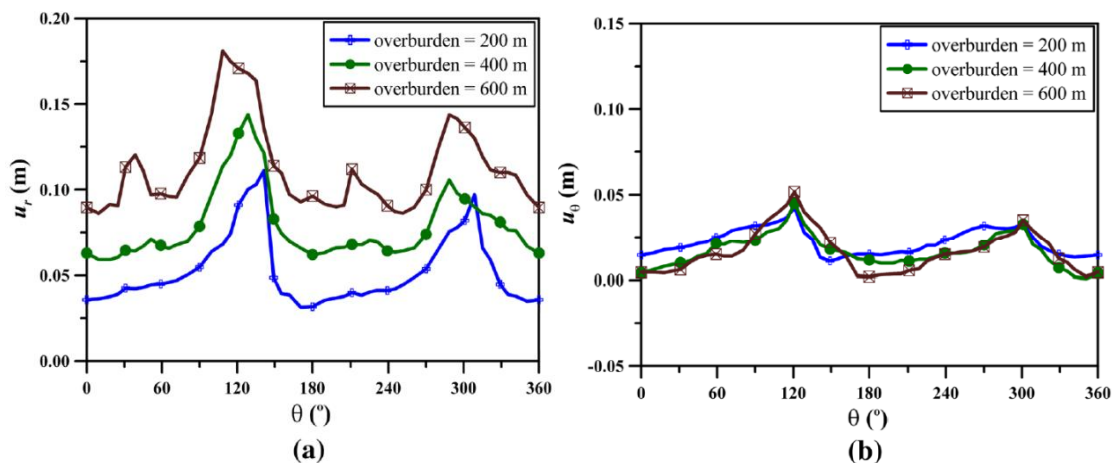
Ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ευστάθεια ενός υπόγειου έργου, εντός ανισότροπης βραχομάζας, είναι η αντοχή σε διάτμηση των κύριων ασυνεχειών που υπάρχουν στη δομή του πετρώματος. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής τους, υπολογίζεται ο συντελεστής τραχύτητας (Joint Roughness Coefficient, JRC), ο οποίος αξιολογεί το πόσο ανισόπεδες είναι οι επιφάνειες των ασυνεχειών. Πιο αναλυτικά, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του JRC τόσο πιο τραχιά χαρακτηρίζονται τα τοιχώματα των επιπέδων ανισοτροπίας μίας βραχομάζας και συνεπώς αναμένονται μικρότερες μετατοπίσεις λόγω ολίσθησής τους. Αυτό παρατηρείται καθώς η τραχύτητα αυξάνει τη συμπλοκή των τοιχωμάτων, δυσχεραίνοντας έτσι την ολίσθηση τους. Συνεπώς οποιαδήποτε διατμητική μετατόπιση θα πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη ορθή για την υπερπήδηση των ανωμαλιών της επιφανείας των ασυνεχειών. Όσο μειώνεται η τιμή του JRC, οι περιοχές γύρω από την υπόγεια εκσκαφή που επηρεάζονται και αστοχούν λόγω ολίσθησης των ασυνεχειών αυξάνονται σε αριθμό και μέγεθος, προκαλώντας εντονότερες παραμορφώσεις. Όταν η τιμή του συντελεστή τραχύτητας μειωθεί αισθητά, αυτές οι περιοχές έντονης παραμόρφωσης, επεκτείνονται και ενώνονται μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, η πλαστική ζώνη γύρω από το υπόγειο έργο αποκτά ανησυχητικές διαστάσεις και η αστάθεια της εκσκαφής τίθεται σε πολύ υψηλά επίπεδα (Wang, 2013). Στην Εικόνα 3.1.4.1 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις γύρω από κυκλική σήραγγα σε ανισότροπη βραχομάζα για διάφορες τιμές του δείκτη JRC των ασυνεχειών της.



Σχήμα 3.1.4.1 Μετατοπίσεις γύρω από κυκλική διατομή υπόγειας εκσκαφής σε ανισότροπη βραχομάζα με δύο σύνολα κύριων ασυνεχειών κλίσης 30° και -30° , για διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας (JRC = 8, JRC=12, JRC=16 και JRC=20): (a) Μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (u_r) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος, (b) Μέγεθος εφαπτομενικών μετατοπίσεων (u_θ) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος (Wang, 2013)

3.1.5 Βάθος διάνοιξης σήραγγας

Σημαντικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά ενός υπόγειου έργου εντός ανισότροπης βραχομάζας, έχει το βάθος στο οποίο πραγματοποιείται η διάνοιξή του. Συγκεκριμένα, οι ακτινικές μετατοπίσεις, που δημιουργούνται λόγω της εκσκαφής, είναι ανάλογες του βάθους διάνοιξης και αποκτούν υψηλότερες τιμές όσο η απόσταση του υπόγειου ανοίγματος από την επιφάνεια του εδάφους αυξάνεται (Σχ. 3.1.5.1a). Αντίθετα, οι εφαπτομενικές μετατοπίσεις δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή του πάχους των υπερκείμενων πετρωμάτων, όπως διακρίνεται στο Σχ. 3.1.5.1b. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται διότι οι εφαπτομενικές μετατοπίσεις προκαλούνται κυρίως λόγω αστοχίας των επιπέδων ανισοτροπίας (ολίσθηση ασυνεχειών), γεγονός το οποίο δεν εξαρτάται από τις θλιπτικές τάσεις που ασκούν τα υπερκείμενα πετρώματα του υπόγειου έργου, δηλαδή η πρόσθετη καταπόνηση σε θλίψη που προκαλεί η αύξηση του βάθους διάνοιξης. Ως εκ τούτου, για υδροστατικό εντατικό πεδίο, οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις που προκαλούνται λόγω ανισοτροπίας της βραχομάζας (παραμόρφωση ή/και ολίσθηση ασυνεχειών) στο περιβάλλον πέτρωμα μίας υπόγειας εκσκαφής, τείνουν να μειωθούν ελαφρώς όσο αυξάνεται το βάθος διάνοιξης (Wang, 2013). Συνεπώς, η αύξηση του πάχους των υπερκείμενων πετρωμάτων ενός υπόγειου έργου, δηλαδή η αύξηση του βάθους κατασκευής του, σηματοδοτεί υψηλότερες τάσεις εντατικού πεδίου οι οποίες προκαλούν εντονότερες παραμορφώσεις και τοπικές αστοχίες (Madkour, 2012).

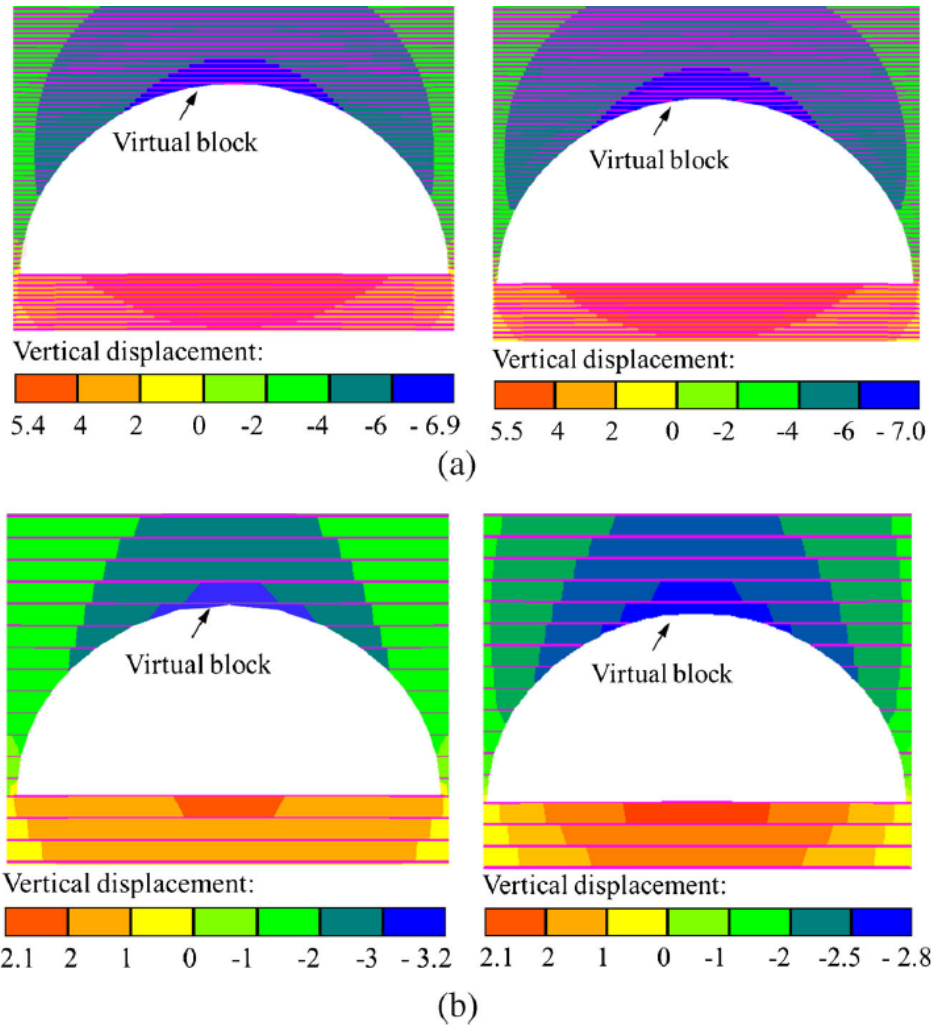


Σχήμα 3.1.5.1 Μετατοπίσεις γύρω από κυκλική διατομή υπόγειας εκσκαφής σε ανισότροπη βραχομάζα με δύο σύνολα κύριων ασυνεχειών κλίσης 30° και -30° , για διάφορα πάχη υπερκείμενων πετρωμάτων, δηλαδή βάθη διάνοιξης (overburden=200m, 400m και 600m): (a) Μέγεθος ακτινικών μετατοπίσεων (u_r) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος, (b) Μέγεθος εφαπτομενικών μετατοπίσεων (u_θ) στα διάφορα τμήματα (θ) της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος (Wang, 2013)

3.1.6 Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών μίας ανισότροπης βραχομάζας επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα μηχανικά χαρακτηριστικά της διότι καθορίζει το μέγεθος των τεμαχών άρρηκτου πετρώματος που υπάρχουν στη δομή της. Σε μία υπόγεια εκσκαφή, η αύξηση της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών είναι αντιστρόφως ανάλογη των προκαλούμενων μετατοπίσεων. Η αύξηση δηλαδή της απόστασης μεταξύ των επιπέδων ανισοτροπίας που χαρακτηρίζουν τη βραχομάζα, σηματοδοτεί τη μείωση των παραμορφώσεων του υπόγειου ανοίγματος καθώς το μέγεθος των τεμαχών άρρηκτου (υγιούς) πετρώματος στον περιβάλλοντα χώρο αυξάνεται και συνεπώς βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του (Εικόνα 3.1.6.1b). Αντίθετα, μικρότερη απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών αντιστοιχεί σε πιο ισχυρά διακλασμένη βραχομάζα και κατά συνέπεια χαμηλότερη μηχανική αντοχή. Ως αποτέλεσμα, η ζώνη παραμόρφωσης που δημιουργείται περιμετρικά της υπόγειας εκσκαφής ορίζεται σημαντικά μεγαλύτερη με τη μείωση της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών της περιβάλλουσας βραχομάζας (Εικόνα 3.1.6.1a) (Madkour, 2012, Zhang et al. 2020).

Τέλος, σημαντική παράμετρο αποτελεί η θέση του ορίου της εκσκαφής σε σχέση με τα επίπεδα των ασυνεχειών της περιβάλλουσας βραχομάζας, δηλαδή αν το όριο του υπόγειου ανοίγματος εφάπτεται με κάποιο επίπεδο ανισοτροπίας (Εικόνα 3.1.6.1a(αριστερά) & b(αριστερά)) ή αν βρίσκεται εντός στρώματος άρρηκτου πετρώματος (Εικόνα 3.1.6.1a(δεξιά) & b(δεξιά)). Στη δεύτερη περίπτωση, τα τεμάχια άρρηκτου πετρώματος πλησίον του σημείου τομής (του σημείου δηλαδή όπου το όριο της εκσκαφής τέμνει το στρώμα ακέραιου (άρρηκτου) πετρώματος) καθίστανται πιο επιρρεπή στο να υποστούν παραμορφώσεις και να αστοχήσουν κατά μήκος των παρακείμενων ασυνεχειών κατά τη διάνοιξη της υπόγειας εκσκαφής. Συνεπώς, η πλαστική ζώνη η οποία δημιουργείται γύρω από τη διατομή του υπόγειου έργου είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη ζώνη που αναπτύσσεται όταν η περιφέρεια του υπόγειου ανοίγματος εφάπτεται με κάποιο επίπεδο ασυνέχειας της περιβάλλουσας βραχομάζας (Zhang et al. 2020).



Εικόνα 3.1.6.1 Προκαλούμενη ζώνη παραμόρφωσης λόγω διάνοιξης υπόγειας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με οριζόντια επίπεδα κύριων ασυνεχειών, για δύο διαφορετικές τιμές απόστασης μεταξύ τους: (a) Ζώνη παραμόρφωσης για απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ίση με 10cm, Αριστερά: Άνω όριο εκσκαφής επαπτόμενο με επίπεδο ασυνέχειας, Δεξιά: Άνω όριο εκσκαφής τοποθετημένο εντός στρώματος άρρηκτου πετρώματος, (b) Ζώνη παραμόρφωσης για απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ίση με 90cm, Αριστερά: Άνω όριο εκσκαφής επαπτόμενο με επίπεδο ασυνέχειας, Δεξιά: Άνω όριο εκσκαφής τοποθετημένο εντός στρώματος άρρηκτου πετρώματος (Zhang et al. 2020)

3.1.7 Σύστημα ταξινόμησης RMR

Για την υλοποίηση ενός γεωτεχνικού έργου, πέρα από τη χρήση αριθμητών αναλύσεων και προσομοιώσεων (μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις και τις μελέτες των προηγούμενων κεφαλαίων), ο εμπειρικός προσδιορισμός των παραμέτρων της αντοχής της βραχομάζας, μέσω συστημάτων ταξινόμησής της, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος. Σκοπός αυτής της εκτίμησης των ποιοτικών και μηχανικών χαρακτηριστικών είναι ο διαχωρισμός της βραχομάζας σε κατηγορίες ποιότητας με κοινά (ή περίπου κοινά) μηχανικά χαρακτηριστικά. Μέσω αυτών των γεωτεχνικών διαχωρίσεων και ταξινομήσεων είναι δυνατή η συσχέτιση παρόμοιων γεωτεχνικών συνθηκών σε διαφορετικές περιοχές και η μεταφορά της εμπειρίας από προηγούμενα ολοκληρωμένα έργα για την υλοποίηση νέων σε παρόμοια γεωυλικά (Νομικός, 2015).

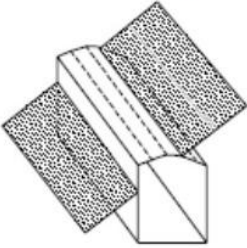
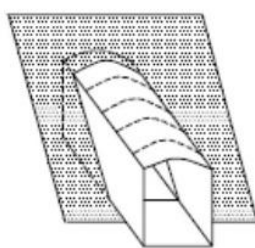
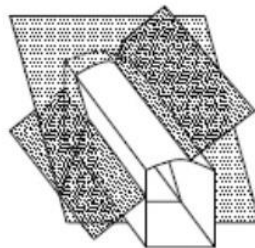
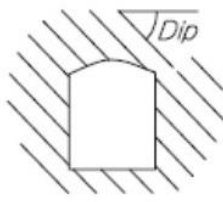
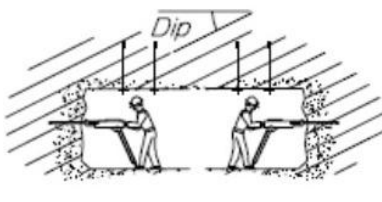
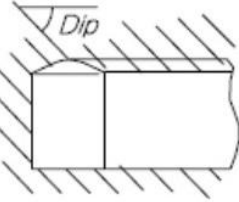
Ορισμένες γεωτεχνικές ταξινομήσεις παρέχουν πρακτικές οδηγίες για την ορθή διάνοιξη μίας υπόγειας εκσκαφής και τα απαιτούμενα μέτρα στήριξης του πετρώματος ανάλογα με την κατηγορία της βραχομάζας και τον προσανατολισμό των κύριων ασυνεχειών της. Μία από αυτές τις ταξινομήσεις είναι η RMR (Rock Mass Rating system), η οποία αναπτύχθηκε από τον Bieniawski (1989). Για την εφαρμογή της λαμβάνονται υπόψη έξι παράμετροι (Νομικός, 2015):

- 1) Η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, συγκεκριμένα η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του ή ο δείκτης σημειακής φόρτισης του πετρώματος.
- 2) Ο δείκτης RQD (Rock Quality Designation index) που αποτελεί το ποσοστό των αδιατάρακτων τεμαχών πετρώματος με μήκος μεγαλύτερο από 100mm στο συνολικό μήκος διάτρησης με πυρηνοληψία και όσο μεγαλύτερο είναι τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της βραχομάζας.
- 3) Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της βραχομάζας
- 4) Η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών όπως π.χ. από πληρωμένες ασυνέχειες με μαλακό υλικό πλήρωσης (δυσμενή κατάσταση) έως ασυνέχειες με πολύ τραχείες επιφάνειες και μη αποσαθρωμένα τοιχώματα (ευνοϊκή κατάσταση).
- 5) Οι συνθήκες υπόγειου νερού, με τις πιο ξηρές να αποτελούν και τις πιο ευνοϊκές.
- 6) Ο προσανατολισμός διεύθυνσης και κλίσης των συνεχειών και ιδιαίτερα των τεκτονικών στοιχείων για την ευστάθεια της υπόγειας εκσκαφής.

Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων προσδιορίζονται από αντίστοιχους κατάλληλους πίνακες. Το άθροισμα των τιμών των πρώτων πέντε παραμέτρων δίνει τη βασική τιμή

RMR_{BASIC} , η οποία κυμαίνεται από 0 έως 100, με τις υψηλότερες τιμές να αντιπροσωπεύουν υψηλότερης ποιότητας βραχομάζα. Η τιμή της RMR_{BASIC} θα πρέπει στη συνέχεια να διορθωθεί, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών. Για τη διόρθωση αυτή, η βραχομάζα βαθμονομείται ως προς την παράμετρο (6) με βάση ποιοτικές περιγραφές της επίδρασης του προσανατολισμού των ασυνεχειών (πολύ δυσμενής, δυσμενής, ευμενής κλπ.). Ο όρος «προσανατολισμός» περιλαμβάνει την κλίση και τη διεύθυνση των ασυνεχειών. Η κλίση προκύπτει από τη γωνία μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και του επιπέδου της ασυνέχειας, ενώ η διεύθυνση προσδιορίζεται με βάση το μαγνητικό Βορρά. Η διόρθωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια σχετικού πίνακα, που δίνεται από τον Bieniawski (1989, Πίνακας 3.1.7.1).

Κλίση της παράταξης των ασυνεχειών ως προς τον άξονα της σήραγγας

Παράλληλη		Κάθετη		Ανεξάρτητα		
						
						
Παράταξη παράλληλη στον άξονα της σήραγγας		Παράταξη κάθετη στον άξονα της σήραγγας				Ανεξάρτητα από την παράταξη
Κλίση $20^{\circ}-45^{\circ}$	Κλίση $45^{\circ}-90^{\circ}$	Διάνοιξη σύμφωνα με την κλίση των ασυνεχειών		Διάνοιξη αντίθετα από την κλίση των ασυνεχειών		Κλίση $0^{\circ}-20^{\circ}$
Μέτρια	Πολύ δυσμενής	Κλίση $45^{\circ}-90^{\circ}$	Κλίση $20^{\circ}-45^{\circ}$	Κλίση $45^{\circ}-90^{\circ}$	Κλίση $20^{\circ}-45^{\circ}$	Μέτρια
		Πολύ ευμενής	Ευμενής	Μέτρια	Δυσμενής	

Πίνακας 3.1.7.1 Επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στη διάνοιξη σήραγγας (Bieniawski, 1989)

	Πολύ Ευμενής	Ευμενής	Μέτρια	Δυσμενής	Πολύ Δυσμενής
Σήραγγες και μεταλλεία	0	-2	-5	-10	-12

Πίνακας 3.1.7.2 Προσαρμογή της τιμής RMR_{BASIC} με βάση την επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στην διάνοιξη σήραγγας (Bieniawski, 1989)

Συνεπώς, εάν οι ασυνέχειες είναι ευνοϊκά προσανατολισμένες σε σχέση με την κατεύθυνση της διάνοιξης της σήραγγας (Πολύ Ευμενής), η τιμή RMR_{BASIC} παραμένει σταθερή, ενώ εάν είναι πολύ δυσμενώς προσανατολισμένες (Πολύ δυσμενής) η τιμή RMR_{BASIC} μειώνεται κατά 12 μονάδες.

Η τελική τιμή του RMR προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τιμών των πέντε πρώτων παραμέτρων και της διόρθωσης αυτού του αθροίσματος με βάση την επίδραση του προσανατολισμού των ασυνεχειών στο πέτρωμα. Αναλόγως αυτής της τελικής τιμής του RMR, η βραχομάζα μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις ακόλουθες πέντε κατηγορίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.7.3.

RMR	Κατηγορία Βραχομάζας
100-81(I)	Πολύ Καλή
80-61(II)	Καλή
60-41(III)	Μέτρια
40-21(IV)	Πτωχή
<20(V)	Πολύ Πτωχή

Πίνακας 3.1.7.3 Χαρακτηρισμός βραχομάζας με βάση την τιμή RMR που της αντιστοιχεί (Bieniawski, 1989)

Τέλος, με βάση την κατηγορία της βραχομάζας προτείνεται μέθοδος διάνοιξης της σήραγγας και σχεδιασμός του μόνιμου συστήματος υποστήριξης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.7.4. Επισημαίνεται ωστόσο, ότι αυτά τα προτεινόμενα μέτρα αντιστήριξης και οι μέθοδοι κατασκευής της σήραγγας αποτελούν ενδεικτικές υποδείξεις για μια αρχική μελέτη και θεωρητική προσέγγιση του υπόγειου γεωτεχνικού έργου. Για τον τελικό σχεδιασμό και την πρακτική εφαρμογή του, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν περαιτέρω δοκιμές και αναλύσεις ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η επιτυχής εκτέλεση των εργασιών της υπόγειας εκσκαφής.

Σχήμα: Πεταλοειδής. Μέση διάμετρος εκσκαφής: 10m. Κατακόρυφες τάσεις: <25Mpa (βάθος<900m). Μέθοδος διάνοιξης: Διάτρηση και ανατίναξη.				
		Εναλλακτικά συστήματα υποστήριξης σε κατασκευή με συμβατικά μέσα		
Κατηγορία βραχομάζας	Μέθοδος διάνοιξης	Ηλώσεις (διάμετρος 20mm με πλήρη πάκτωση)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	Μεταλλικά πλαίσια
I	Ολομέτωπη εκσκαφή. Βήμα εκσκαφής 3m.	Δεν απαιτείται καμία υποστήριξη εκτός από περιπτώσιακές σημειακές επί τόπου αγκυρώσεις.		
II	Ολομέτωπη εκσκαφή. Βήμα εκσκαφής 1-1,5m. Ολοκλήρωση υποστήριξης 20m από το μέτωπο.	Τοπικά, ηλώσεις στην οροφή μήκους 3m με αραιώση 2,5m και κατά περίπτωση πλέγμα.	50mm στην οροφή όπου χρειάζεται.	Κανένα
III	Εκσκαφή μετώπου και βαθμίδα, εκσκαφή πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1,5-3m. Έναρξη υποστήριξης μετά από κάθε ανατίναξη. Ολοκλήρωση υποστήριξης 10m από το μέτωπο.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4m, με αραιώση 1,5-2m στην οροφή και τους τοίχους και πλέγμα στην οροφή.	50-100mm στην οροφή και 30mm στις πλευρές.	Κανένα
IV	Εκσκαφή μετώπου και βαθμίδα, εκσκαφή πρώτα στο ανώτερο τμήμα κατά 1-1,5m. Τοποθέτηση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Ολοκλήρωση υποστήριξης 10m από το μέτωπο.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 4-5m, με αραιώση 1-15m στην οροφή και τους τοίχους με πλέγμα.	100-150mm στην οροφή και 100mm στις πλευρές.	Ελαφρά προς μέσα πλαίσια με αραιώση 1,5m όπου απαιτείται.
V	Τμηματική εκσκαφή πολλαπλών φάσεων. Βήμα εκσκαφής στο ανώτερο τμήμα 0,5-1,5m. Τοποθέτηση υποστήριξης συγχρόνως με την εκσκαφή. Εφαρμογή σκυροδέματος όσο το δυνατόν γρηγορότερα μετά από κάθε ανατίναξη.	Συστηματικές ηλώσεις μήκους 5-6m, με αραιώση 1-1,5m στην οροφή και στα τοιχώματα και χαλύβδινο πλέγμα. Ήλωση του ανάστροφου τόξου.	150-200mm στην οροφή, 150mm στις πλευρές και 50mm στο μέτωπο.	Μέσα προς βαριά, με αραιώση 0,75m με επικάλυψη λαμαρίνας και στήριξη του μετώπου. Κλείσιμο του αντίστροφου τόξου.

Πίνακας 3.1.7.4 Προτεινόμενες μέθοδοι διάνοιξης και υποστήριξης σήραγγας με βάση την κατηγορία βραχομάζας κατά RMR (Bieniawski, 1989)

3.2 Διασταύρωση σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα

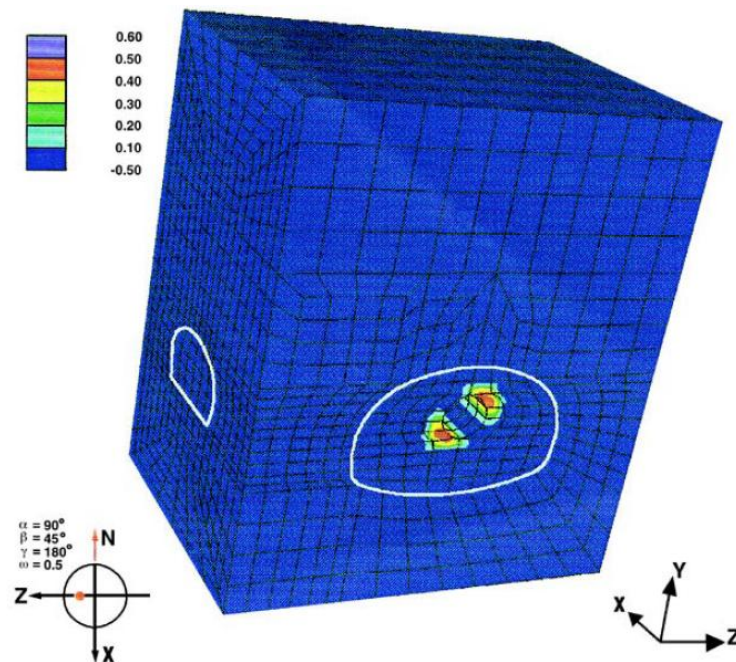
Στο υποκεφάλαιο 3.1 εξετάστηκε η διάνοιξη σήραγγας σε ανισότροπη βραχομάζα, γεωτεχνικό έργο το οποίο έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολλών μηχανικών και επιστημόνων. Έχουν αναλυθεί τα στοιχεία του περιβάλλοντα χώρου (όπως ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων και το πάχος των υπερκείμενων πετρωμάτων της σήραγγας) που καθιστούν αποτελεσματική ή μη την ολοκλήρωση της υπόγειας εκσκαφής, καθώς και οι παράμετροι της ανισότροπης βραχομάζας που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά και την ευστάθεια του έργου (όπως η κλίση, ο αριθμός και η αντοχή των ασυνεχειών). Ωστόσο, όσον αφορά το θέμα της διασταύρωσης σηράγγων εντός ανισότροπης βραχομάζας, δεν έχει διεξαχθεί αντίστοιχη εκτενής μελέτη και η σχετική βιβλιογραφία είναι περιορισμένη.

Οι Swoboda et al. (1998) πραγματοποίησαν μία από τις λίγες αναλύσεις στο θέμα της διασταύρωσης σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα. Συγκεκριμένα, μελέτησαν τη σήραγγα Schönberg, στο Salzburg της Αυστρίας, σε τμήμα της όπου διασταυρώνεται με δευτερεύουσα σήραγγα εξόδου κινδύνου/διαφυγής μικρότερης διατομής. Η σήραγγα διανοίχθηκε σε έντονα διακλασμένο φυλλίτη με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης (β) 45° , διεύθυνση κλίσης (α) 90° και διεύθυνση παράταξης (γ) 180° .

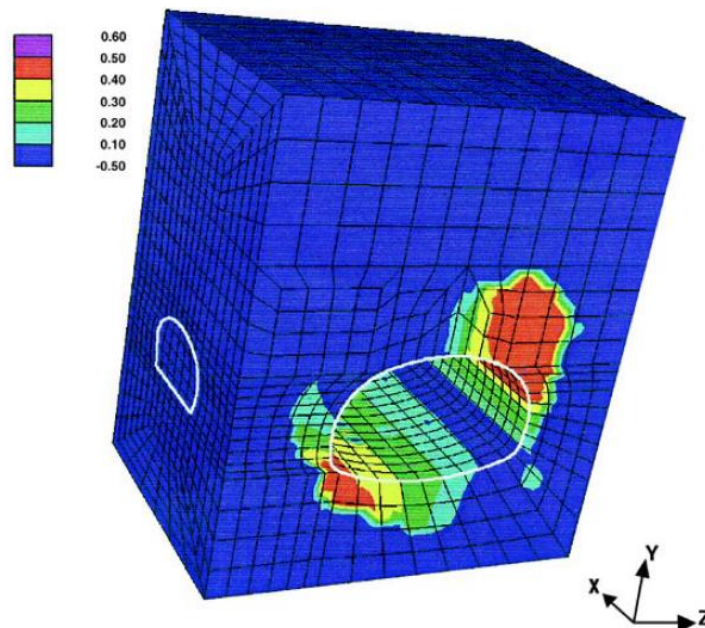
Αρχικά, πριν τη διάνοιξη της σήραγγας, λόγω επιβολής των τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου, οι ασυνέχειες της βραχομάζας διατηρούνται σταθερές, δίχως να ολισθαίνουν ή να παρουσιάζουν φαινόμενο ανοίγματος των τοιχωμάτων τους (joint opening). Ωστόσο, κατά τη διάνοιξη της κύριας σήραγγας αρχίζουν να παρατηρούνται φαινόμενα ολίσθησης και απομάκρυνσης μεταξύ των άρρηκτων τεμαχών πετρώματος ανάμεσα στα επίπεδα ανισοτροπίας. Οι μετατοπίσεις αυτές εντοπίζονται στις περιοχές όπου οι κύριες ασυνέχειες αναπτύσσονται παράλληλα στη διατομή του υπόγειου ανοίγματος, όπως αναλύθηκε και στα υποκεφάλαια 3.1.2 και 3.1.3. Το αρχικό αυτό στάδιο της εκσκαφής με τις προκαλούμενες μετατοπίσεις απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.1.

Καθώς προχωράει η διάνοιξη της κύριας σήραγγας και μέχρι την ολοκλήρωσή της, η παραμόρφωση της περιβάλλουσας βραχομάζας αναπτύσσεται κατά την ίδια διεύθυνση, δηλαδή κατά τη διεύθυνση που οι κύριες ασυνέχειες εφάπτονται με τα όρια της υπόγειας εκσκαφής (Εικόνα 3.2.2.). Κατά τη διάνοιξη της δευτερεύουσας σήραγγας παρατηρείται η αποφόρτιση του πετρώματος σε ευρεία περιοχή γύρω από την εκσκαφή και πιο έντονα στο τμήμα της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας το οποίο τέμνεται με το πλευρικό τοίχωμα

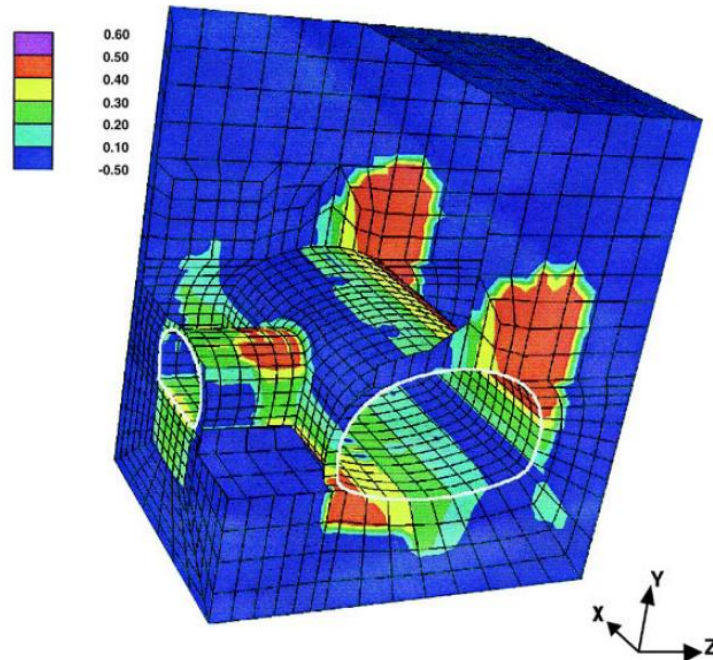
της κύριας, στην περιοχή της διασταύρωσής τους. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται για τους ίδιους ακριβώς λόγους που εξετάστηκαν στο υποκεφάλαιο 2.1 και απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.3. Οι προκαλούμενες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις δεν επεκτείνονται ιδιαίτερα πέρα από τα σημεία τομής του ορίου της εκσκαφής με τα επίπεδα των ασυνεχειών λόγω της έντονης ανισοτροπίας της περιβάλλουσας βραχομάζας.



Εικόνα 3.2.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά τα αρχικά στάδια διάνοιξης της κύριας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 45° και διεύθυνση κλίσης 90° (Swoboda, 1998)



Εικόνα 3.2.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά την ολοκλήρωση της διάνοιξης της κύριας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 45° και διεύθυνση κλίσης 90° (Swoboda, 1998)



Εικόνα 3.2.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης κύριας και δευτερεύουσας σήραγγας εντός ανισότροπης βραχομάζας με σύνολο κύριων ασυνεχειών κλίσης 45° και διεύθυνση κλίσης 90° (Swoboda, 1998)

Η παραπάνω ανάλυση της προκαλούμενης καταπόνησης στην περιοχή διασταύρωσης δύο σηράγγων εντός ανισότροπης βραχομάζας, αποτελεί μία από τις λιγοστές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για το συγκεκριμένο θέμα. Ωστόσο, η ανισοτροπία στη δομή των πετρωμάτων αποτελεί πολύ συχνό φαινόμενο και συναντάται σε μεγάλο βαθμό στις γεωλογικές δομές της φύσης. Αντίστοιχα, η τομή υπόγειων εκσκαφών παρατηρείται πλέον σε υψηλό ποσοστό καθώς η κατασκευή υπόγειων γεωτεχνικών έργων έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία έτη λόγω της υψηλής περιβαλλοντικής προστασίας που προσφέρουν σε σχέση με τις επιφανειακές κατασκευές. Συνεπώς, η διασταύρωση σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα αποτελεί όλο και πιο συχνή περίπτωση υπόγειου γεωτεχνικού έργου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έλλειψη σχετικής βιβλιογραφίας και μελετών, αποτέλεσε το κίνητρο για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιώντας τρισδιάστατες προσομοιώσεις κάθετης διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων με τη χρήση του λογισμικού FLAC3D.

4 Λογισμικό αριθμητικών μοντελοποιήσεων FLAC3D

Ο σχεδιασμός ενός γεωτεχνικού έργου μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση αναλυτικών λύσεων, μεθόδων παρατήρησης και συστημάτων ταξινόμησης καθώς και με την εφαρμογή αριθμητικών αναλύσεων. Οι αριθμητικές αναλύσεις, λόγω της βαθμιαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αποτελούν πλέον τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επίλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων, καθώς προσφέρουν κατά κανόνα μεγαλύτερη αξιοπιστία και ταχύτητα (Hoek et al., 1991). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αριθμητικές αναλύσεις επιτυγχάνουν τη βέλτιστη προσέγγιση της συμπεριφοράς της βραχομάζας καθώς προσομοιώνουν το σύνολο όλων των δομικών χαρακτηριστικών της.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αριθμητικών αναλύσεων οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (Αγιουτάντης, 2010):

- Μέθοδοι που θεωρούν το πέτρωμα ως (ισοδύναμο) συνεχές μέσο.
- Μέθοδοι που θεωρούν το πέτρωμα, καθ' όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής διαδικασίας, ως ασυνεχές μέσο αποτελούμενο από ένα σύνολο διακεκριμένων τεμαχών που διαχωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες.
- Μέθοδοι που συνδυάζουν τις δύο προηγούμενες κατηγορίες και χαρακτηρίζονται ως υβριδικές.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – F.E.M.), των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method – F.D.M.) και των Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method – B.E.M.). Στη δεύτερη ανήκει η μέθοδος των Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method – D.E.M.), ενώ στην τρίτη ανήκουν μέθοδοι που συνδυάζουν τις παραπάνω (Αγιουτάντης, 2010).

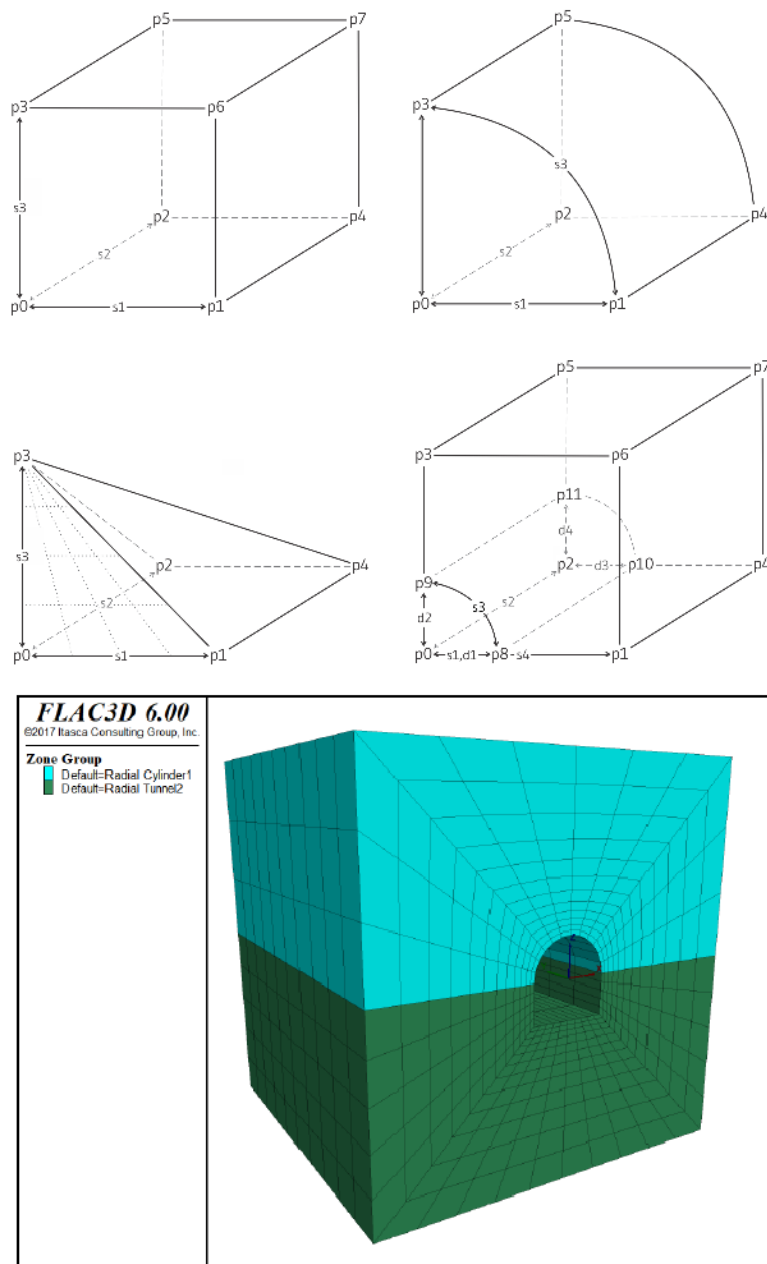
Το λογισμικό FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), της εταιρίας Itasca Consulting Group, Inc αποτελεί τρισδιάστατο πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων, το οποίο λειτουργεί με βάση τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (F.D.M.).

4.1 Γενικά στοιχεία και δημιουργία μοντέλου

Το FLAC3D χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση και το σχεδιασμό τεχνικών έργων σε εδάφη, πετρώματα και ευρύτερα γεωλογικές δομές καθώς είναι σχεδιασμένο για την αντιμετώπιση οποιουδήποτε προβλήματος γεωτεχνικής φύσεως που απαιτεί ανάλυση συνεχούς μέσου. Αυτό το επιτυγχάνει καθώς λειτουργεί σύμφωνα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών. Κατά τη μέθοδο αυτή, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους (nodes), οι οποίοι δημιουργούνται από τη διαίρεση του πεδίου προς εξέταση σε νοητά στοιχεία. Σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, το πεδίο δε διαιρείται σε στοιχεία, αλλά καλύπτεται από κόμβους που ορίζονται σε αυτό. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η τιμή των ζητούμενων μεγεθών σε κάθε κόμβο του πεδίου, με τη θεώρηση κατάλληλης συνάρτησης, η οποία συνδέει τα ζητούμενα αυτά μεγέθη. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται αναπτύσσεται κατά Lagrange και με την εφαρμογή της (κάτω από σχετικούς περιορισμούς περί συνέχειας των παραγώγων της συνάρτησης), μπορεί να υπολογιστεί η τιμή των ζητούμενων μεγεθών σε σημείο το οποίο βρίσκεται πλησίον σε σημείο για το οποίο είναι γνωστή η τιμή της συνάρτησης (Itasca, 2017).

Το λογισμικό προσομοιώνει τη συμπεριφορά κατασκευών ή υπόγειων έργων σε εδαφικούς ή βραχώδεις σχηματισμούς ή σε άλλα υλικά που συμπεριφέρονται πλαστικά όταν ξεπεράσουν το όριο διαρροής τους. Τα υλικά αυτά, αναπαριστώνται από ζώνες, οι οποίες σχηματίζουν έναν κάνναβο που τροποποιείται από τον χρήστη, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η γεωμετρία του προβλήματος προς μοντελοποίηση. Η κάθε ζώνη συμπεριφέρεται ανάλογα με την ορισμένη γραμμική ή μη γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης, αποκρινόμενη στις ασκούμενες δυνάμεις και στους πλευρικούς περιορισμούς. Το υλικό μπορεί να διαρρεύσει και ο κάνναβος μπορεί να παραμορφωθεί σύμφωνα με τις μετατοπίσεις του υλικού. Ο σαφής σχεδιασμός των υπολογισμών κατά Lagrange και η τεχνική της μικτής διακριτοποίησης των ζωνών που χρησιμοποιείται στο λογισμικό FLAC3D εξασφαλίζουν ότι η πλαστική αστοχία και διαρροή προσομοιώνονται με μεγάλη ακρίβεια. Τα μειονεκτήματα της ακρίβειας των υπολογισμών (π.χ. μικρό όριο χρονικού βήματος) καταβάλλονται έως ένα σημείο από την αυτόματη κλιμάκωση της αδράνειας και τις αποσβέσεις που δεν επηρεάζουν το μηχανισμό της αστοχίας (Πριμέτης, 2020).

Με βάση τη γεωμετρία της περιβάλλουσας βραχομάζας, τους εδαφικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό προσομοίωση έργου, κατασκευάζεται πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, αποτελούμενο από τρισδιάστατα στοιχεία τα οποία μπορεί να διαμορφώσει ο ίδιος ο χρήστης ή είναι προκαθορισμένου σχήματος, όπως κύβους, τεταρτημόρια κυλίνδρων, πυραμίδες κ.α., καθώς και συνδυασμοί αυτών. Στο Σχ. 4.1.1 παρουσιάζονται ορισμένα τρισδιάστατα στοιχεία για την κατασκευή ενός μοντέλου στο λογισμικό FLAC3D καθώς και ένα τυπικό μοντέλο υπόγειας εκσκαφής που συνδυάζει ορισμένα από τα παραπάνω στοιχεία.



Σχήμα 4.1.1 Τρισδιάστατα στοιχεία για την κατασκευή μοντέλων στο FLAC3D και τυπικό παράδειγμα σχεδιασμού σήραγγας με την χρήση και το συνδυασμό των παραπάνω στοιχείων (Itasca, 2017)

4.2 Μοντελοποίηση μέτρων υποστήριξης

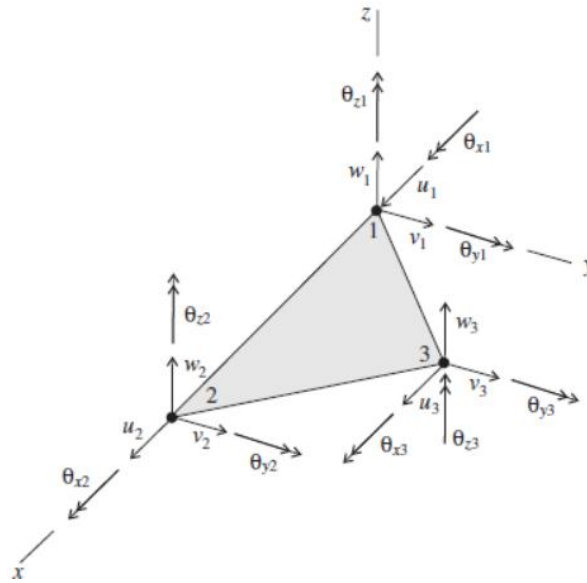
Κατά την προσομοίωση ενός υπόγειου έργου, πέρα από τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντα χώρου και της εκσκαφής, πρέπει να μοντελοποιηθούν αντίστοιχα και τα μέτρα υποστήριξης του υπόγειου ανοίγματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέσου υποστήριξης της διασταύρωσης των σηράγγων, το οποίο προσομοιώνεται ως στοιχείο κελύφους (shell element).

Κάθε δομικό στοιχείο κελύφους (shell element) θεωρείται ως ένα τρίγωνο, ομοιόμορφου πάχους που εκτείνεται μεταξύ τριών κόμβων και καθορίζεται από τη γεωμετρία του και τις ιδιότητες του υλικού που έχει καθορίσει ο χρήστης. Όταν αναπτύσσεται ως καμπύλο στοιχείο (όπως στα τοιχώματα μίας κυκλικής σήραγγας) μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πολύπλευρη επιφάνεια που συντίθεται από πολυάριθμα μικρότερα δομικά στοιχεία κελύφους. Κάθε τέτοιο στοιχείο συμπεριφέρεται ως ένα ισότροπο ή ανισότροπο, γραμμικά ελαστικό υλικό χωρίς όριο αστοχίας. Αυτού του τύπου τα στοιχεία, μπορούν να προσομοιωθούν με πολύ μικρό πάχος και είναι κατάλληλα για την μοντελοποίηση λεπτών υλικών (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα), στις οποίες οι μετακινήσεις από διατμητικές παραμορφώσεις μπορούν να αγνοηθούν (Itasca, 2017).

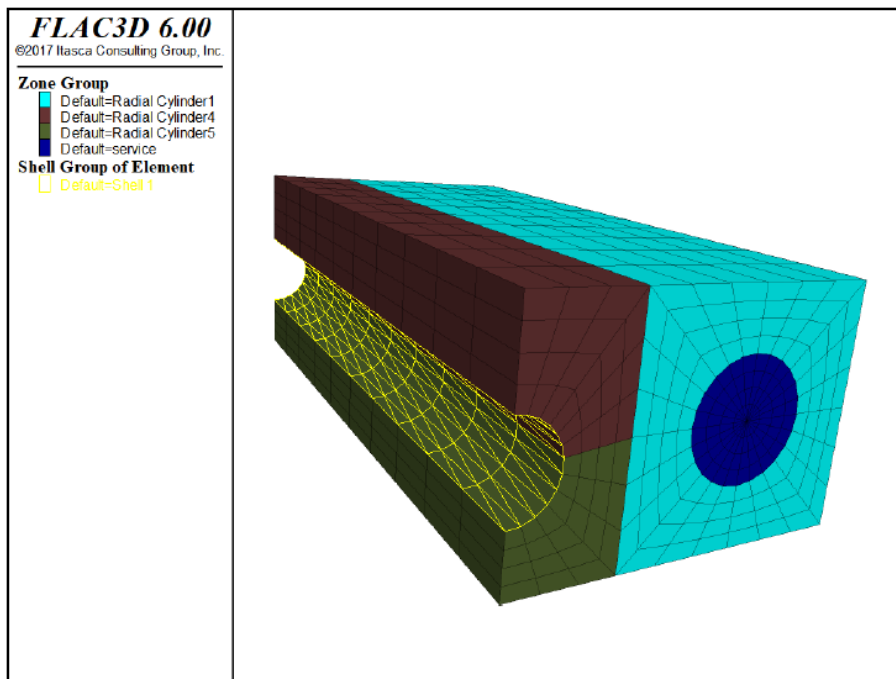
Κάθε δομικό στοιχείο κελύφους έχει το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2.1. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα ξεχωριστό σύστημα συντεταγμένων για να προσδιορίσει τις ορθότροπες ιδιότητες του υλικού και ένα άλλο για να καταγράψει τις ασκούμενες τάσεις. Το σύστημα συντεταγμένων σε αυτού του τύπου τα δομικά στοιχεία καθορίζεται από τη θέση των τριών κόμβων, 1, 2 και 3, όπως διακρίνονται στο Σχ. 4.2.1, και καθορίζεται με σκοπό (Itasca, 2017):

1. Το δομικό στοιχείο να βρίσκεται στο επίπεδο $x - y$.
2. Ο άξονας x να έχει κατεύθυνση από τον κόμβο 1 στον κόμβο 2.
3. Ο άξονας z να είναι κάθετος στο επίπεδο του δομικού στοιχείου και θετικός στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους.

Στην Εικόνα 4.2.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής στοιχείων κελύφους ως τοποθετημένο σύστημα υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) στα τοιχώματα μίας κυκλικής σήραγγας. Διακρίνεται με κίτρινο χρώμα το τριγωνικό σχήμα των στοιχείων κελύφους που σχηματίζονται μεταξύ τριών κόμβων.



Σχήμα 4.2.1 Απεικόνιση στοιχείου κελύφους με το αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων του. Διακρίνονται οι δεκαοχτώ ενεργοί βαθμοί ελευθερίας του (Itasca, 2017)

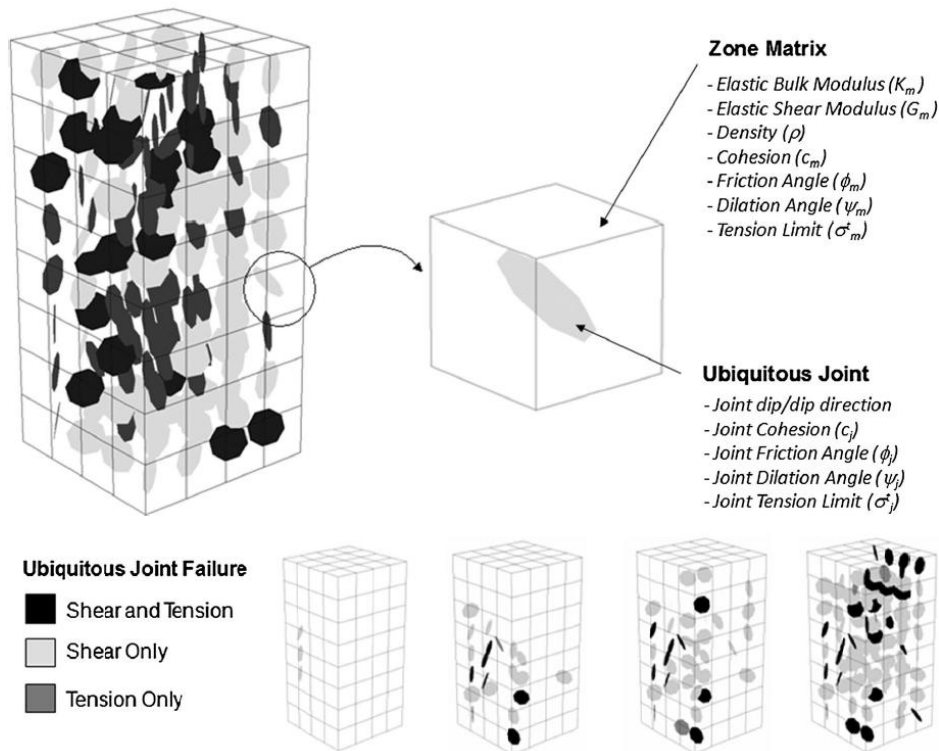


Εικόνα 4.2.1 Παράδειγμα εφαρμογής στοιχείων κελύφους (Shell Group of Element) ως σύστημα επένδυσης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) σε σήραγγα κυκλικής διατομής (Itasca, 2017)

4.3 Προσομοίωση ανισότροπης βραχομάζας

Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνικές μοντελοποίησης ασυνεχούς μέσου (discontinuum modeling techniques) που μπορούν να προσομοιώσουν επίπεδα ασυνεχειών εντός μίας ανισότροπης βραχομάζας. Ωστόσο, οι αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις αυτών των τεχνικών, που αποσκοπούν στη λεπτομερή προσομοίωση του συνόλου των ασυνεχειών ολόκληρης της βραχομάζας, τις καθιστούν μη πρακτικές όσον αφορά τυπικές αναλύσεις (routine analysis) εκσκαφών μεγάλης κλίμακας. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι υπολογιστικοί περιορισμοί, το μοντέλο Ubiquitous-Joint, βασισμένο στη θεωρία του συνεχούς μέσου (continuum-based), χρησιμοποιείται ευρέως για τη μοντελοποίηση της ανισότροπης βραχομάζας (Sainsbury, 2017).

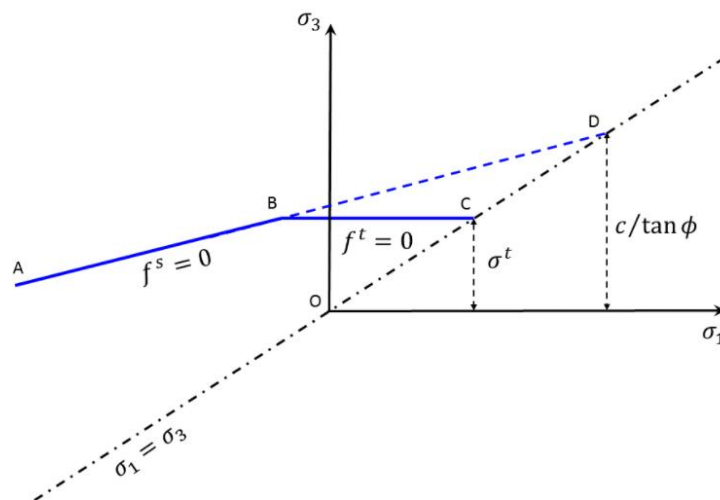
Το μοντέλο Ubiquitous-Joint προσομοιώνει την ανισοτροπία ενός υλικού που χαρακτηρίζεται από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Σε κάθε ζώνη του δημιουργούμενου μοντέλου αντιστοιχεί ένα επίπεδο ανισοτροπίας στο οποίο μπορεί να αποδοθεί ένας διαφορετικός προσανατολισμός, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.3.1.



Σχήμα 4.3.1 Προσομοίωση ανισότροπης βραχομάζας με το μοντέλο Ubiquitous-Joint. Διακρίνονται οι ζώνες του μοντέλου που αποτελούν το άρρηκτο πέτρωμα (Zone Matrix) και εντός αυτών ορίζεται ένα επίπεδο ανισοτροπίας (Ubiquitous Joint) με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Με ανοιχτό γκρι χρώμα απεικονίζονται τα επίπεδα ανισοτροπίας που έχουν αστοχήσει σε διάτμηση (Shear), με σκούρο γκρι σε εφελκυσμό (Tension) και με μαύρο τόσο σε διάτμηση όσο και σε εφελκυσμό (Sainsbury, 2017).

Συνεπώς, ένα μοντέλο Ubiquitous-Joint αποτελείται από δύο είδη δομικών στοιχείων, το υλικό που αντιστοιχεί σε κάθε ζώνη του μοντέλου (Zone Matrix), και τα επίπεδα της ανισοτροπίας (Ubiquitous Joints) εντός αυτών των ζωνών (Σχ. 4.3.1). Και τα δύο αυτά στοιχεία υπακούνε, όσον αφορά την αστοχία τους, στο κριτήριο Mohr - Coulomb το οποίο περιλαμβάνει μία σύνθετη επέκταση για έλεγχο αστοχίας και σε εφελκυσμό. Αρχικά πραγματοποιείται μελέτη για γενική αστοχία του υλικού και εφαρμόζονται σχετικές διορθώσεις, ενώ στη συνέχεια οι ασκούμενες τάσεις αναλύονται ως προς τα επίπεδα της ανισοτροπίας και εξετάζεται η αστοχία των ασυνεχειών (Itasca, 2017).

Όσον αφορά το υλικό των ζωνών του μοντέλου, στο Σχ. 4.3.2 απεικονίζεται γραφικά, στο επίπεδο (σ_1, σ_3) , το κριτήριο αστοχίας του, όπου $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$ αποτελούν τις κύριες τάσεις που ασκούνται στη ζώνη προς εξέταση. Σημειώνεται ότι, στον κώδικα FLAC3D οι θλιπτικές τάσεις είναι αρνητικές και οι εφελκυστικές θετικές. Ως εκ τούτου, η αποκοπή του κριτηρίου για ελάχιστη κύρια τάση σ_3 ίση με την εφελκυστική αντοχή του υλικού, απεικονίζεται στην περιοχή του 1^{ου} τεταρτημορίου του διαγράμματος $\sigma_1 - \sigma_3$.



Σχήμα 4.3.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb του μοντέλου Ubiquitous-Joint (Itasca, 2017)

Η περίπτωση αστοχίας $f(\sigma_1, \sigma_3)=0$ λόγω εντατικού επιπέδου που αντιστοιχεί στο τμήμα AB ορίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb $f^s=0$:

$$f^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\phi - 2c \sqrt{N_\phi}$$

ενώ για το τμήμα BC εφαρμόζεται η επέκταση του κριτηρίου για αστοχία σε εφελκυσμό, της μορφής $f^t = 0$:

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t$$

όπου, οι δείκτες s και t των συναρτήσεων f αντιστοιχούν στη διάτμηση (shear), η οποία αποτελεί τη βάση του κριτηρίου Mohr-Coulomb, και στον εφελκυσμό (tension) όπου βασίζεται η επέκτασή του, αντίστοιχα. Επίσης, φ, c και σ^t αποτελούν τη γωνία εσωτερικής τριβής, τη συνοχή και την εφελκυστική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος αντίστοιχα. Με σ_3 συμβολίζεται, όπως αναλύθηκε παραπάνω, η ελάχιστη κύρια τάση που ασκείται και ο όρος N_φ ορίζεται ως:

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

Σημειώνεται ότι η εφελκυστική αντοχή του υλικού δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης (σ_3) που αντιστοιχεί στο σημείο τομής των ευθειών $f^s = 0$ και $\sigma_1 = \sigma_3$ (Σχ. 4.3.2). Αυτή η μέγιστη τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό δίνεται από τη σχέση (Itasca, 2017):

$$\sigma_{max}^t = \frac{c}{\tan\varphi}$$

Συνεπώς, υπάρχουν δύο είδη αστοχίας που μπορούν να προκύψουν στο μοντελοποιημένο υλικό, ένα σε διάτμηση και ένα σε εφελκυσμό. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί δύο εξισώσεις, g^s και g^t , οι οποίες χαρακτηρίζουν τη διατμητική και εφελκυστική πλαστική ροή του μοντέλου (shear and tensile plastic flow), αντίστοιχα. Όσον αφορά τη διατμητική πλαστική ροή, η εξίσωσή g^s ορίζεται ως:

$$g^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\psi$$

όπου ψ είναι η γωνία διασταλτικότητας και ο όρος N_ψ ισούται με:

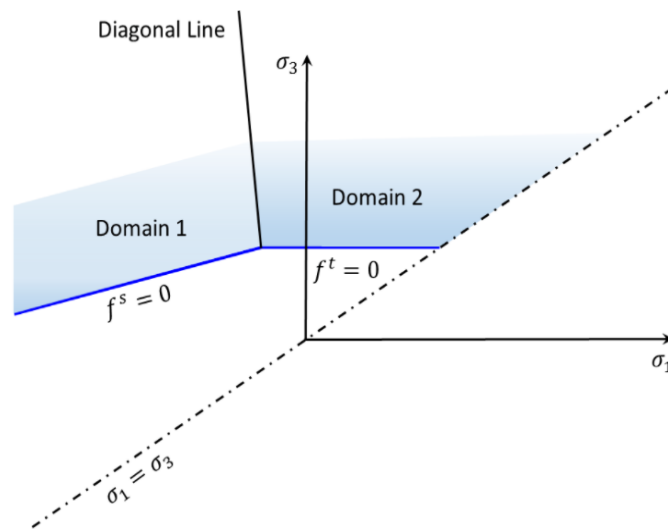
$$N_\psi = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)}$$

Η g^t αντιστοιχεί σε συνθήκη εφελκυστικής πλαστικής ροής και ισούται με (Itasca, 2017):

$$g^t = f^t = \sigma_3 - \sigma^t$$

Η διαγώνιος των εξισώσεων f^s και f^t (Diagonal Line), όπως διακρίνεται στο Σχ. 4.3.3, διαχωρίζει στο επίπεδο (σ_1, σ_3) δύο τομείς, τον τομέα 1 (Domain 1) και τον τομέα 2 (Domain 2). Στους τομείς αυτούς εντάσσονται οι εντατικές συνθήκες, ως αντιπροσωπευτικά σημεία (σ_1, σ_3) (stress points), που αντιστοιχούν σε ελαστικές συμπεριφορές, οι οποίες παραβιάζουν τα κριτήρια αστοχίας του μοντέλου. Αν το

αντιπροσωπευτικό σημείο βρίσκεται στον τομέα 1, τότε ορίζεται αστοχία σε διάτμηση και η εντατική κατάσταση, με αντίστοιχες διορθώσεις που καθορίζονται από τον κανόνα πλαστικής ροής της εξίσωσης g^s , μετατοπίζεται στη γραμμή $f^s=0$ (ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας). Αν το σημείο εντοπίζεται στον τομέα 2, τότε πρόκειται για αστοχία σε εφελκυσμό και το αντιπροσωπευτικό σημείο της εντατικής κατάστασης συμμορφώνεται με αντίστοιχες διορθώσεις, από τον κανόνα ροής που χαρακτηρίζεται από την εξίσωση g^t , στο κριτήριο αστοχίας $f^t = 0$ (Itasca, 2017).



Σχήμα 4.3.3 Γραφική απεικόνιση των τομέων διατμητικής (Domain 1) και εφελκυστικής (Domain 2) πλαστικής ροής του μοντέλου Mohr-Coulomb (Itasca, 2017)

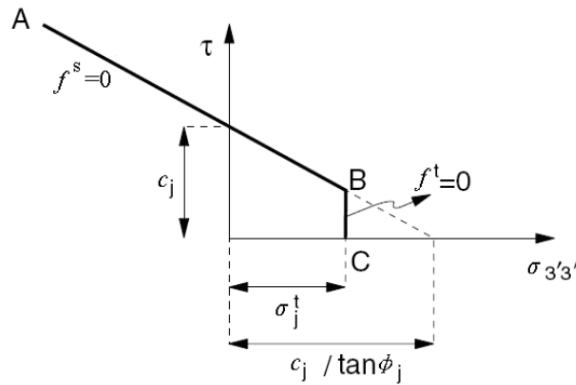
Όσον αφορά το κριτήριο αστοχίας των ασυνεχειών της προσομοιωμένης βραχομάζας, αποτελεί μία σύνθετη επέκταση του κριτηρίου Mohr-Coulomb και εκφράζεται από τους όρους $(\sigma_{3'3'}, \tau)$. Πιο αναλυτικά, για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των επιπέδων ανισοτροπίας πρέπει οι ασκούμενες τάσεις να εκφραστούν από το τυπικό καρτεσιανό σύστημα $O123$ ως προς ένα διαφορετικό $O1'2'3'$, όπου ο άξονας $1'$ να είναι κάθετος στη διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών. Ο προσανατολισμός ενός άξονα του νέου συστήματος, π.χ. του άξονα $1'$, μπορεί να εκφραστεί με το διάνυσμα $(1'_1, 1'_2, 1'_3)$ των συνημίτονων κατεύθυνσής του σε σχέση με τον προσανατολισμό του αρχικού συστήματος. Στο διάνυσμα αυτό, το $1'_1$ παριστάνει την προβολή του μοναδιαίου διανύσματος του άξονα $1'$ στον άξονα 1. Ομοίως ορίζονται τα $1'_2$ και $1'_3$ καθώς και ο προσανατολισμός των αξόνων $2'$ και $3'$ ο οποίος προσδιορίζεται αντίστοιχα από τα διανύσματα των συνημίτονων κατεύθυνσης $(2'_1, 2'_2, 2'_3)$ και $(3'_1, 3'_2, 3'_3)$. Συνεπώς, αποδεικνύεται ότι ο ταυστής της τάσης ως προς το νέο σύστημα αξόνων του επιπέδου ανισοτροπίας ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_{1'1'} & \tau_{1'2'} & \tau_{1'3'} \\ \tau_{1'2'} & \sigma_{2'2'} & \tau_{2'3'} \\ \tau_{1'3'} & \tau_{2'3'} & \sigma_{3'3'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1'_1 & 1'_2 & 1'_3 \\ 2'_1 & 2'_2 & 2'_3 \\ 3'_1 & 3'_2 & 3'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1'_1 & 1'_2 & 1'_3 \\ 2'_1 & 2'_2 & 2'_3 \\ 3'_1 & 3'_2 & 3'_3 \end{bmatrix}^T$$

ή αλλιώς $[\sigma'] = [C][\sigma][C]^T$

όπου C είναι ο πίνακας (ή μητρώο) στροφής $C = \begin{bmatrix} 1'_1 & 1'_2 & 1'_3 \\ 2'_1 & 2'_2 & 2'_3 \\ 3'_1 & 3'_2 & 3'_3 \end{bmatrix}$

Επομένως, το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb του μοντέλου Ubiquitous-Joint, εκφρασμένο από τους όρους $(\sigma_{3'3'}, \tau)$ του νέου συστήματος αξόνων του επιπέδου ανισοτροπίας προς εξέταση, απεικονίζεται γραφικά στο Σχ. 4.3.4.



Σχήμα 4.3.4 Κριτήριο αστοχίας επιπέδου ανισοτροπίας σύμφωνα με το μοντέλο Ubiquitous-Joint (Zhao & He, 2011, Itasca, 2017)

Η περίπτωση αστοχίας $f(\sigma_{3'3'}, \tau)=0$ στο τμήμα AB ορίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb $f^s=0$:

$$f^s = \tau + \sigma_{3'3'} \cdot \tan \varphi_j - c_j = 0$$

ενώ για το τμήμα BC εφαρμόζεται ένα εφελκυστικό κριτήριο αστοχίας της μορφής $f^t = 0$:

$$f^t = \sigma_{3'3'} - \sigma_j^t$$

όπου, οι δείκτες s και t των συναρτήσεων f αντιστοιχούν στη διάτμηση (shear), η οποία αποτελεί τη βάση του κριτηρίου Mohr-Coulomb, και στον εφελκυσμό (tension) όπου βασίζεται το δεύτερο κριτήριο αστοχίας, αντίστοιχα. Επίσης, φ_j, c_j και σ_j^t αποτελούν τη γωνία εσωτερικής τριβής, τη συνοχή και την εφελκυστική αντοχή του επιπέδου ανισοτροπίας αντίστοιχα. Με $\sigma_{3'3'}$ συμβολίζεται, όπως αναλύθηκε παραπάνω, η ελάχιστη κύρια τάση που ασκείται στο επίπεδο της ανισοτροπίας, αναλυμένη στο νέο σύστημα αξόνων του, και το τ αντιστοιχεί στην ασκούμενη διατμητική τάση της ασυνέχειας και ορίζεται ως (Itasca, 2017):

$$\tau = \sqrt{\sigma_{1'3'}^2 + \sigma_{2'3'}^2}$$

Συνεπώς, ένα επίπεδο ανισοτροπίας του μοντέλου είναι πιθανό να αστοχήσει είτε σε διάτμηση είτε σε εφελκυσμό. Με σκοπό να οριστεί η μηχανική συμπεριφορά και στις δύο αυτές περιπτώσεις, έχουν αναπτυχθεί δύο εξισώσεις (g^s και g^t) οι οποίες καθορίζουν τη διατμητική και εφελκυστική πλαστική ροή (shear and tensile plastic flow) του μοντέλου, αντίστοιχα. Όσον αφορά τη διατμητική πλαστική ροή, η εξίσωση g^s ορίζεται ως:

$$g^s = \tau + \sigma_{3'3'} \tan \psi_j$$

όπου ψ_j είναι η γωνία διασταλτικότητας της ασυνέχειας, ενώ η g^t αντιστοιχεί σε συνθήκη εφελκυστικής πλαστικής ροής και ισούται με (Itasca, 2017):

$$g^t = \sigma_{3'3'}$$

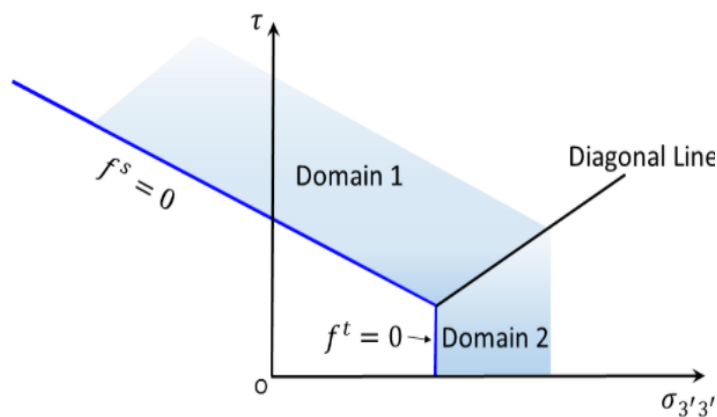
Σε περίπτωση ελαστικής συμπεριφοράς, η οποία παραβιάζει το κριτήριο αστοχίας του μοντέλου, οι εντατικές συνθήκες αντιπροσωπεύονται από ένα σημείο στο επίπεδο ($\sigma_{3'3'}$, τ), το οποίο εντοπίζεται είτε στον τομέα 1 (Domain 1) είτε στον τομέα 2 (Domain 2). Οι δύο τομείς αυτοί απεικονίζονται στο Σχ. 4.3.5 και διαχωρίζονται μεταξύ τους από τη γραμμή της εξίσωσης $h(\sigma_{3'3'}, \tau)$ (Diagonal Line) η οποία αποτελεί τη διαγώνιο των εξισώσεων f^s και f^t και ορίζεται ως:

$$h = \tau - \tau_j^P - \alpha_j^P (\sigma_{3'3'} - \sigma_j^t)$$

όπου τ_j^P και α_j^P είναι δύο σταθερές που ισούνται με (Itasca, 2017):

$$\tau_j^P = c_j - \tan \varphi_j \sigma_j^t$$

$$\alpha_j^P = \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_j} - \tan \varphi_j$$



Σχήμα 4.3.5 Γραφική απεικόνιση των τομέων διατμητικής (Domain 1) και εφελκυστικής (Domain 2) πλαστικής ροής του μοντέλου Ubiquitous-Joint (Itasca, 2017)

Αν το αντιπροσωπευτικό σημείο βρίσκεται στον τομέα 1, τότε ορίζεται αστοχία σε διάτμηση και η εντατική κατάσταση, με αντίστοιχες διορθώσεις που καθορίζονται από τον κανόνα πλαστικής ροής της εξίσωσης g^s , μετατοπίζεται στη γραμμή $f^s=0$ (ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας). Αν το σημείο εντοπίζεται στον τομέα 2, τότε πρόκειται για αστοχία σε εφελκυσμό και διενεργούνται κατάλληλες διορθώσεις, σύμφωνα με τον κανόνα πλαστικής ροής που χαρακτηρίζεται από την εξίσωση g^t , ώστε να επιτευχθεί συμμόρφωση στο κριτήριο αστοχίας $f^t = 0$ (Itasca, 2017). Οι απαιτούμενες διορθώσεις διατμητικής και εφελκυστικής πλαστικής ροής (shear and tension plastic corrections), για τους δύο τομείς, παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συνοπτικά, κατά την εφαρμογή του μοντέλου Ubiquitous-Joint, αποδίδεται ένα επίπεδο ασυνέχειας σε κάθε ζώνη της προσομοιωμένης ανισότροπης βραχομάζας. Αρχικά πραγματοποιείται έλεγχος αστοχίας του υλικού των ζωνών του μοντέλου, όπως αναλύθηκε παραπάνω, και εφαρμόζονται οι απαιτούμενες διορθώσεις πλαστικής ροής. Στη συνέχεια, οι επιβαλλόμενες τάσεις αναλύονται σε νέο σύστημα αξόνων ως προς τα επίπεδα ανισοτροπίας του υλικού. Αν οι τάσεις $\sigma_{3'3'}$ και τ παραβιάσουν τα κριτήρια αστοχίας $f^s = 0$ και $f^t = 0$, τότε η εντατική κατάσταση αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο (stress point) είτε στον τομέα 1, είτε στον τομέα 2 και με κατάλληλες διορθώσεις, σύμφωνα με τον κανόνα πλαστικής ροής των εξισώσεων g^s ή g^t αποδίδεται αστοχία είτε σε διάτμηση είτε σε εφελκυσμό, αντίστοιχα. Αντίθετα, για σημεία ($\sigma_{3'3'}$, τ) τα οποία βρίσκονται κάτω από τους τομείς 1 και 2, δηλαδή από τις γραμμές $f^s = 0$ και $f^t = 0$, δεν παρατηρείται πλαστική ροή και το μοντέλο δεν αστοχεί.

Οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν από το χρήστη για την εφαρμογή του μοντέλου Ubiquitous-Joint αναγράφονται, τόσο για το υλικό των ζωνών όσο και για τα επίπεδα ανισοτροπίας, στο Σχ. 4.3.1. Συγκεκριμένα, για το υλικό που προσημειώνεται στο μοντέλο πρέπει να προσδιοριστεί:

- 1) Το μέτρο συστολής (K)
- 2) Το μέτρο διάτμησης (G)
- 3) Το μέτρο ελαστικότητας Young (E)
- 4) Ο λόγος Poisson (ν)
- 5) Η πυκνότητα (ρ)
- 6) Η συνοχή (c)
- 7) Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ)

- 8) Η γωνία διασταλτικότητας (ψ)
- 9) Η αντοχή σε εφελκυσμό (σ^t)

Σημειώνεται ότι η γωνία διασταλτικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό, αν δεν οριστούν με συγκεκριμένες τιμές από το χρήστη, τότε ορίζονται αυτόματα ίσες με μηδέν. Επίσης, για να καθοριστεί η ελαστικότητα του υλικού απαιτείται μία από τις δύο επιλογές: (a) Καθορισμός του μέτρου συστολής (K) και του μέτρου διάτμησης (G), ή (b) Καθορισμός του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και του λόγου Poisson (ν). Αυτό δικαιολογείται λόγω των σχέσεων που συνδέουν τα μέτρα ελαστικότητας και το λόγο Poisson μεταξύ τους: $E = 2G(1 + \nu)$ και $E = 3K(1 - 2\nu)$.

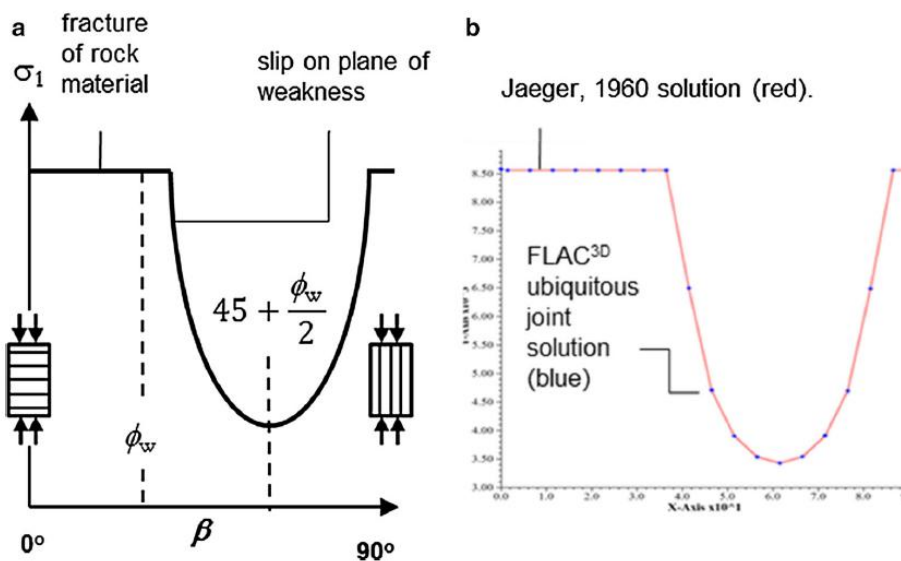
Όσον αφορά τις ασυνέχειες του μοντέλου Ubiquitous-Joint, πρέπει να προσδιοριστούν οι εξής ιδιότητές τους:

- 1) Η διεύθυνση και η διεύθυνση κλίσης
- 2) Η συνοχή (c_j)
- 3) Η γωνία τριβής (ϕ_j)
- 4) Η γωνία διασταλτικότητας (ψ_j)
- 5) Η αντοχή σε εφελκυσμό (σ_j^t)

Αντίστοιχα για τη γωνία διασταλτικότητας και την εφελκυστική αντοχή των ασυνεχειών, αν δεν λάβουν συγκεκριμένες τιμές από το χρήστη τότε ορίζονται αυτόματα ίσες με μηδέν. Σημειώνεται εδώ ότι αν ο χρήστης δεν προσδιορίσει το εύρος των ζωνών στις οποίες επιθυμεί οι αντίστοιχες ασυνέχειες να λάβουν τις τιμές των παραμέτρων που έχει εισάγει, τότε οι ασυνέχειες όλων των ζωνών του μοντέλου λαμβάνουν τις ίδιες τιμές ιδιοτήτων. Για να αποκτήσουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά τα επίπεδα των ασυνεχειών της προσομοιωμένης βραχομάζας (όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.3.1), τότε θα πρέπει να εισαχθούν συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων και να προσδιοριστεί συγκεκριμένο εύρος ζωνών, από το χρήστη, στο οποίο οι αντίστοιχες ασυνέχειες να λάβουν τις ίδιες τιμές ιδιοτήτων.

Παρατηρείται ότι από τις ιδιότητες των επιπέδων ανισοτροπίας του μοντέλου Ubiquitous-Joint απουσιάζουν το μήκος, η αντοχή σε κάμψη και η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών. Το γεγονός αυτό αποτελεί μειονέκτημα του μοντέλου, καθώς μειώνει τις δυνατότητες ρεαλιστικής προσομοίωσης των ασυνεχειών μίας ανισότροπης βραχομάζας. Ωστόσο, σύμφωνα με έρευνες που διεξήχθησαν από τους Zhao & He (2011) αποδείχθηκε ότι, για βραχομάζα με ένα επίπεδο ανισοτροπίας, το μοντέλο Ubiquitous-Joint έρχεται σε

ικανοποιητική συμφωνία (με μέγιστη απόκλιση που δεν ξεπερνάει το 2%) με την αναλυτική λύση του κριτηρίου Mohr-Coulomb. Αντίστοιχα, οι Sainsbury & Sainsbury (2017) αναφέρουν ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου Ubiquitous-Joint συμφωνούν με αυτά της αναλυτικής λύσης του Jaeger (1960) για ένα σύνολο ασυνεχειών, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.3.6. Η επιβεβαίωση αυτή της αποτελεσματικότητας του μοντέλου σε συνδυασμό με την υπολογιστική ταχύτητα που παρέχει, συγκριτικά με άλλες μεθόδους που επιδιώκουν λεπτομερή προσομοίωση των επιπέδων ανισοτροπίας, καθιστούν το Ubiquitous-Joint ένα εύχρηστο εργαλείο αριθμητικής ανάλυσης ανισότροπης βραχομάζας (κυρίως για περιπτώσεις βραχομάζας με μικρό αριθμό κύριων ασυνεχειών).



Σχήμα 4.3.6 (α) Αναλυτική λύση του Jaeger (1960) για την επίδραση ενός συνόλου κύριων ασυνεχειών σε ανισότροπο πέτρωμα, (β) Σύγκριση αποτελεσμάτων του μοντέλου Ubiquitous-Joint με την αναλυτική λύση του Jaeger (1960)

5 Πρώτο στάδιο προσομοιώσεων - Κατασκευή μοντέλων διασταύρωσης σηράγγων

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η προσομοίωση διασταυρώσεων σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα, με στόχο να μελετηθεί η επίδραση των ασυνεχειών του πετρώματος στην ευστάθεια του υπόγειου έργου. Για τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης, έγινε χρήση του προγράμματος FLAC3D και συγκεκριμένα του μοντέλου Ubiquitous-Joint, το οποίο (όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 4.3) αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για την ορθή προσομοίωση ανισότροπων υλικών. Με τη χρήση του λογισμικού, πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές αναλύσεων, μία για διασταύρωση σηράγγων μορφής «T» και μία για διασταύρωση μορφής σταυρού «+». Οι αναλύσεις αυτές χωρίστηκαν σε δύο στάδια. Το πρώτο από αυτά περιλαμβάνει την προετοιμασία, το σχεδιασμό και την κατασκευή των μοντέλων τομής των σηράγγων, ενώ το δεύτερο αφορά τη διάνοιξή τους και τον υπολογισμό των εξεταζόμενων μεγεθών (όπως τις προκαλούμενες μετατοπίσεις και την πλαστική ζώνη).

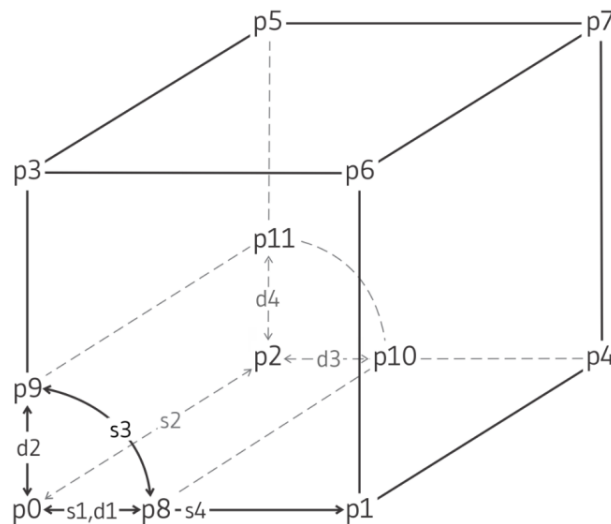
Κατά το πρώτο στάδιο, το οποίο θα αναλυθεί στο παρόν κεφάλαιο, έγινε αρχικά κατάλληλη επιλογή, μορφοποίηση και σωστός συνδυασμός τρισδιάστατων δομικών στοιχείων (όπως απεικονίζονται στο Σχ. 4.1.1) ώστε να διαμορφωθούν επιτυχώς τα επιθυμητά μοντέλα διασταύρωσης σηράγγων. Την ολοκλήρωση του σχεδιασμού των μοντέλων συντέλεσε η δημιουργία κατάλληλου καννάβου, που μετά από σειρά κατάλληλων δοκιμών, επιλέχθηκε η βέλτιστη διαρρύθμισή του ώστε να εξαχθούν έγκυρα και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια, αποδόθηκαν τιμές στις ιδιότητες τόσο του υλικού των ζωνών όσο και των επιπέδων ανισοτροπίας και προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα χώρου, όπως το φυσικό εντατικό πεδίο και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου. Τελευταίο βήμα του πρώτου σταδίου αποτέλεσε η διαδικασία διάνοιξης των σηράγγων ώστε στο επόμενο στάδιο να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των μετατοπίσεων και της πλαστικής ζώνης που προκάλεσε η διάνοιξή τους στο ανισότροπο υλικό του μοντέλου.

5.1 Ιδιότητες μοντέλου και επιλογή βέλτιστου καννάβου

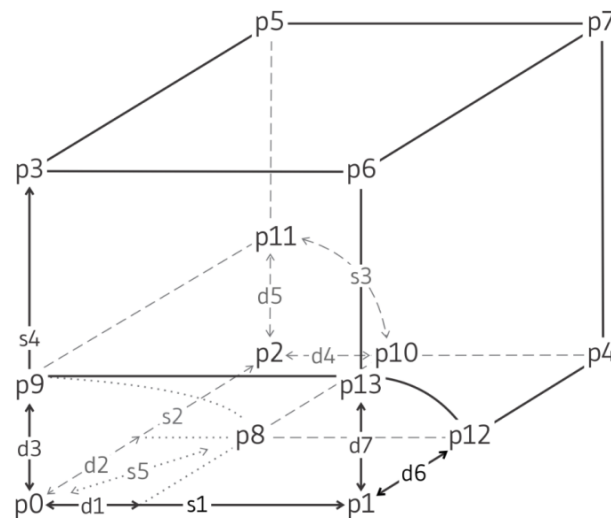
Οι σήραγγες που προσομοιώθηκαν είναι κυκλικής διατομής, ακτίνας 5m. Η κατασκευή τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πρότυπων τρισδιάστατων δομικών στοιχείων που παρέχει το πρόγραμμα και συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι γεωμετρίες radial-cylinder και cylindrical-intersection (εφόσον πρόκειται για κυκλική εκσκαφή), όπως απεικονίζονται στα Σχ. 5.1.1 και 5.2.2, αντίστοιχα. Η μοντελοποίηση αυτών των δομικών στοιχείων έγινε με τη χρήση κατάλληλων εντολών από τον ενσωματωμένο κώδικα του λογισμικού FLAC3D. Συγκεκριμένα, με την εντολή “**zone create**” εισάγεται στο πρόγραμμα το επιθυμητό δομικό στοιχείο και πιο αναλυτικά για τις γεωμετρίες radial-cylinder και cylindrical-intersection, οι αντίστοιχες εντολές συντάσσονται ως “**zone create radial-cylinder**” και “**zone create cylindrical-intersection**”. Η δημιουργία αυτών των τρισδιάστατων δομικών στοιχείων απαιτεί από το χρήστη τον προσδιορισμό ορισμένων γεωμετρικών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν: (1) τις απαραίτητες συντεταγμένες του σχήματος (point p_0, p_1, p_2, \dots), (2) τον αριθμό των σχηματιζόμενων ζωνών στα διάφορα τμήματα του μοντέλου (size s_1, s_2, \dots), (3) τις βασικές αποστάσεις μεταξύ κομβικών σημείων (dimension d_1, d_2, \dots) και (4) το λόγο ο οποίος αυξάνει ή μειώνει γεωμετρικά την απόσταση μεταξύ των ζωνών (ratio r_1, r_2, \dots). Πιο αναλυτικά:

- (1) Όσον αφορά τις απαραίτητες συντεταγμένες του μοντέλου (p_0, p_1, \dots), εφόσον η διάμετρος των εξεταζόμενων σηράγγων έχει τεθεί ίση με 10m, τότε τα εξωτερικά όρια του μοντέλου θα πρέπει να απέχουν απόσταση ίση με τουλάχιστον τρεις διαμέτρους από τις σήραγγες ώστε να μην επηρεάσουν το μοντέλο κατά τη διαδικασία της επίλυσης. Συνεπώς, οι συντεταγμένες των δομικών στοιχείων ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το μοντέλο να αποκτήσει διαστάσεις 100m x 100m x 100m, δηλαδή μέγεθος ίσο με πέντε διαμέτρους από το κέντρο της σήραγγας και κατά μήκος των κύριων αξόνων x, y, z ώστε να εξασφαλιστεί ότι η ζώνη επιρροής της υπόγειας εκσκαφής θα έχει εξασθενήσει σε αποδεκτό βαθμό έως τα εξωτερικά όρια του μοντέλου.
- (3) Οι βασικές αποστάσεις μεταξύ κομβικών σημείων, όπως απεικονίζονται στα Σχ. 5.1.1 και 5.1.2, αποτελούν τις διαστάσεις της διατομής των σηράγγων. Συνεπώς, με σκοπό να επιτευχθεί η δημιουργία κυκλικών ανοιγμάτων, ακτίνας 5m, τότε αντίστοιχα και οι τιμές των d_1 έως d_7 ορίζονται ίσες με 5.

- (4) Ο λόγος της γεωμετρικής αύξησης ή μείωσης της απόστασης μεταξύ των ζωνών τίθεται ως μονάδα ώστε να επιτευχθεί συμμετρία στον κάνναβο, με εξαίρεση το τμήμα μεταξύ της περιφέρειας της σήραγγας και του εξωτερικού ορίου του μοντέλου όπου ο λόγος λαμβάνει την τιμή 1.1. Ως αποτέλεσμα, στην περιοχή αυτή, πλησίον του ανοίγματος των σηράγγων, ο κάνναβος γίνεται πιο πυκνός. δηλαδή έχουν δημιουργηθεί περισσότερες ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από την εντονότερη διαταραχή (λόγω της διάνοιξης των σηράγγων) και συνεπώς επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση του μοντέλου ώστε να επιτευχθεί η λήψη ακριβέστερων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.1.1 Δομικό στοιχείο radial-cylinder του προγράμματος FLAC3D (Itasca, 2017)



Σχήμα 5.1.2 Δομικό στοιχείο cylindrical-intersection του προγράμματος FLAC3D (Itasca, 2017)

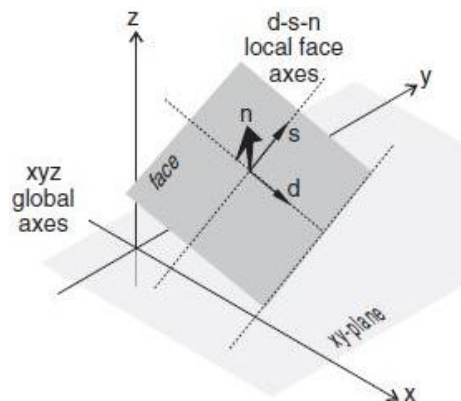
- (2) Η πιο κρίσιμη παράμετρος για το σχεδιασμό του καννάβου αποτελεί ο αριθμός των ζωνών στα διάφερα τμήματα του μοντέλου. Συγκεκριμένα, η παράμετρος size αποτελείται από τέσσερις μεταβλητές για το δομικό στοιχείο radial-cylinder και πέντε για το cylindrical-intersection. Κάθε μεταβλητή προσδιορίζει τον αριθμό των ζωνών στο αντίστοιχο τμήμα του στοιχείου. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το radial-cylinder, το s_1 ορίζει πόσες ζώνες θα σχηματιστούν κατά μήκος της ακτίνας του κυκλικού ανοίγματος, το s_2 συμβολίζει το πλήθος των ζωνών κατά τον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου, το s_3 αποτελεί τον αριθμό των ζωνών περιμετρικά του τεταρτημορίου του κυλίνδρου και το s_4 αφορά τις ζώνες που απαρτίζουν το τμήμα μεταξύ της περιφέρειας του κυλίνδρου και του εξωτερικού ορίου του δομικού στοιχείου. Για το cylindrical-intersection, οι όροι s_1 και s_2 έχουν την ίδια λειτουργία με τον αντίστοιχο όρο s_2 του radial-cylinder, ενώ τα s_3 , s_4 και s_5 συμβολίζουν τις ίδιες ποσότητες με τα αντίστοιχα s_3 , s_4 και s_1 του radial-cylinder.

Από τις παραπάνω μεταβλητές μπορούν να λάβουν, με βεβαιότητα, τιμή ίση με τη μονάδα μόνο η s_1 του radial-cylinder και η s_5 του cylindrical-intersection. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι κυλινδρικοί όγκοι θα εκσκαφθούν ώστε να δημιουργηθούν οι κυκλικές σήραγγες και κατά συνέπεια το πλήθος των ζωνών που τους συντελούν δεν έχει κάποια σχεδιαστική και υπολογιστική σημασία και τίθεται ακτινικά ως μονάδα. Επίσης, οι όροι s_2 του radial-cylinder και s_1 , s_2 του cylindrical-intersection λαμβάνουν τιμή διπλάσια από το μήκος των σηράγγων, στις οποίες αντιστοιχούν, ώστε να σχηματίζεται μία ζώνη ανά μισό μέτρο κατά τον διαμήκη άξονα τους. Αυτή η πυκνότητα καννάβου κατά τη διαμήκη διεύθυνση των σηράγγων χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητική για τη λήψη έγκυρων αποτελεσμάτων καθώς και για την αποφυγή χρονοβόρας υπολογιστικής διαδικασίας. Η βέλτιστη τιμή των υπόλοιπων μεταβλητών καθορίζεται μέσα από μία σειρά δοκιμών που εξετάζει τη μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την αύξηση του αριθμού των ζωνών στα διάφορα τμήματα του μοντέλου. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμών, μία σε μοντέλο που χαρακτηρίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb και μία σε μοντέλο Ubiquitous-Joint. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό να εκτιμηθεί η επίδραση που έχει ο κάνναβος, δηλαδή το πλήθος και η διαρρύθμιση των ζωνών, στα χαρακτηριστικά τόσο ενός ισότροπου όσο και ενός ανισότροπου μοντελοποιημένου υλικού που διέπονται από το ίδιο κριτήριο αστοχίας.

5.1.1 Μοντέλο Mohr-Coulomb

Η πρώτη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε κυκλικό άνοιγμα σήραγγας εντός υλικού που διέπεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb. Για την εφαρμογή του κριτηρίου και την προσομοίωση της βραχομάζας απαιτείται η εισαγωγή ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Πιο αναλυτικά, πρέπει να προσδιοριστεί το μέγεθος των γεωστατικών τάσεων, να διαμορφωθεί η γεωμετρία του μοντέλου και να αποδοθούν μηχανικά χαρακτηριστικά στο πέτρωμα.

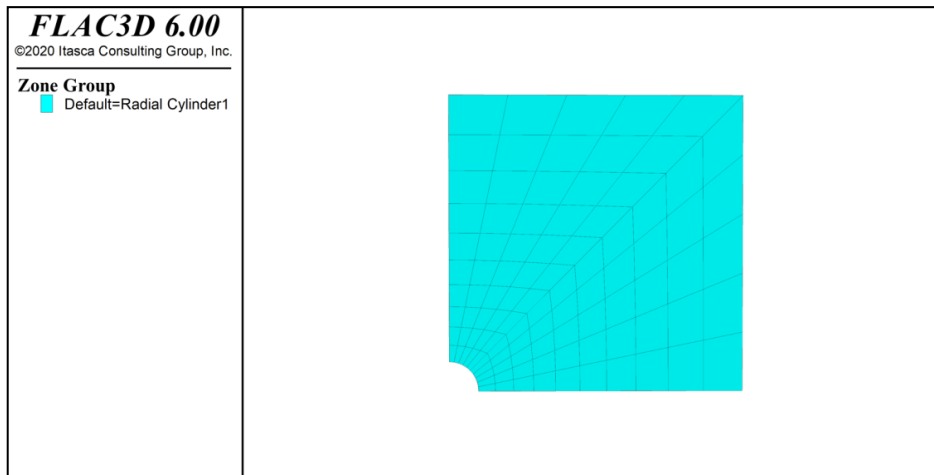
Όσον αφορά τις γεωστατικές τάσεις, εφαρμόζεται υδροστατικό εντατικό πεδίο και συνεπώς οι τάσεις και στους τρεις άξονες είναι ίδιου μεγέθους. Συγκεκριμένα, το βάθος μελέτης της διασταύρωσης των σηράγγων τίθεται στα 300m και το μοναδιαίο βάρος του πετρώματος ορίζεται ίσο με 0.025MN/m^3 , άρα οι τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου υπολογίζονται ως: $300\text{m} \cdot 0.025\text{MN/m}^3 = 7.5\text{MPa}$. Η εντολή για να αποδοθεί στις γεωστατικές τάσεις, και των τριών αξόνων, η τιμή των 7.5MPa, συντάσσεται ως εξής: **“zone initialize stress xx -7.5e6 yy -7.5e6 zz -7.5e6”**. Παρατηρείται ότι οι τιμές εισάγονται με αρνητικό πρόσημο λόγω των θλιπτικών τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου, ενώ επίσης πολλαπλασιάζονται κατά 10^6 ώστε να μετατραπούν από MPa σε Pa, σύμφωνα με το σύστημα μονάδων του λογισμικού FLAC3D. Για τις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, θεωρήθηκε πως υπάρχουν κυλίσεις σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες με σκοπό να εμποδίσουν την κάθετη κίνηση προς αυτές. Συγκεκριμένα, τέθηκε η εντολή **“zone face apply velocity-normal 0.0”** η οποία μηδενίζει τις μετακινήσεις κατά την κατεύθυνση normal (n) (όπως απεικονίζεται στο Σχ. 5.1.1.1) της επιθυμητής επιφάνειας (face), που στην συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί την επιφάνεια του εξωτερικού ορίου του μοντέλου.



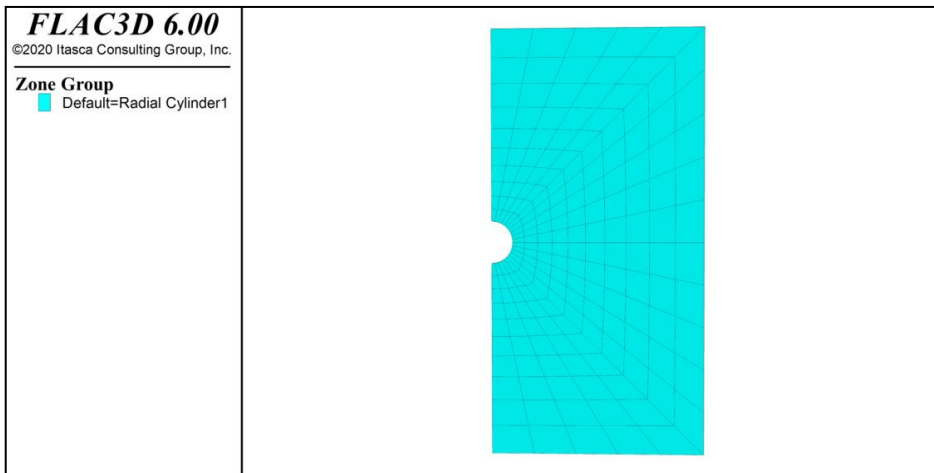
Σχήμα 5.1.1.1 Πρότυποι γενικοί άξονες (xyz global axes) του μοντέλου FLAC3D και τοπικοί άξονες (d-s-n local face axes) της δημιουργούμενης επιφάνειας (Itasca, 2017)

Όσον αφορά τη γεωμετρία του μοντέλου, προσδιορίστηκαν αρχικά οι απαραίτητες συντεταγμένες του (point p_0, p_1, p_2, \dots). Εφόσον καθορίστηκε ο αριθμός των ζωνών κατά τον διαμήκη άξονα των σηράγγων, τότε το μοντέλο της παρούσας μελέτης, που αποσκοπεί στην εύρεση του βέλτιστου αριθμού ζωνών κατά τους υπόλοιπους άξονες, θα σχεδιαστεί με όσο το δυνατόν μικρότερο πάχος κατά τη διαμήκη διεύθυνση (ώστε να επιτευχθεί μία μορφή 2D ανάλυσης). Συνεπώς, με χρήση του δομικού στοιχείου radial-cylinder, οι συντεταγμένες του μοντέλου θα οριστούν ως εξής: point 0 (0,0,0), point 1 (50,0,0), point 2 (0,0,2,0) και point 3 (0,0,50), όπου οι τρεις αριθμοί μέσα στις παρενθέσεις αντιστοιχούν με τη σειρά στους άξονες x, y και z αντίστοιχα. Σημειώνεται εδώ ότι για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων της γεωμετρίας radial-cylinder δεν απαιτείται η εισαγωγή και των έντεκα σημείων, όπως απεικονίζονται στο Σχ. 5.1.1, αλλά τα τέσσερα πρώτα αρκούν (για να προσδιοριστούν οι αποστάσεις κατά τους άξονες x,y,z) ώστε στη συνέχεια το λογισμικό να θέσει αυτόματα τα υπόλοιπα επτά και να σχεδιάσει το δομικό στοιχείο. Το αρχικό σημείο p_0 αντιστοιχεί προκαθορισμένα στην αρχή των αξόνων, ενώ τα σημεία p_1 και p_3 ορίζουν απόσταση ίση με πέντε διαμέτρους κατά τους άξονες x και z αντίστοιχα, ώστε μέχρι τα εξωτερικά όρια του μοντέλου η διαταραχή της βραχομάζας, λόγω της εκσκαφής των σηράγγων, να έχει εξασθενήσει. Το σημείο p_2 , δεδομένου ότι ο άξονας y (δηλαδή ο διαμήκης άξονας της σήραγγας) δε θεωρείται σημαντικός για την παρούσα μελέτη, τοποθετείται σε πολύ κοντινή απόσταση από την αρχή των αξόνων ώστε το μοντέλο να αποκτήσει αμελητέο πάχος κατά αυτή τη διεύθυνση.

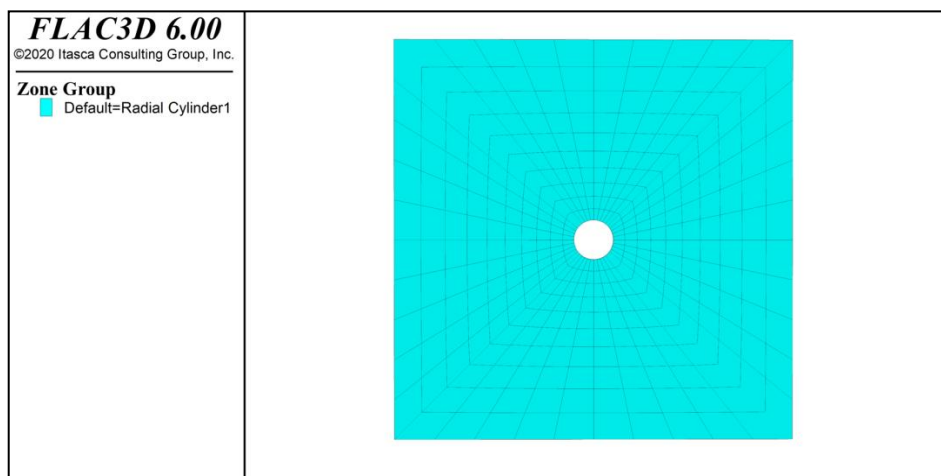
Τέλος, επειδή το δομικό στοιχείο radial-cylinder περιλαμβάνει μόνο ένα τεταρτημόριο κυλίνδρου (Εικόνα 5.1.1.1), θα πρέπει να αντικατοπτριστεί με κατάλληλο τρόπο ώστε να σχηματίσει ένα ολόκληρο κυκλικό άνοιγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή “**zone reflect**” η οποία αντιγράφει ένα εύρος ζωνών, που ορίζει ο χρήστης, και με βάση ένα σταθερό σημείο (origin) και μία συγκεκριμένη κλίση (dip) ή/και διεύθυνση κλίσης (dip-direction), το παραθέτει σε ένα διαφορετικό τμήμα του χώρου μοντελοποίησης. Συγκεκριμένα, με σκοπό τη δημιουργία κυλινδρικού σχήματος, ως πρώτο βήμα θα πρέπει το δομικό στοιχείο radial-cylinder, με σταθερό σημείο το (0,0,0), να αντικατοπτριστεί ολόκληρο υπό κλίση 0° και διεύθυνση κλίσης 0° (Εικόνα 5.1.1.2). Στη συνέχεια, με βάση το ίδιο σταθερό σημείο, κλίση 90° και διεύθυνση κλίσης 270° , θα πρέπει να αντιγραφεί ξανά ώστε να σχηματιστεί το επιθυμητό μοντέλο (Εικόνα 5.1.1.3). Συνεπώς, οι αντίστοιχες εντολές για τις παραπάνω ενέργειες είναι οι: “**zone reflect dip 0 dip direction 0 origin (0,0,0)**” και “**zone reflect dip 90 dip direction 270 origin (0,0,0)**”.



Εικόνα 5.1.1.1 Πρόσωση τρισδιάστατου δομικού στοιχείου radial-cylinder στο πρόγραμμα FLAC3D



Εικόνα 5.1.1.2 Πρόσωση δομικού τρισδιάστατου στοιχείου radial-cylinder έπειτα από εντολή “zone reflect”

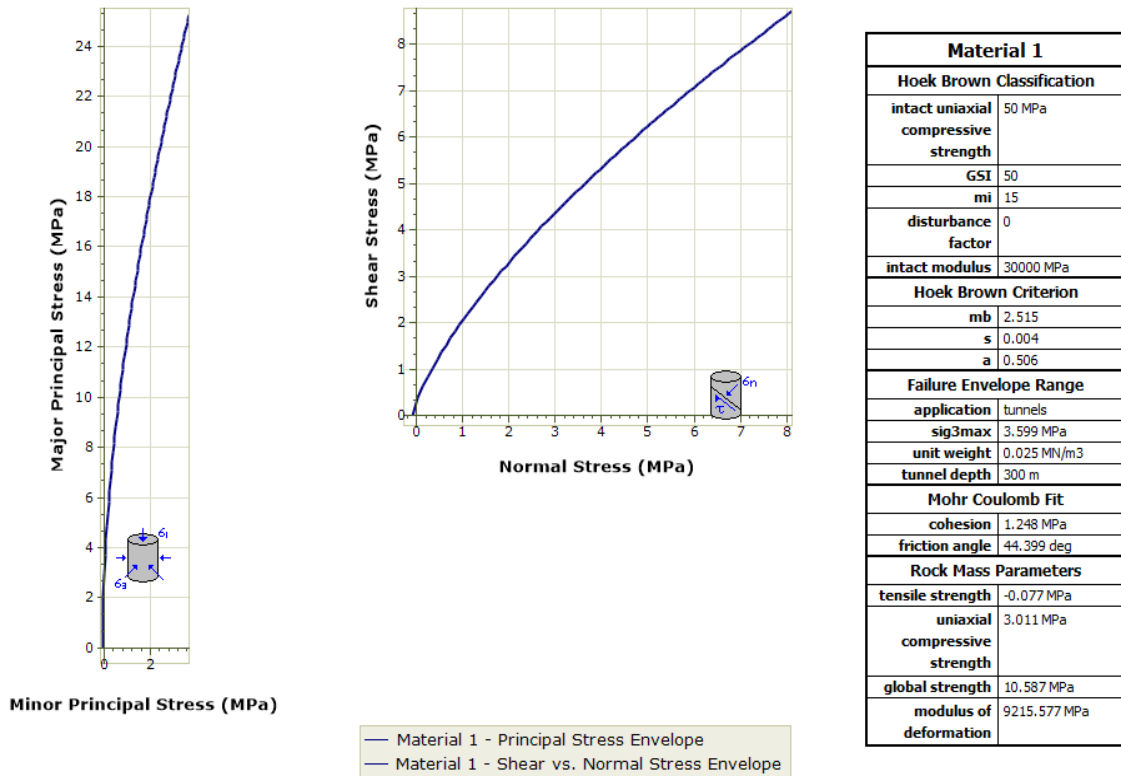


Εικόνα 5.1.1.3 Πρόσωση δομικού τρισδιάστατου στοιχείου radial-cylinder έπειτα από δύο διαφορετικές εντολές “zone reflect”

Τελευταίο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου είναι η εφαρμογή του κριτηρίου Mohr-Coulomb με την εισαγωγή μηχανικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων στο υλικό προσομοίωσης. Για να οριστεί το μοντέλο Mohr-Coulomb συντάσσεται η εντολή “**zone cmodel assign mohr-coulomb**” η οποία εφαρμόζει το κριτήριο σε όλες τις ζώνες του μοντέλου. Επίσης, απαιτείται ο προσδιορισμός των εννέα παραμέτρων για τις ιδιότητες του πετρώματος, όπως αναγράφονται στο υποκεφάλαιο 4.3. Αυτές είναι:

- 1) Το μέτρο συστολής (K, παράμετρος “bulk”)
- 2) Το μέτρο διάτμησης (G, παράμετρος “shear”)
- 3) Το μέτρο ελαστικότητας Young (E, παράμετρος “young”)
- 4) Ο λόγος Poisson (ν , παράμετρος “poisson”)
- 5) Η πυκνότητα (ρ , παράμετρος “density”)
- 6) Η συνοχή (c, παράμετρος “cohesion”)
- 7) Η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ , παράμετρος “friction”)
- 8) Η γωνία διασταλτικότητας (ψ , παράμετρος “dilation”)
- 9) Η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό (σ^t , παράμετρος “tension”)

Οι παράμετροι αυτοί εισάγονται στο πρόγραμμα με την εντολή “**zone property**” την οποία ακολουθούν οι αντίστοιχες λέξεις κλειδιά, που σημειώνονται εντός των παρενθέσεων, μαζί με την επιθυμητή τιμή. Σημειώνεται εδώ, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ότι για τον υπολογισμό της ελαστικότητας του υλικού απαιτείται μία από τις δύο επιλογές: (a) Προσδιορισμός του μέτρου συστολής (K) και του μέτρου διάτμησης (G), ή (b) Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και του λόγου Poisson (ν). Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε η δεύτερη εναλλακτική και με χρήση του προγράμματος RocData του λογισμικού RocScience λήφθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα. Συγκεκριμένα, έγιναν οι παραδοχές ότι το μοντελοποιημένο πέτρωμα έχει μονοαξονική αντοχή σε θλίψη ίση με 50MPa, χαρακτηρίζεται από δείκτη GSI ίσο με 50, ο όρος E_i (Estimated Intact Modulus) είναι 30GPa και ο συντελεστής διαταραχής (D) λόγω διάνοιξης της σήραγγας ορίζεται ίσος με μηδέν. Με βάση τις πληροφορίες αυτές και σε συνδυασμό με τις προηγούμενες παραδοχές που είχαν γίνει για το μοντέλο (βάθος διάνοιξης 300m και μοναδιαίο βάρος πετρώματος 0.025MN/m^3), εξάγονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 5.1.1.2.



Σχήμα 5.1.1.2 Δεδομένα για τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος σύμφωνα με τους υπολογισμούς του προγράμματος RocData

Από τους υπολογισμούς του προγράμματος RocData προσδιορίζονται η συνοχή της βραχομάζας (“cohesion”), η γωνία εσωτερικής τριβής (“friction angle”), η αντοχή σε εφελκυσμό (“tensile strength”) και το μέτρο ελαστικότητας Young (“modulus of deformation”) τα οποία αποτελούν απαραίτητες παραμέτρους για τον προσδιορισμό του κριτηρίου Mohr-Coulomb.

Με την εισαγωγή τιμών για τις ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός του μοντέλου και η μόνη παράμετρος που εκκρεμεί για προσδιορισμό είναι η size που καθορίζει τον αριθμό των ζωνών στα διάφορα τμήματα του μοντέλου. Ο όρος s1 ορίζεται ως μονάδα λόγω διάνοιξης της σήραγγας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ αντίστοιχα ο όρο s2 λαμβάνει τιμή ίση με 1 καθώς το μήκος του μοντέλου κατά τον άξονα y είναι πολύ μικρό (0.2m). Συνεπώς, οι δοκιμές θα πραγματοποιηθούν με στόχο την εύρεση της βέλτιστης τιμής για τις μεταβλητές s3 και s4. Πιο αναλυτικά, θα σχεδιαστούν τρία διαγράμματα. Το πρώτο θα παρουσιάζει τη μεταβολή των μετατοπίσεων αυξάνοντας την τιμή της μεταβλητής s3 με βήμα 5 από αρχική τιμή 10 έως τελική τιμή 50, το δεύτερο θα απεικονίζει τη μεταβολή των μετατοπίσεων αυξάνοντας την τιμή της μεταβλητής s4 με ίδιο βήμα, ενώ το τρίτο διάγραμμα θα είναι αντίστοιχο με

τα προηγούμενα δύο αλλά με αύξηση ίδιου βήματος και των δύο μεταβλητών ταυτόχρονα. Στην Εικόνα 5.1.1.4 παρουσιάζεται ο συνολικός κώδικας που συντάχθηκε για τη δημιουργία του μοντέλου, θέτοντας στους όρους s3 και s4 την αρχική τιμή των δοκιμών.

```

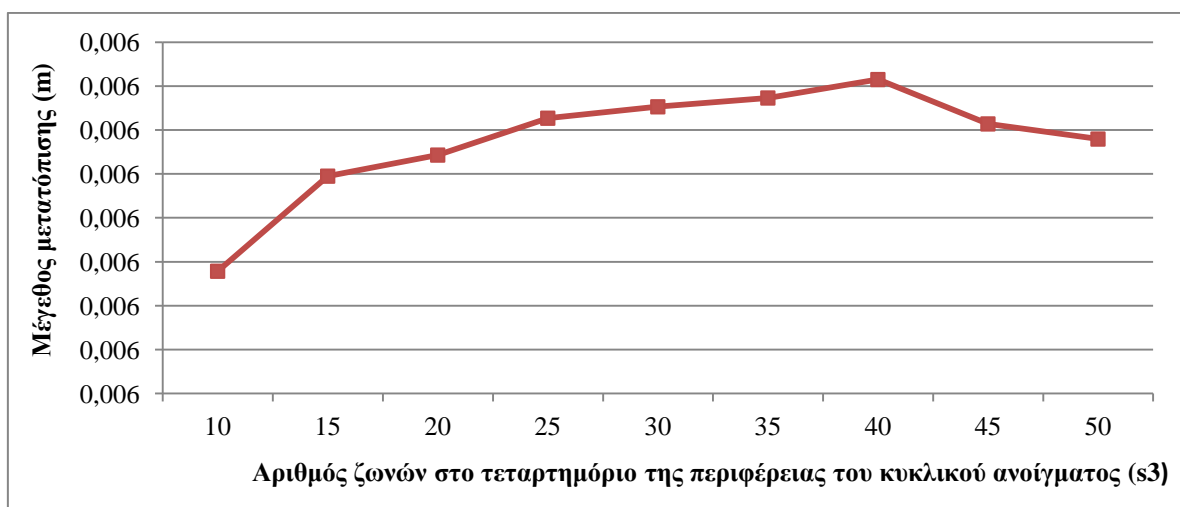
1 model new
2
3 zone create radial-cylinder size 1 1 30 30 rat 1 1 1 1.1 ...
& 4           point 1 (50,0,0) point 2 (0,0.2,0) ...
& 5           point 3 (0,0,50) dim 5 5 5 5
6
7 zone reflect dip 0 dip-direction 0 origin (0,0,0)
8 zone reflect dip 90 dip-direction 270 origin (0,0,0)
9
10 zone cmodel assign mohr-coulomb
11 zone property density 2500
12 zone property young 9.215e9 poisson 0.25 cohesion 1.248e6
13 zone property friction 44.399 tension 77e3
14
15 zone initialize stress xx -7.5e6 yy -7.5e6 zz -7.5e6
16
17 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x -50.1 -49.99
18 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x 49.99 50.1
19
20 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z -50.1 -49.99
21 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z 49.99 50.1
22
23 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y -0.01 0.01
24 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y 0.19 0.21
25
26 model solve

```

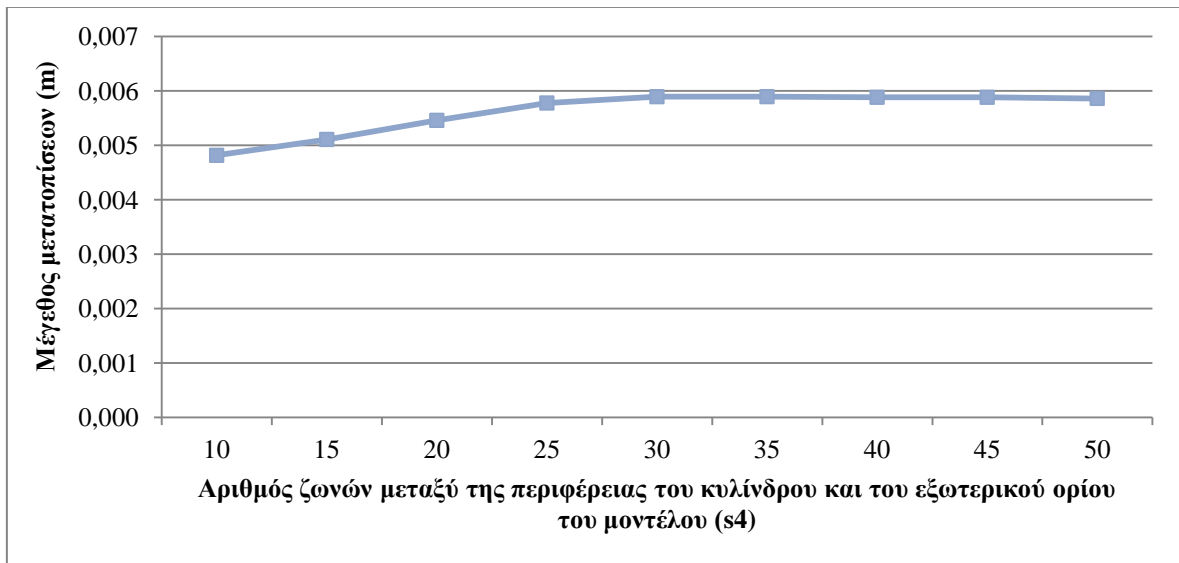
Εικόνα 5.1.1.4 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία σήραγγας κυκλικής διατομής σε μοντέλο Mohr-Coulomb

Παρατηρείται στον κώδικα της Εικόνας 5.1.1.4 ότι οι συνοριακές συνθήκες που συντάχθηκαν επιβάλλονται σε ένα εύρος πολύ κοντά σε κάθε εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου ώστε να εφαρμοστούν στα όρια της προσομοιωμένης βραχομάζας.

Στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των τριών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο Mohr-Coulomb.



Σχήμα 5.1.1.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3



Σχήμα 5.1.1.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s_4

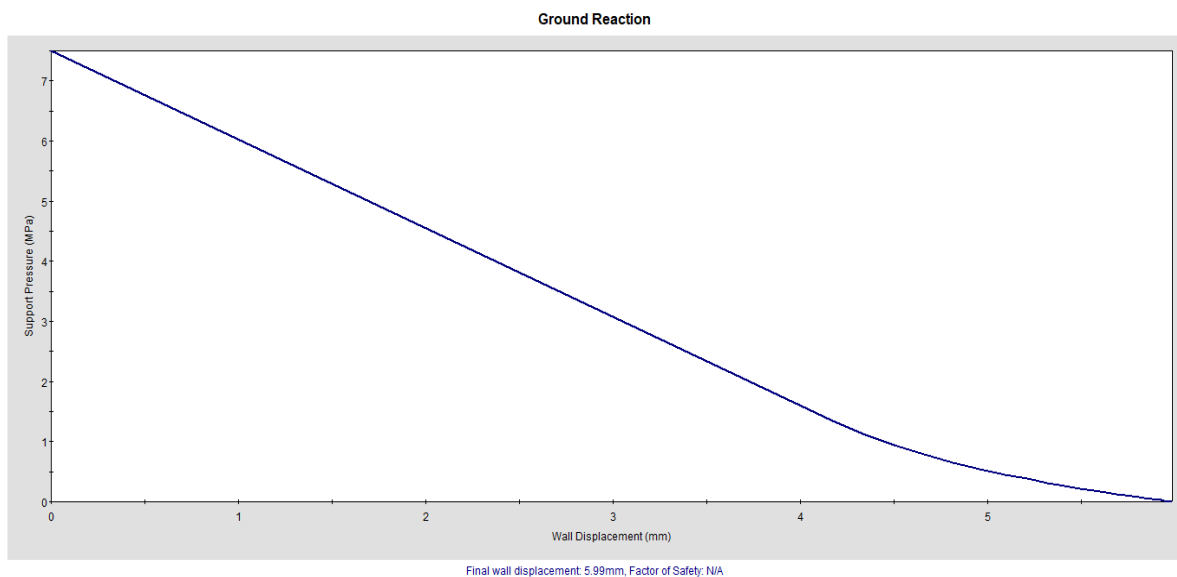


Σχήμα 5.1.1.5 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s_3 και s_4

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται εμφανές ότι από τις 30 ζώνες και έπειτα η τιμή των μετατοπίσεων αρχίζει να σταθεροποιείται. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη επιρροή στη μηχανική συμπεριφορά του μοντέλου φαίνεται να έχει η μεταβλητή s_4 διότι διακρίνονται μεγαλύτερες μεταβολές στο μέγεθος των μετατοπίσεων με την αύξηση της τιμής της (κυριών στο εύρος από 10 έως 25 ζώνες). Επίσης, κατά την ταυτόχρονη μεταβολή του s_3 με το s_4 , το διάγραμμα που σχηματίζεται (Σχ. 5.1.1.5) λαμβάνει την ίδια μορφή με το διάγραμμα του Σχ. 5.1.1.4 υποδεικνύοντας τη μεγαλύτερη βαρύτητα που έχει ο αριθμός

των ζωνών στο τμήμα μεταξύ της περιφέρειας της σήραγγας και του εξωτερικού ορίου του μοντέλου από ότι περιμετρικά της κυκλικής διατομής.

Για την επιβεβαίωση των συμπερασμάτων αυτών έγινε χρήση του προγράμματος RocSupport του λογισμικού RocScience. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η κατασκευή αντίστοιχης κυκλικής σήραγγας ακτίνας 5m και βάθους διάνοιξης 300m, εντός πετρώματος με μοναδιαίο βάρος: 0.025MN/m³, μέτρο ελαστικότητας Young: 9215MPa, λόγο Poisson: 0.5, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη: 50MPa και γωνία εσωτερικής τριβής: 44.399°. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προγράμματος RocSupport (Σχ. 5.1.1.6) συγκρίνονται στη συνέχεια με αυτά του μοντέλου Mohr-Coulomb.



Σχήμα 5.1.1.6 Διάγραμμα σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας, ακτίνας 5m, εντός υδροστατικού εντατικού πεδίου (7.5MPa) στο πρόγραμμα RocSupport

Το μέγεθος των προκαλούμενων μετατοπίσεων με βάση τους υπολογισμούς του προγράμματος RocSupport ισούται με 5.99mm, αποτέλεσμα το οποίο έρχεται σε πάρα πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα του μοντέλου Mohr-Coulomb του FLAC3D (Σχ. 5.1.1.3-5). Συνεπώς, επιβεβαιώνονται οι υπολογισμένες τιμές μετατοπίσεων των δοκιμών του μοντέλου Mohr-Coulomb και επιλέγονται τριάντα ζώνες ως βέλτιστος αριθμός για τα τμήματα που ορίζουν οι μεταβλητές s3 και s4. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό να εξασφαλιστούν έγκυρα αποτελέσματα κατά τους υπολογισμούς της προσομοίωσης καθώς και ικανοποιητικός χρόνος υπολογισμών (να μην γίνει δηλαδή η υπολογιστική διαδικασία πολύ χρονοβόρα με την επιλογή μεγαλύτερου πλήθους ζωνών, όταν τα ίδια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν και με μικρότερο αριθμό ζωνών).

5.1.2 Μοντέλο Ubiquitous-Joint

Η δεύτερη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε μοντέλο Ubiquitous-Joint το οποίο θα αποτελέσει και το μοντέλο ανισότροπης βραχομάζας με το οποίο θα διεξαχθούν οι προσομοιώσεις των διασταυρώσεων των σηράγγων. Η δημιουργία του μοντέλου αυτού ακολουθεί την ίδια ακριβώς διαδικασία με αυτή του μοντέλου Mohr-Coulomb με την προσθήκη όμως και παραμέτρων για τις ιδιότητες των επιπέδων ανισοτροπίας. Οι παράμετροι αυτές, όπως αναγράφονται και στο Σχ. 4.3.1, αποτελούν τις εξής:

- 1) Η διεύθυνση (“dip”) και η διεύθυνση κλίσης (“dip-direction”)
- 2) Η συνοχή (c_j , “joint-cohesion”)
- 3) Η γωνία τριβής (ϕ_j , “joint-friction”)
- 4) Η γωνία διασταλτικότητας (ψ_j , “joint-dilation”)
- 5) Η αντοχή σε εφελκυσμό (σ_j^t , “joint-tension”)

Για την εφαρμογή του μοντέλου Ubiquitous-Joint συντάσσεται η εντολή “**zone** cmodel assign ubiquitous-joint”. Για την εισαγωγή των παραμέτρων στο πρόγραμμα γίνεται χρήση της εντολής “**zone** property” η οποία ακολουθείται από τις λέξεις κλειδιά για την κάθε ιδιότητα μαζί με την αντίστοιχη επιθυμητή τιμή. Αρχικά πραγματοποιείται η εισαγωγή των ιδιοτήτων του κριτηρίου Mohr-Coulomb και εν συνεχεία των χαρακτηριστικών που διέπουν τις ασυνέχειες της ανισότροπης βραχομάζας. Για την βραχομάζα της παρούσας μελέτης ορίστηκαν συνοχή, γωνία διασταλτικότητας και αντοχή της σε εφελκυσμό ίσα με το μηδέν. Ο σκοπός αυτής της ενέργειας ήταν να αποδοθεί όσο το δυνατόν πιο έντονη ανισότροπη συμπεριφορά στη βραχομάζα καθώς η επίδραση της ανισοτροπίας του πετρώματος αποτελεί το βασικό παράγοντα μελέτης της παρούσας διπλωματικής. Η γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών ορίζεται ίση με 30° , ενώ η κλίση και η διεύθυνση κλίσης τους θα αποτελέσουν τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους για την εύρεση του βέλτιστου καννάβου. Συνεπώς, ο συνολικός κώδικας που συντάχθηκε για την εφαρμογή του κριτηρίου Ubiquitous-Joint και τη δημιουργία κυκλικής σήραγγας παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.2.1, με κλίση και διεύθυνση κλίσης ίσες με μηδέν (σαν τυπικές τιμές) και μεταβλητές s3 και s4 ίσες με την αρχική τιμή μελέτης τους, δηλαδή ίσες με δέκα.

Οι σειρές δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, όπως και για το μοντέλο Mohr-Coulomb, προσδιόρισαν τη μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων ανάλογα με τον αριθμό των ζωνών που ορίζουν οι μεταβλητές s3 και s4. Ωστόσο, κάθε σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκε με έναν συγκεκριμένο συνδυασμό κλίσης και διεύθυνσης κλίσης των

ασυνεχειών. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκε ένα μεγάλο εύρος πιθανών προσανατολισμών των επιπέδων ανισοτροπίας ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της πυκνότητας του καννάβου για διάφορες περιπτώσεις ανισότροπης συμπεριφοράς του υλικού. Η αύξηση του πλήθους των ζωνών έγινε με βήμα 5 από αρχική τιμή 10 έως τελική 50 και παρόμοια με το μοντέλο Mohr-Coulomb θα σχεδιαστούν τρία διαγράμματα. Το πρώτο θα παρουσιάζει τη μεταβολή των μετατοπίσεων αυξάνοντας την τιμή της μεταβλητής s_3 , το δεύτερο θα απεικονίζει τη μεταβολή των μετατοπίσεων αυξάνοντας την τιμή της μεταβλητής s_4 με ίδιο βήμα, ενώ το τρίτο διάγραμμα θα είναι αντίστοιχο με τα προηγούμενα δύο αλλά με αύξηση και των δύο μεταβλητών ταυτόχρονα.

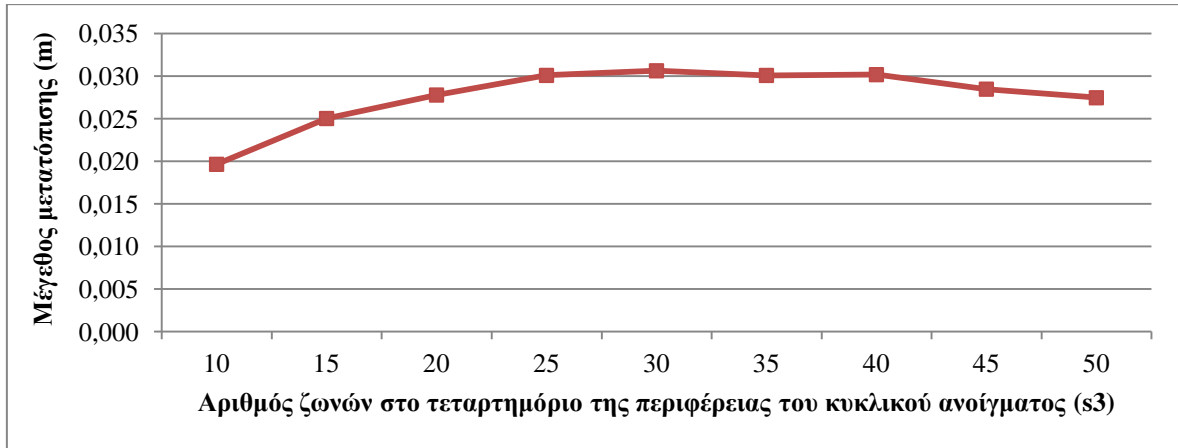
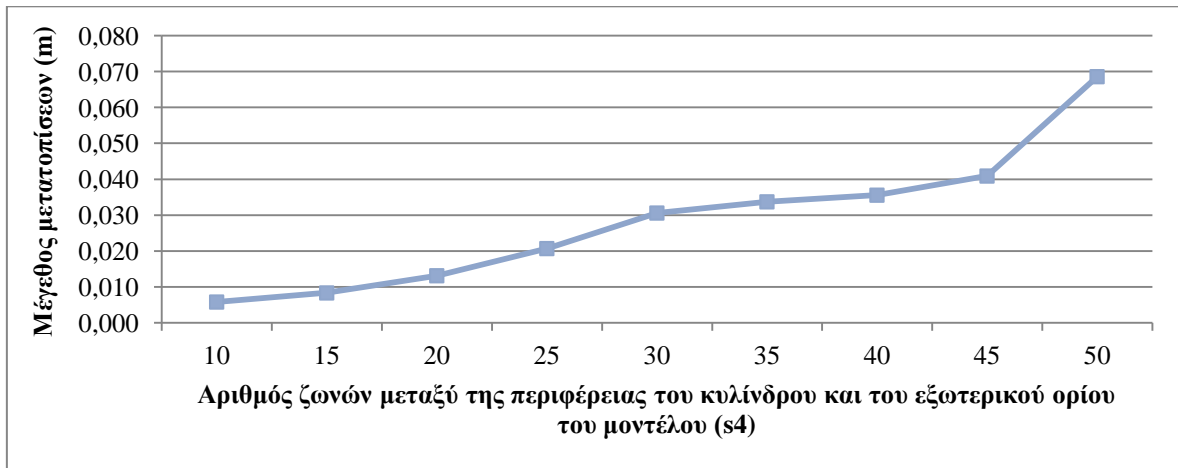
```

1  model new
2
3  zone create radial-cylinder size 1 1 50 50 rat 1 1 1 1.1 ...
& 4  ..... point 1 (50,0,0) point 2 (0,0.2,0) ...
& 5  ..... point 3 (0,0,50) dim 5 5 5 5
6
7  zone reflect dip 0 dip-direction 0 origin (0,0,0)
8  zone reflect dip 90 dip-direction 270 origin (0,0,0)
9
10 zone cmodel assign ubiquitous-joint
11
12 zone property density 2500
13 zone property young 9.215e9 poisson 0.25 cohesion 1.248e6
14 zone property friction 44.399 tension 77e3
15
16 zone property dip 0 dip-direction 90
17 zone property joint-cohesion 0.0 joint-friction 30.0
18 zone property joint-dilation 0.0 joint-tension 0.0
19
20 zone initialize stress xx -7.5e6 yy -7.5e6 zz -7.5e6
21
22 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x -50.1 -49.99
23 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x 49.99 50.1
24
25 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z -50.1 -49.99
26 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z 49.99 50.1
27
28 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y -0.01 0.01
29 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y 0.19 0.21
30
31 model solve

```

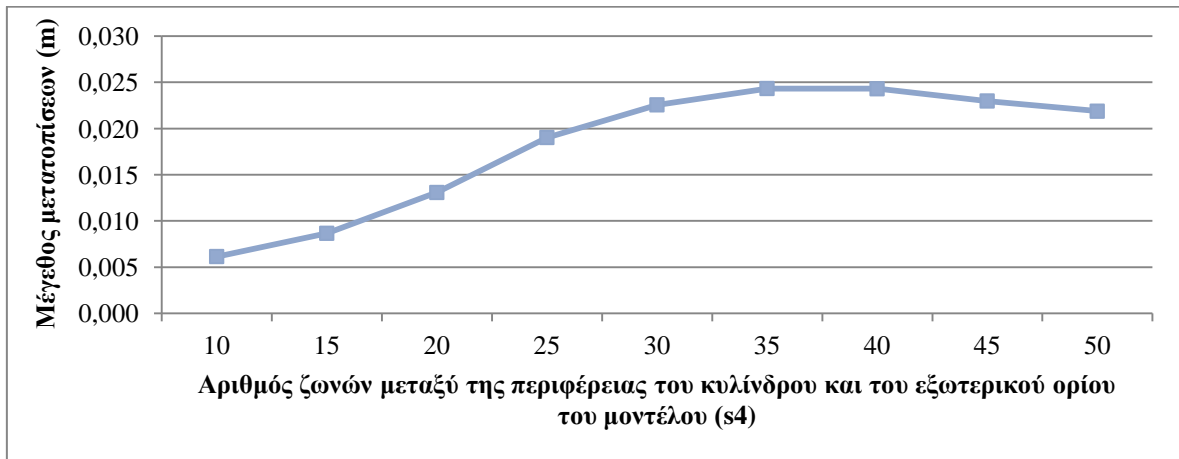
Εικόνα 5.1.2.1 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία σήραγγας κυκλικής διατομής σε μοντέλο Ubiquitous-Joint

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του μεγέθους των μετατοπίσεων για διάφορους συνδυασμούς κλίσης και διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών της ανισότροπης βραχομάζας.

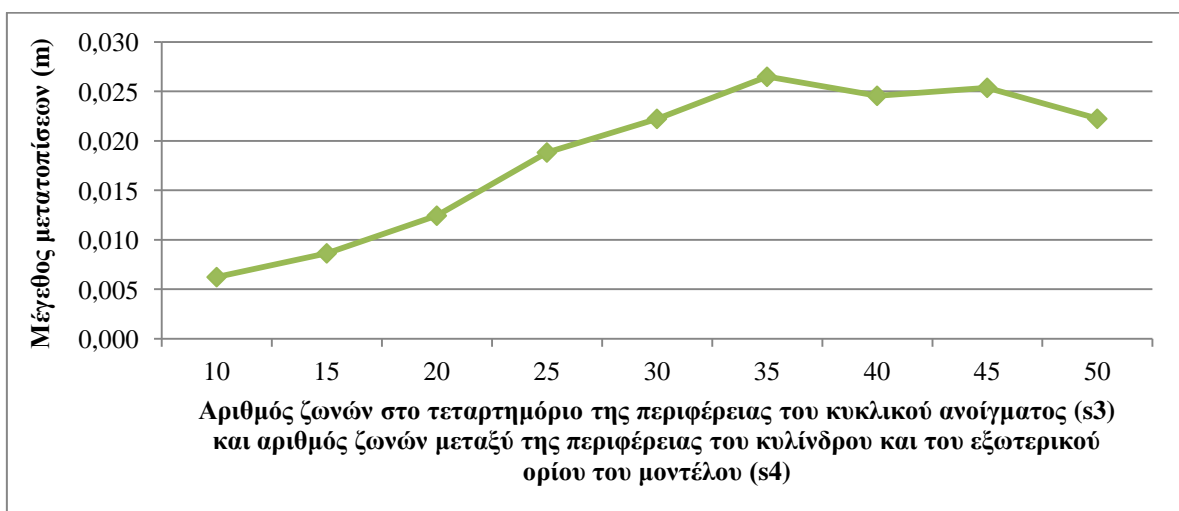
Κλίση 0° , διεύθυνση κλίσης 90° Σχήμα 5.1.2.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s_3 Σχήμα 5.1.2.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s_4 Σχήμα 5.1.2.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s_3 και s_4

Κλίση 45°, διεύθυνση κλίσης 90°

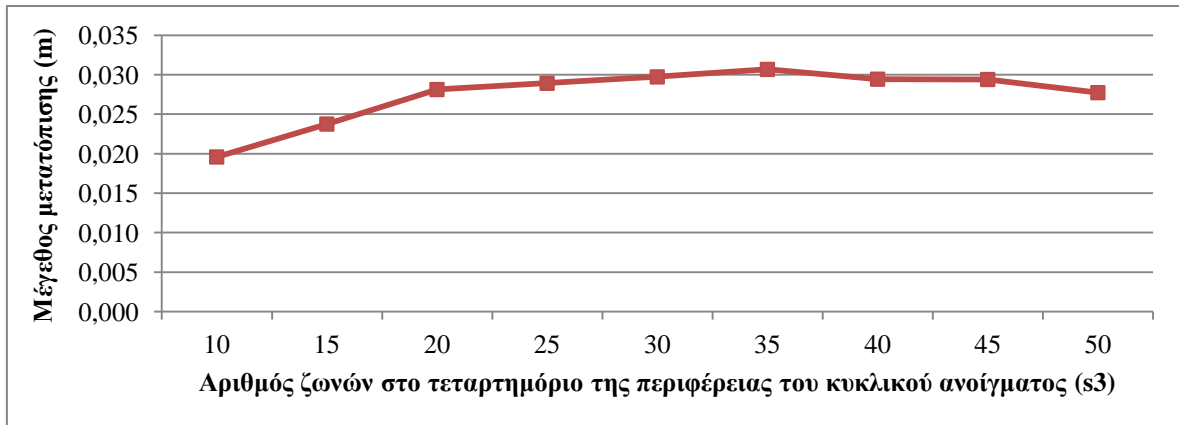
Σχήμα 5.1.2.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3



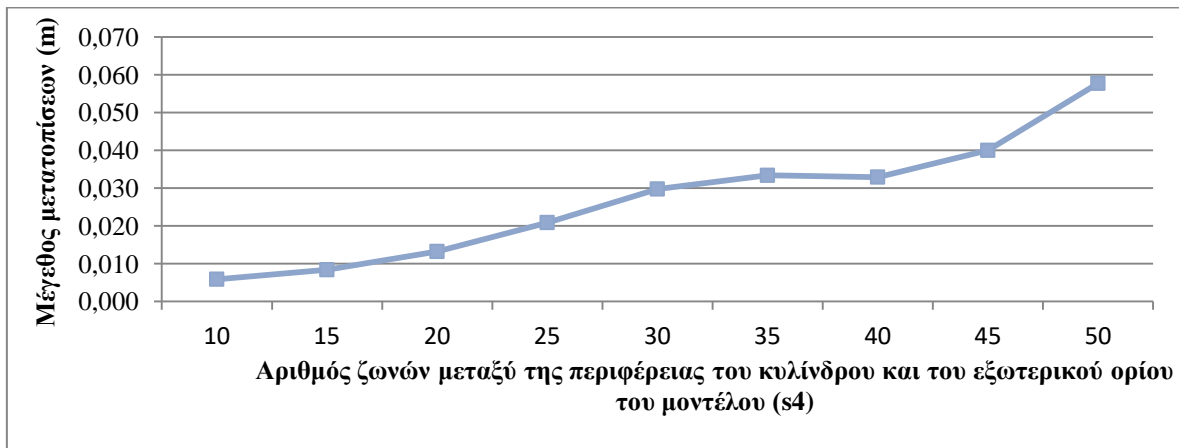
Σχήμα 5.1.2.5 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4



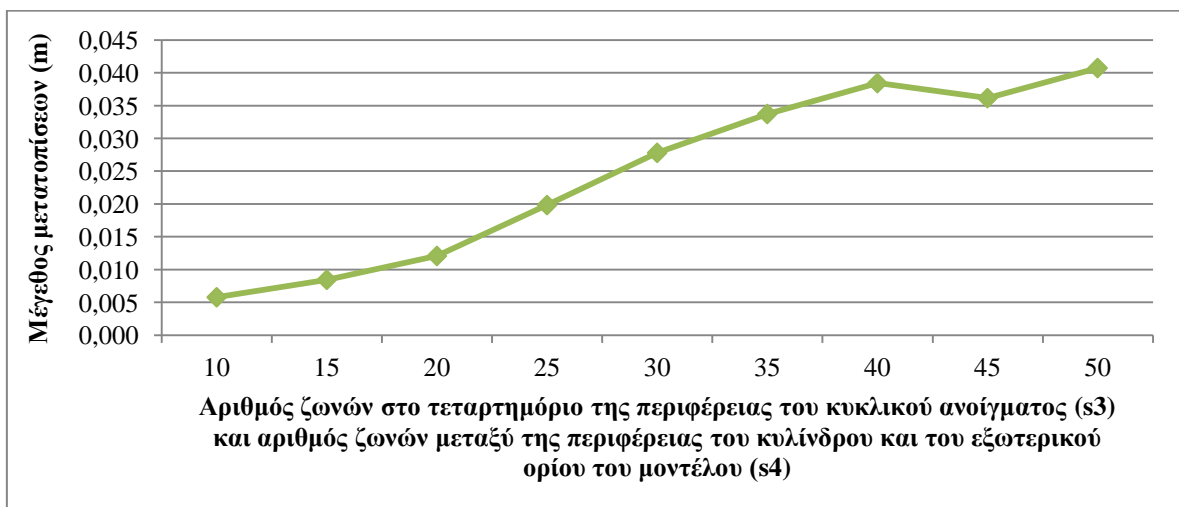
Σχήμα 5.1.2.6 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4

Κλίση 90°, διεύθυνση κλίσης 90°

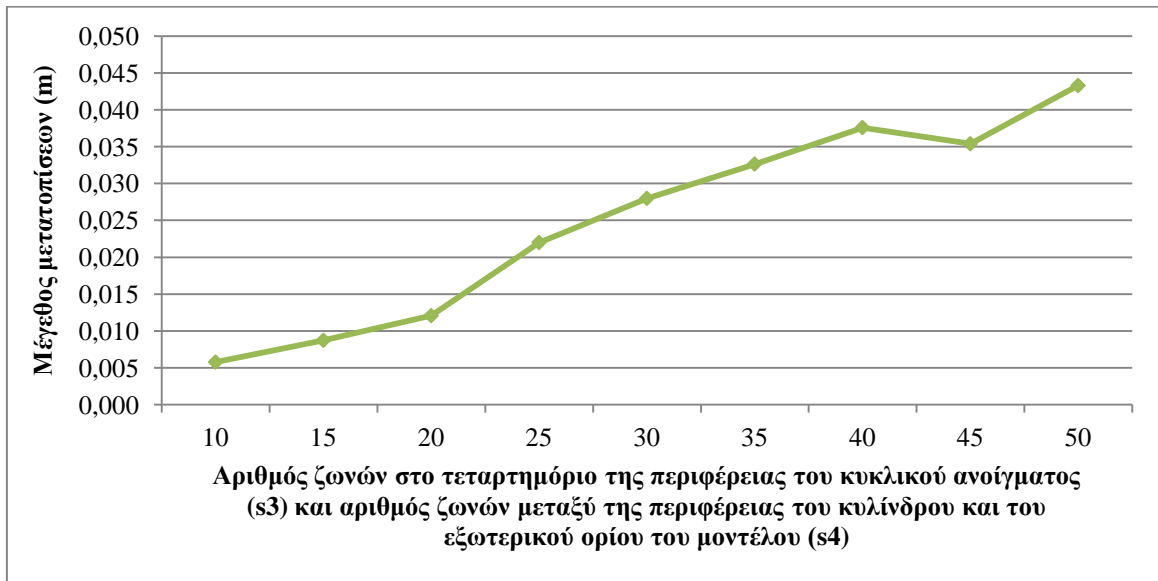
Σχήμα 5.1.2.7 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s3



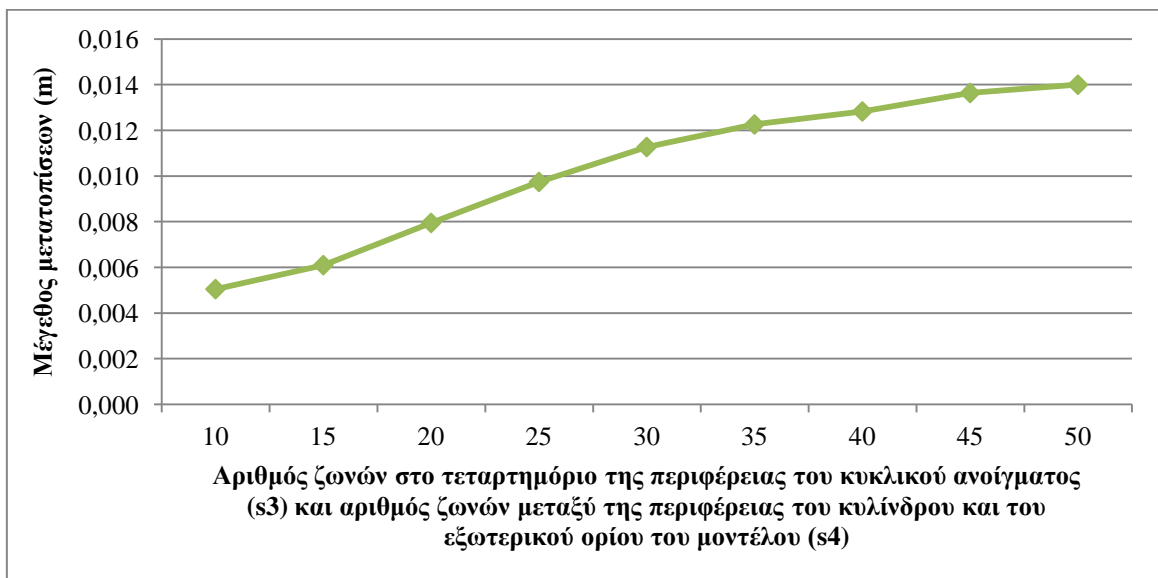
Σχήμα 5.1.2.8 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s4



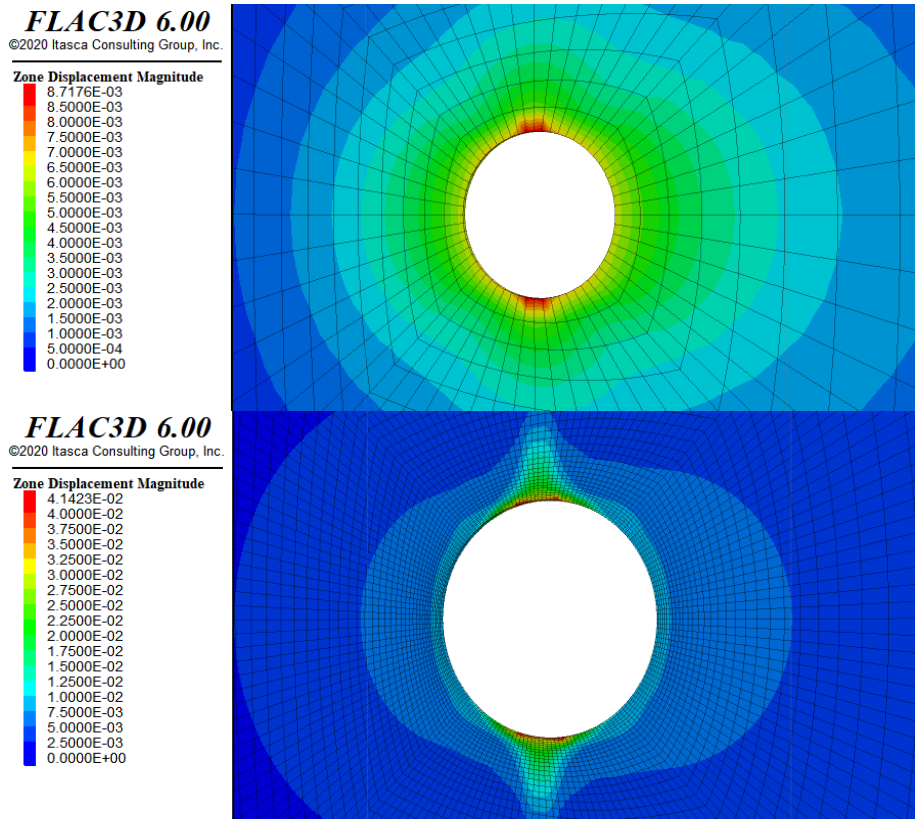
Σχήμα 5.1.2.9 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4

Κλίση 0°, διεύθυνση κλίσης 0°

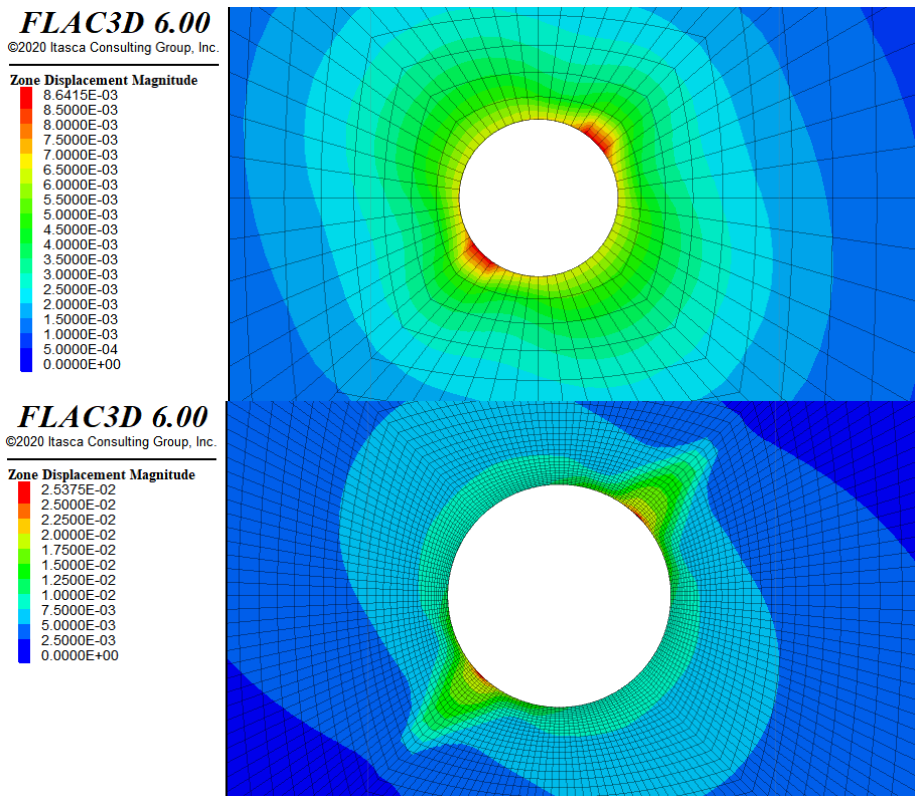
Σχήμα 5.1.2.10 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4

Κλίση 45°, διεύθυνση κλίσης 0°

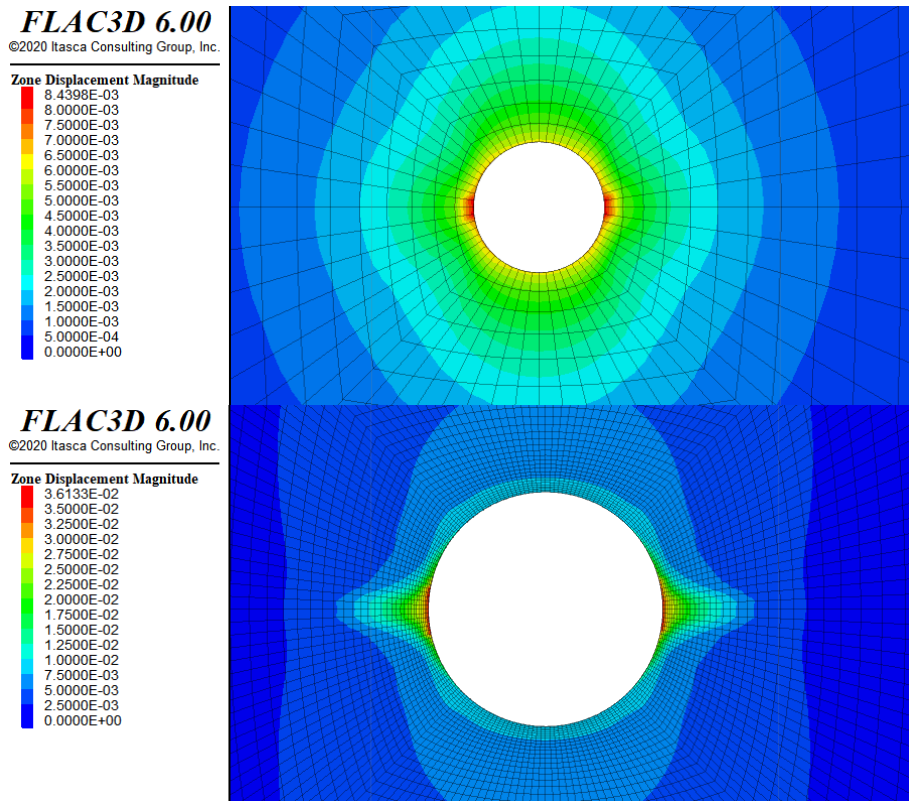
Σχήμα 5.1.2.11 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s3 και s4



Εικόνα 5.1.2.2 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου, με κλίση ασυνεχειών 0° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: $s_3=15$ και $s_4=15$, Κάτω: $s_3=45$ και $s_4=45$



Εικόνα 5.1.2.3 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου, με κλίση ασυνεχειών 45° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: $s_3=15$ και $s_4=15$, Κάτω: $s_3=45$ και $s_4=45$



Εικόνα 5.1.2.4 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για διαφορετικές πυκνότητες καννάβου, με κλίση ασυνεχειών 90° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: $s_3=15$ και $s_4=15$, Κάτω: $s_3=45$ και $s_4=45$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για το μοντέλο Ubiquitous-Joint όπως παρουσιάζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.1.2.1 έως 5.1.2.11 υποδεικνύουν ότι η τιμή των μετατοπίσεων δεν σταθεροποιείται μετά από έναν αριθμό ζωνών, όπως συνέβη με το μοντέλο Mohr-Coulomb. Αντίθετα, όσο αυξάνεται το πλήθος των σχηματιζόμενων ζωνών τόσο αυξάνεται και το μέγεθος των προκαλούμενων μετατοπίσεων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιθανώς εξαιτίας της διαρρύθμισης του μοντέλου Ubiquitous-Joint, σύμφωνα με την οποία κάθε σχηματιζόμενη ζώνη περιλαμβάνει και από μία ασυνέχεια (Σχ. 4.3.1). Συνεπώς, η αύξηση του αριθμού των ζωνών συνεπάγεται και αύξηση του πλήθους των ασυνεχειών στη δομή της ανισότροπης βραχομάζας. Ως εκ τούτου, η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται και προκαλούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις γύρω από την κυκλική σήραγγα (φαινόμενο που αναλύεται και στο υποκεφάλαιο 3.1.6). Τα διαγράμματα μεταβολής του όρου s_3 είναι τα μόνα στα οποία δεν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο ιδιαίτερα καθώς η αύξηση της τιμής του σηματοδοτεί την αύξηση του αριθμού των ζωνών περιμετρικά του κυκλικού ανοίγματος της σήραγγας και συνεπώς η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών παραμένει σταθερή όπως αντίστοιχα και το μέγεθος των προκαλούμενων μετατοπίσεων.

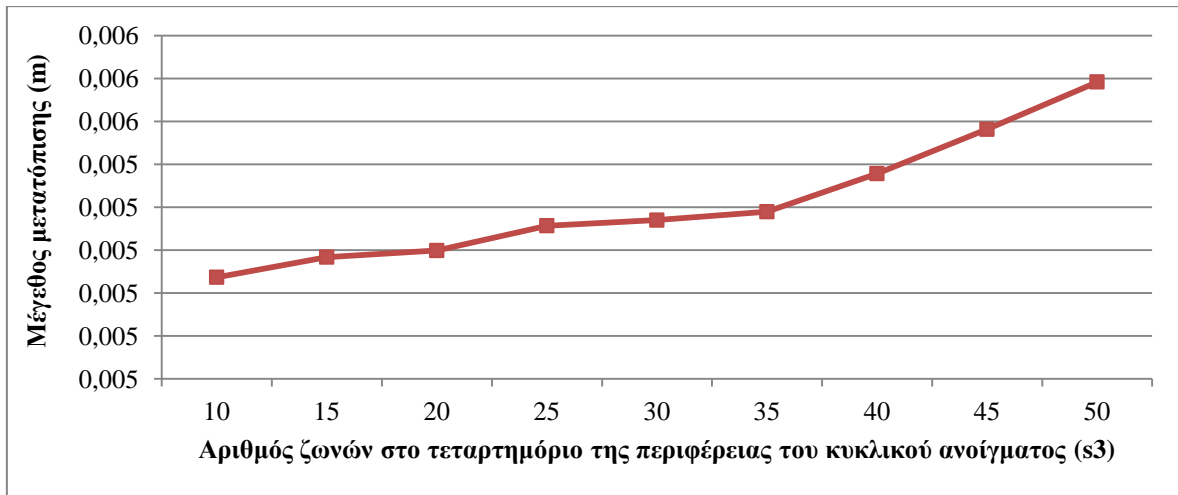
Η σχεδιαστική αυτή αδυναμία του μοντέλου Ubiquitous-Joint εμποδίζει την επιλογή βέλτιστου καννάβου. Καθώς όμως η ολοκλήρωση ενός υπόγειου έργου συνεπάγεται και την εφαρμογή μέτρων υποστήριξης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και σε κυκλική σήραγγα, επενδυμένη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση του καννάβου και στις μετατοπίσεις μίας υπόγειας εκσκαφής με τοποθετημένο σύστημα υποστήριξης.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 4.2 αποτελεί στοιχείο κελύφους (shell element) του λογισμικού FLAC3D. Συνεπώς, η εισαγωγή του στο πρόγραμμα γίνεται με την εντολή “**structure shell create**”, έχοντας προσδιορίσει αρχικά το εύρος (“range”) της εφαρμογής του. Εφόσον η σήραγγα είναι κυκλικής διατομής, ακτίνας (“radius”) 5m, με μήκος κεντρικού άξονα ίσο με 0.2m, τότε το εύρος τοποθέτησης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορίζεται ως εξής: “**structure shell create by-face range cylinder end-1 (0,0,0) end-2 (0,0.2,0) radius 5**”. Η παράμετρος by-face προσδιορίζει το στοιχείο πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί το μέτρο υποστήριξης, που στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελεί την εσωτερική επιφάνεια (“face”) της σήραγγας, ενώ end-1 και end-2 αποτελούν τα δύο ακριανά σημεία του κυλινδρικού “cylinder” εύρους εφαρμογής του στοιχείου κελύφους. Τελευταίο βήμα για την εισαγωγή του σκυροδέματος ως shell element στο πρόγραμμα αποτελεί ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του. Συνεπώς, ορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας ίσο με 20GPa και ο λόγος Poisson ίσος με 0.25, ενώ το υλικό χαρακτηρίστηκε ως ισότροπο με πάχος 0.3m. Η εντολή που συντάχθηκε για να αποδοθούν οι ιδιότητες αυτές στο μέτρο στήριξης είναι η εξής: “**structure shell property isotropic 20e9 0.25 thick 0.3**”. Ο συνολικός κώδικας για την εφαρμογή υποστήριξης στο μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.2.5

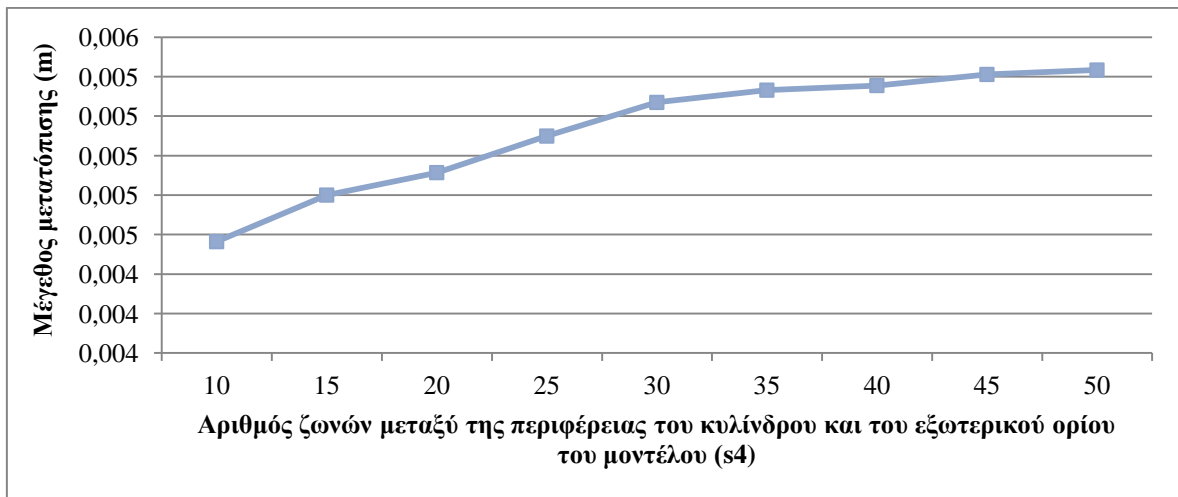
```
1 structure shell create by-face range cylinder end-1 (0,0,0) end-2 (0,0.2,0) radius 5
2 structure shell property isotropic 20e9 0.25 thick 0.3
```

Εικόνα 5.1.2.5 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία και εφαρμογή μέτρου υποστήριξης τύπου shell element

Με βάση αυτό το ενισχυμένο μοντέλο κυκλικής σήραγγας, πραγματοποιήθηκε καινούργια σειρά δοκιμών για την αξιολόγηση της επίδρασης του καννάβου στην υποστηριγμένη εκσκαφή. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής της τιμής των μετατοπίσεων σε σχέση με τον αριθμό των ζωνών για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° και διεύθυνση κλίσης ίση με 90°. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



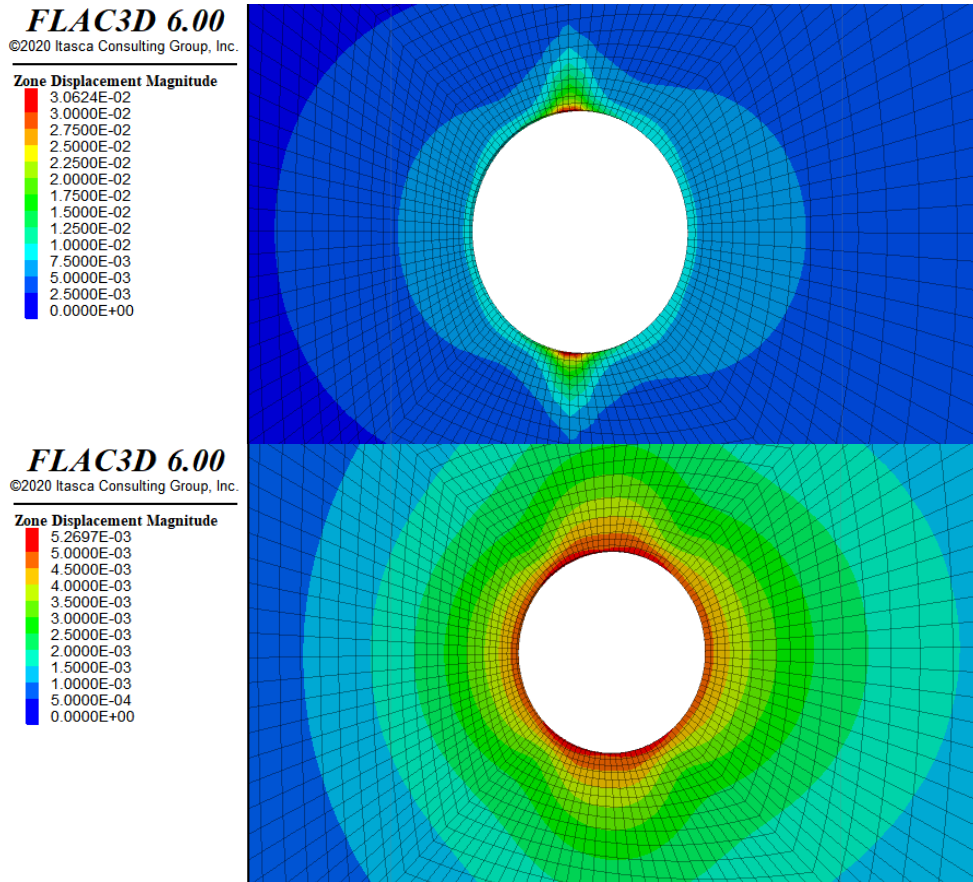
Σχήμα 5.1.2.12 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s_3



Σχήμα 5.1.2.13 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή της μεταβλητής s_4



Σχήμα 5.1.2.14 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων σε σχέση με την τιμή των μεταβλητών s_3 και s_4



Εικόνα 5.1.2.6 Σύγκριση μεταξύ του μεγέθους και της κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από την κυκλική σήραγγα για υποστηριγμένη και ανυποστήριχτη σήραγγα, με κλίση ασυνεχειών 0° και διεύθυνση κλίσης 90° . Πάνω: ανυποστήριχτη σήραγγα με $s3=30$ και $s4=30$, Κάτω: υποστηριγμένη σήραγγα με $s3=30$ και $s4=30$

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών για σήραγγα με τοποθετημένο σύστημα υποστήριξης συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της πυκνότητας του καννάβου επηρεάζει κατά πολύ λιγότερο το μέγεθος των προκαλούμενων μετατοπίσεων σε σχέση με την ανυποστήρικτη σήραγγα. Παρατηρείται από τα διαγράμματα των Σχ. 5.1.2.12 έως 5.1.2.14 ότι η αύξηση του αριθμού των ζωνών προκαλεί αύξηση της τάξης των χιλιοστών στις μετατοπίσεις. Ειδικότερα, κατά την ταυτόχρονη αύξηση των μεταβλητών $s3$ και $s4$ (Σχ. 5.1.2.14), η ομοιόμορφη μεταβολή του πλήθους των ζωνών τόσο περιμετρικά της σήραγγας όσο και ακτινικά, επιδρά ελάχιστα στο μέγεθος των μετατοπίσεων το οποίο μένει σχεδόν σταθερό στα 5mm.

Ως γενικό συμπέρασμα, σε ένα ισότροπο υλικό που χαρακτηρίζεται από το κριτήριο Mohr-Coulomb, η βέλτιστη τιμή των μεταβλητών $s3$ και $s4$ ορίστηκε ίση με 30 καθώς από αυτόν τον αριθμό ζωνών και έπειτα οι προκαλούμενες μετατοπίσεις αρχίζουν να σταθεροποιούνται. Ωστόσο, για ανισότροπο υλικό Mohr-Coulomb, δεν παρατηρείται

κάποια σταθεροποίηση των μετατοπίσεων όσο και αν μεταβάλλεται η πυκνότητα του καννάβου. Με την τοποθέτηση όμως μέτρων υποστήριξης στο μοντέλο το μέγεθος των μετατοπίσεων εμφάνισε αμελητέα μεταβολή με την αύξηση των μεταβλητών s_3 και s_4 . Συνεπώς, ως τελική απόφαση σε μοντέλο Ubiquitous-Joint, για το βέλτιστο αριθμό ζωνών περιμετρικά της σήραγγας και μεταξύ της περιφέρειάς και του εξωτερικού ορίου της, λαμβάνονται οι 30 ζώνες (x4 για το τμήμα περιμετρικά της σήραγγας καθώς ο όρος s_3 αφορά το ένα τεταρτημόριο του κυκλικού ανοίγματος). Η επιλογή αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι μετατοπίσεις δεν επηρεάζονται από τον κάνναβο όταν πραγματοποιηθεί τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης και συνεπώς ο σχεδιασμός μίας κατάλληλης διαμόρφωσης των ζωνών του μοντέλου έχει μικρή βαρύτητα στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Παρ' όλα αυτά, ως τιμή για τις μεταβλητές s_3 και s_4 ορίζονται οι 30 ζώνες καθώς το υλικό Ubiquitous-Joint χαρακτηρίζεται και αυτό από το κριτήριο Mohr-Coulomb και επομένως, πέραν την ανισοτροπίας, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων (Ubiquitous-Joint και Mohr-Coulomb) είναι τα ίδια.

5.2 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «T»

Το πρώτο είδος διασταύρωσης σηράγγων που εξετάστηκε σε ανισότροπη βραχομάζα Ubiquitous-Joint ήταν της μορφής «T». Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η κάθετη διασταύρωση μίας κύριας σήραγγας 100m με μία δευτερεύουσα 50m, ίδιας κυκλικής διατομής (5m ακτίνα η κάθε μία). Αυτό το είδος διασταύρωσης αποτελεί μία από της πιο απλές περιπτώσεις τομής σηράγγων, δηλαδή δύο εκσκαφές ίδιου κυκλικού ανοίγματος που τέμνονται υπό γωνία 90° (η ασφαλέστερη γωνία διασταύρωσης, όπως αναλύθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.3) και συνεπώς επιλέχθηκε ως αντικείμενο αρχικής μελέτης.

Για την κατασκευή αυτής της μορφής διασταύρωσης έγινε χρήση τόσο του στοιχείου radial-cylinder όσο και του cylindrical-intersection. Αρχικά, εφαρμόστηκε το cylindrical-intersection με σκοπό να κατασκευαστεί η δευτερεύουσα σήραγγα και το μισό τμήμα, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, της κύριας. Ως πρώτο βήμα ορίστηκαν οι απαραίτητες συντεταγμένες του στοιχείου: point 0 (0,0,0), point 1 (50,0,0), point 2 (0,50,0), point 3 (0,0,50), point 4 (50,50,0), point 5 (0,50,50), point 6 (50,0,50) point 7 (50,50,50) point 8 (5,5,0), point 9 (0,0,5), point 10 (5,50,0), point 11 (0,50,5), point 12 (50,5,0) και point 13 (50,0,5). Οι υπόλοιπες παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν ώστε να ολοκληρωθεί η δημιουργία του δομικού στοιχείου είναι ο αριθμός των ζωνών στα διάφορα τμήματα του μοντέλου (size s_1, s_2, \dots), οι βασικές αποστάσεις μεταξύ κομβικών σημείων (dimension d_1, d_2, \dots) και ο λόγος ο οποίος αυξάνει ή μειώνει γεωμετρικά την απόσταση μεταξύ των ζωνών στα διάφορα τμήματα του μοντέλου (ratio r_1, r_2, \dots).

Όσον αφορά τις αποστάσεις d_i , όπου $i=1,2,\dots$, ορίζονται όλες ίσες με 5 ώστε η μοντελοποιημένη σήραγγα να αποκτήσει την επιθυμητή διάμετρο των 10m. Ο λόγος ratio αντίστοιχα λαμβάνει για όλες τις μεταβλητές του τιμή ίση με τη μονάδα ώστε να δημιουργηθεί ομοιόμορφος κάνναβος. Μόνο η τελευταία μεταβλητή του, που αφορά το τμήμα μεταξύ της περιφέρειας της σήραγγας και του εξωτερικού ορίου του μοντέλου, ορίζεται ως 1.1 με σκοπό να επιτευχθεί μεγαλύτερη διακριτοποίηση του καννάβου στην περιοχή πλησίον της εκσκαφής και συνεπώς να ληφθούν πιο ακριβείς μετρήσεις. Τέλος, η παράμετρος size, σύμφωνα με τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα υποκεφάλαια 5.1.1 και 5.1.2 θα λάβει για τις μεταβλητές s_3 και s_4 τιμή ίση με 30. Εφόσον επιδιώκεται πυκνότητα καννάβου ίση με μία ζώνη ανά μισό μέτρο κατά μήκος του κεντρικού άξονα των τεμνόμενων σηράγγων, τότε οι όροι s_1 και s_2 λαμβάνουν την τιμή 100 καθώς αντιστοιχούν στον αριθμό των ζωνών κατά τη διαμήκη διεύθυνση της δευτερεύουσας

σήραγγας και κύριας αντίστοιχα. Τέλος, η μεταβλητή $s5$, η οποία συμβολίζει το πλήθος των ζωνών από το κέντρο έως την περιφέρεια του κυλίνδρου κατά μήκος της ακτίνας του, ορίζεται ως μονάδα διότι το τμήμα αυτό στη συνέχεια θα εκσκαφθεί και συνεπώς δεν χρήζει κάποιας ιδιαίτερης σημασίας η πυκνότητα του καννάβου στην περιοχή αυτή.

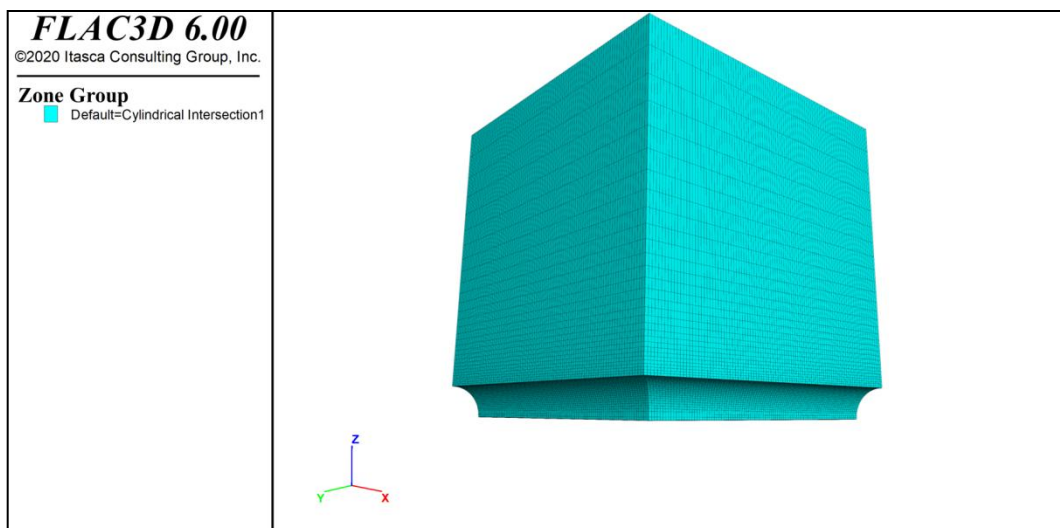
Ο συνολικός κώδικας που συντάχθηκε για τη δημιουργία αυτού του αρχικού σχήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.1 και το τρισδιάστατο στοιχείο απεικονίζεται στην Εικόνα 5.2.2.

```

1 zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (50,0,0) point 2 (0,50,0) ...
&2 point 3 (0,0,50) point 4 (50,50,0) point 5 (0,50,50) ...
&3 point 6 (50,0,50) point 7 (50,50,50) point 8 (5,5,0) ...
&4 point 9 (0,0,5) point 10 (5,50,0) point 11 (0,50,5) ...
&5 point 12 (50,5,0) point 13 (50,0,5) ...
&6 dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1 1 1

```

Εικόνα 5.2.1 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία στοιχείου cylindrical-intersection



Εικόνα 5.2.2 Τρισδιάστατο στοιχείο cylindrical-intersection του προγράμματος FLAC3D

Ως επόμενο βήμα για να σχηματιστεί το άνω ημικύκλιο της δευτερεύουσας σήραγγας και αντίστοιχα το άνω δεξί τεταρτημόριο της κύριας, εισάγεται άλλο ένα στοιχείο cylindrical-intersection με τις ίδιες παραμέτρους dim , $size$ και $ratio$ με το προηγούμενο, αλλά με τις εξής νέες συντεταγμένες: point 0 (0,0,0), point 1 (0,-50,0), point 2 (50,0,0), point 3 (0,0,50), point 4 (50,-50,0), point 5 (50,0,50), point 6 (0,-50,50), point 7 (50,-50,50), point 8 (5,-5,0), point 9 (0,0,5), point 10 (50,-5,0) point 11 (50,0,5), point 12 (5,-50,0) και point 13 (0,-50,5). Συνεπώς, το πρόσθετο κομμάτι του κώδικα που συντάχθηκε

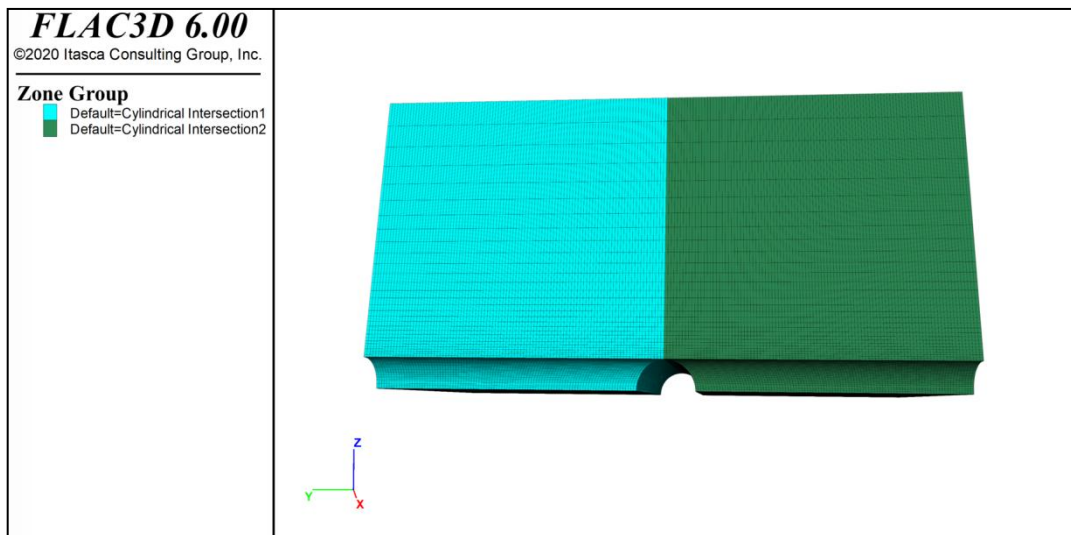
παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.3 και το μοντέλο που προκύπτει απεικονίζεται στην Εικόνα 5.2.4.

```

1 zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (50,0,0) point 2 (0,50,0) ...
& 2 point 3 (0,0,50) point 4 (50,50,0) point 5 (0,50,50) ...
& 3 point 6 (50,0,50) point 7 (50,50,50) point 8 (5,5,0) ...
& 4 point 9 (0,0,5) point 10 (5,50,0) point 11 (0,50,5) ...
& 5 point 12 (50,5,0) point 13 (50,0,5) ...
& 6 dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1.1 1
7 zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (0,-50,0) point 2 (50,0,0) ...
& 8 point 3 (0,0,50) point 4 (50,-50,0) point 5 (50,0,50) ...
& 9 point 6 (0,-50,50) point 7 (50,-50,50) point 8 (5,-5,0) ...
&10 point 9 (0,0,5) point 10 (50,-5,0) ...
&11 point 11 (50,0,5) point 12 (5,-50,0) point 13 (0,-50,5) ...
&12 dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1.1 1

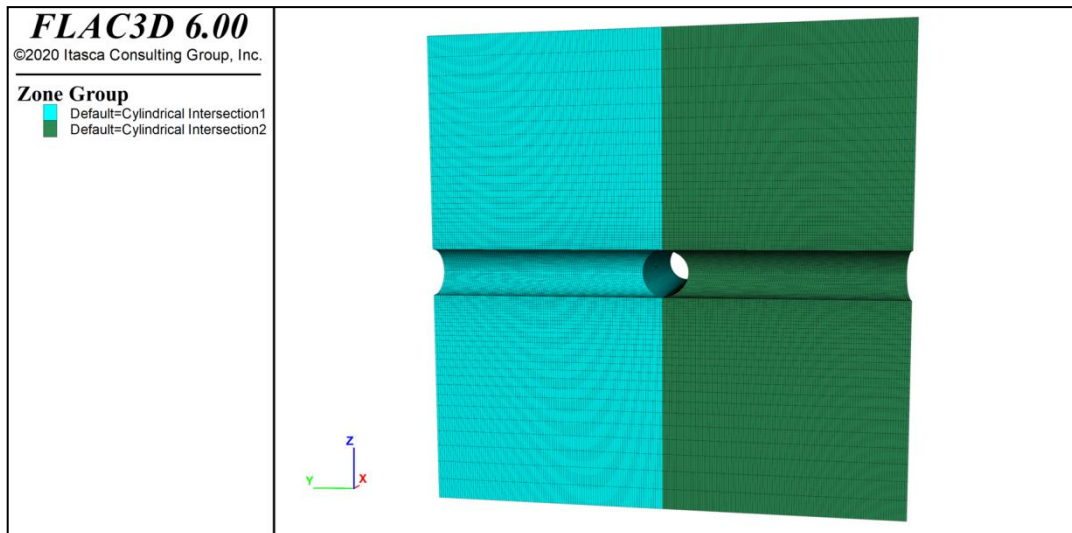
```

Εικόνα 5.2.3 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία δύο στοιχείων cylindrical-intersection



Εικόνα 5.2.4 Συνδυασμός δύο τρισδιάστατων στοιχείων cylindrical-intersection

Για να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός της δευτερεύουσας σήραγγας, καθώς και το μισό τμήμα της κύριας κατά τη διαμήκη διεύθυνση της, ορίζεται η εντολή “**zone reflect dip 0 dip-direction 0 origin (0,0,0)**”. Κατά αυτόν τον τρόπο αντιγράφεται το ήδη δημιουργημένο σχήμα (Εικόνα 5.2.4) και αντικατοπτρίζεται υπό κλίση 0° και διεύθυνση κλίσης 0° με βάση την αρχή των αξόνων $(0,0,0)$. Συνεπώς, σχηματίζεται το μοντέλο της Εικόνας 5.2.5 στην οποία εμφανίζεται πλήρως διανοιγμένη η δευτερεύουσα σήραγγα ενώ επίσης έχει δημιουργηθεί και το μισό τμήμα της κύριας σήραγγας κατά μήκος του κεντρικού της άξονα (άξονας y).

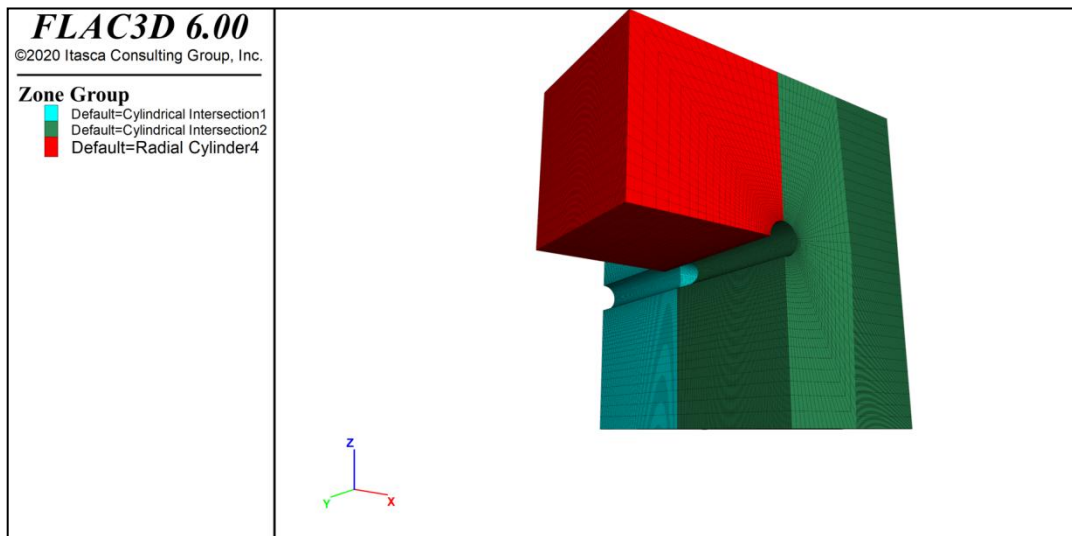


Εικόνα 5.2.5 Συνδυασμός δύο τρισδιάστατων στοιχείων cylindrical-intersection έπειτα από εντολή “zone reflect”

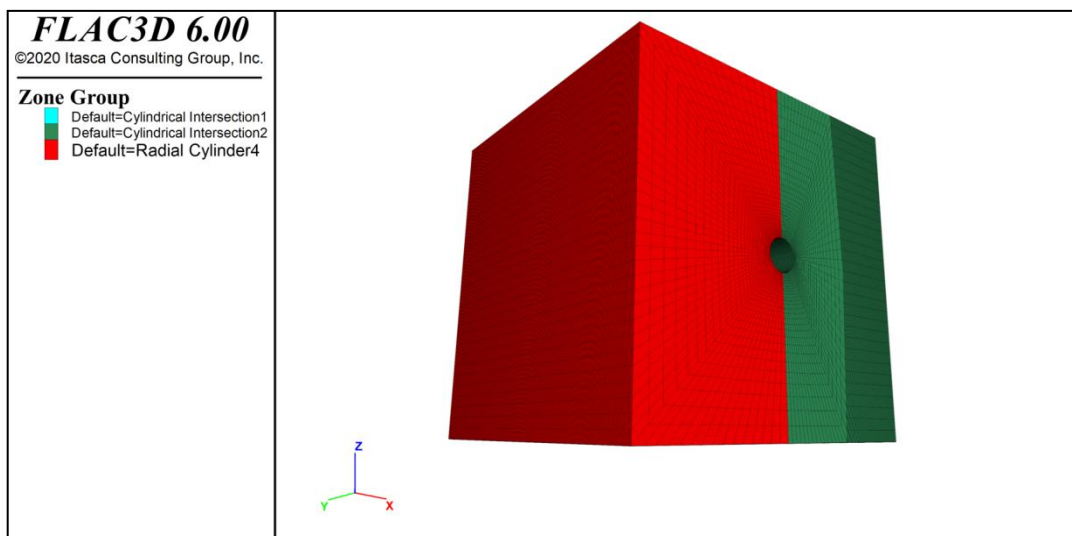
Έχοντας σχηματίσει τη δευτερεύουσα σήραγγα, τελευταίο βήμα αποτελεί η ολοκλήρωση σχεδιασμού της κύριας. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στοιχείου radial-cylinder. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι size, dim και ratio παίρνουν τις ίδιες τιμές με αυτές των στοιχείων cylindrical-intersection, δηλαδή το dim σε όλες τις μεταβλητές του λαμβάνει τιμή 5, οι όροι του ratio ορίζονται ως μονάδες εκτός από τον τελευταίο που εισάγεται ως 1.1 και στις μεταβλητές s1, s2, s3 και s4 της παραμέτρου size προσδίδονται οι τιμές 1, 100, 30 και 30 αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ομοιομορφία του καννάβου παρά την εισαγωγή δύο διαφορετικών δομικών στοιχείων. Με τα παραπάνω δεδομένα και με συντεταγμένες point 1 (-50,0,0), point 2 (0,-50,0) και point 3 (0,0,50), το radial-cylinder σχεδιάζεται στο χώρο μοντελοποίησης όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.2.6.

Παρατηρείται ωστόσο ότι εφόσον το στοιχείο radial-cylinder αποτελεί ένα μόνο τεταρτημόριο κυλίνδρου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή “zone reflect” με σκοπό να σχηματιστεί ολόκληρη η κυκλική σήραγγα. Συγκεκριμένα, συντάσσεται η εντολή “zone reflect dip 90 dip-direction 180 origin (0,0,0) range position-x 0 -50 position-y 0 -50 position-z 0 50” αρχικά και εν συνεχεία η “zone reflect dip 0 dip-direction 90 origin (0,0,0) range position-x 0 -50 position-y -50 50 position-z 0 50”. Το εύρος (“range”) που ορίζεται σε κάθε περίπτωση αποσκοπεί στην εφαρμογή της εντολής “zone reflect” μόνο σε μία σαφώς προσδιορισμένη περιοχή. Για την πρώτη εντολή, η περιοχή αυτή οριοθετείται στον άξονα x από το 0 έως το -50, στον άξονα y από το 0 έως το -50 και στον άξονα z από το 0 έως το 50. Αντίστοιχη λογική ακολουθεί και ο προσδιορισμός του εύρους στη

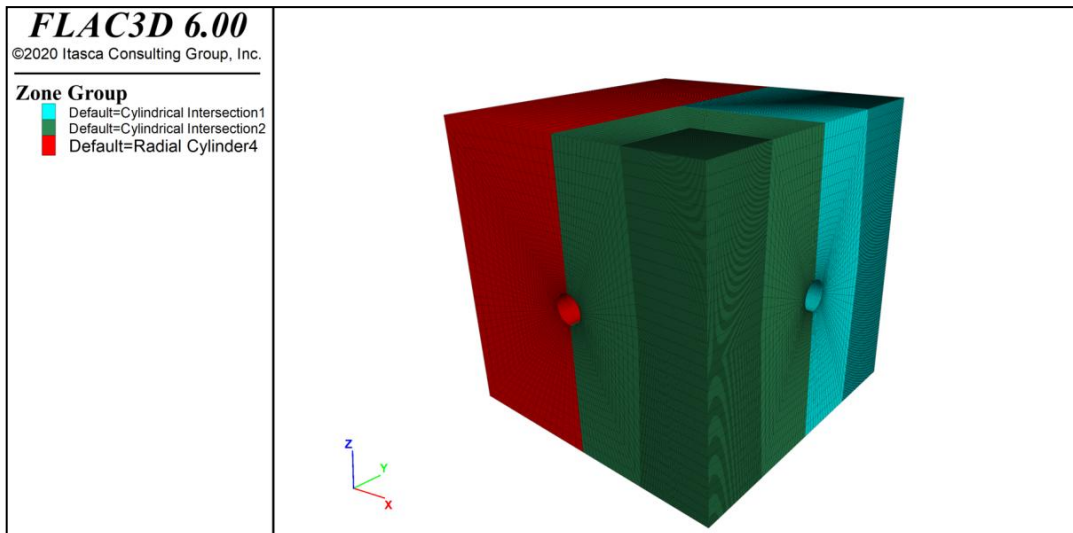
δεύτερη εντολή. Με τον τρόπο αυτόν, εξασφαλίζεται ότι με το “zone reflect” θα αντιγραφεί μόνο το τμήμα του μοντέλου το οποίο ορίζεται από το εκάστοτε εύρος (“range”) που έχει δοθεί. Διαφορετικά, θα αντικατοπτριζόταν όλο το πλήθος των ζωνών του μοντέλου και δε θα επιτυγχανόταν η ορθή μοντελοποίηση της διασταύρωσης. Το τελικό μοντέλο που δημιουργήθηκε απεικονίζεται στις Εικόνες 5.2.7, 5.2.8 και 5.2.9, ενώ ο συνολικός κώδικας που συντάχθηκε για το σχεδιασμό του παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.10.



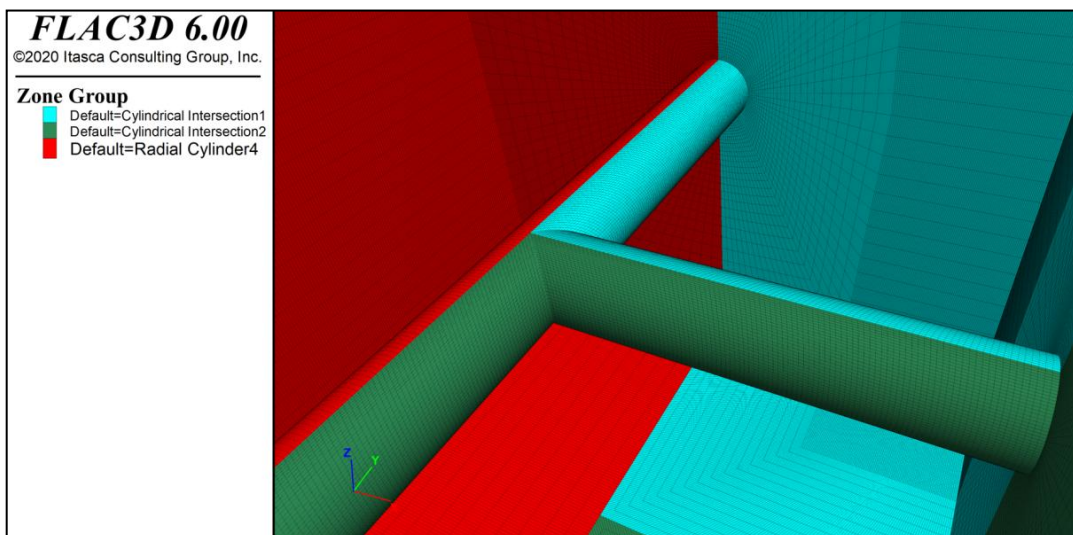
Εικόνα 5.2.6 Συνδυασμός δύο τρισδιάστατων στοιχείων cylindrical-intersection έπειτα από εντολή “zone reflect” και ενός τρισδιάστατου στοιχείου radial-cylinder



Εικόνα 5.2.7 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα

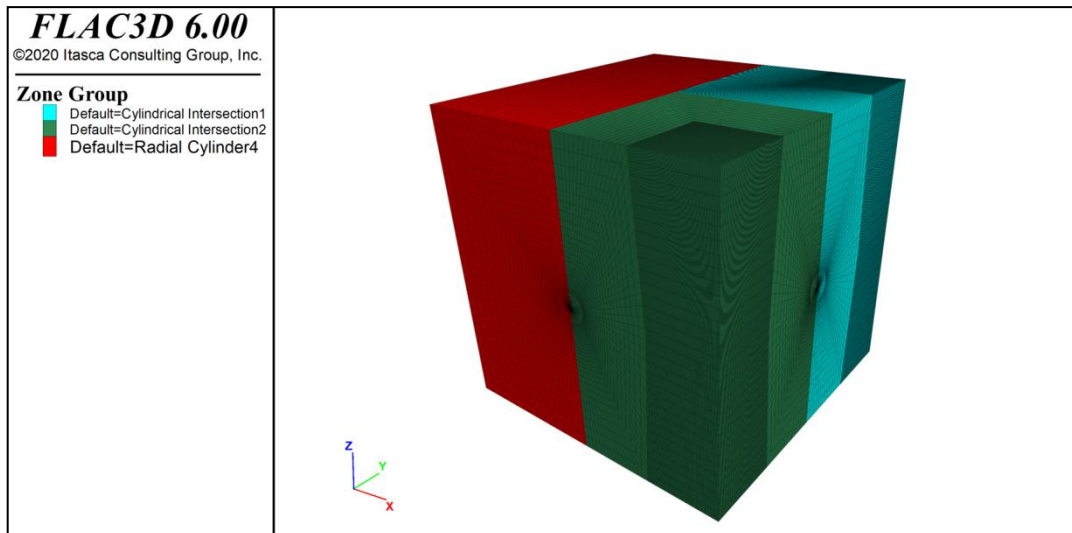


Εικόνα 5.2.8 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα



Εικόνα 5.2.9 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα

Με σκοπό να προσομοιωθεί η εκσκαφή των τεμνόμενων σηράγγων στο επόμενο στάδιο της μελέτης (Κεφάλαιο 6), γίνεται χρήση της εντολής “fill”. Η εντολή αυτή εισάγεται έπειτα από τον προσδιορισμό των παραμέτρων κάθε δομικού στοιχείου (radial-cylinder, cylindrical-intersection) και η λειτουργία της είναι η πλήρωση του εσωτερικού κενού χώρου των σηράγγων με ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω των μεταβλητών s1 του radial-cylinder και s5 του cylindrical-intersection, που έχουν οριστεί ως μονάδες, ο αριθμός των ζωνών ακτινικά του ανοίγματος των σχηματιζόμενων κυλίνδρων θα ισούται και αυτός με ένα. Συνεπώς, δεδομένου ότι η



Εικόνα 5.2.11 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί

```

1 model new
2
3 zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (50,0,0) point 2 (0,50,0) ...
& 4 point 3 (0,0,50) point 4 (50,50,0) point 5 (0,50,50) ...
& 5 point 6 (50,0,50) point 7 (50,50,50) point 8 (5,5,0) ...
& 6 point 9 (0,0,5) point 10 (5,50,0) point 11 (0,50,5) ...
& 7 point 12 (50,5,0) point 13 (50,0,5) ...
& 8 dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1.1 1 fill
9 zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (0,-50,0) point 2 (50,0,0) ...
& 10 point 3 (0,0,50) point 4 (50,-50,0) point 5 (50,0,50) ...
& 11 point 6 (0,-50,50) point 7 (50,-50,50) point 8 (5,-5,0) ...
& 12 point 9 (0,0,5) point 10 (50,-5,0) ...
& 13 point 11 (50,0,5) point 12 (5,-50,0) point 13 (0,-50,5) ...
& 14 dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1.1 1 fill
15
16 zone reflect dip 0 dip-direction 0 origin (0,0,0)
17
18 zone create radial-cylinder point 1 (-50,0,0) point 2 (0,-50,0) ...
& 19 point 3 (0,0,50) dim 5 5 5 5 ...
& 20 size 1 100 30 30 rat 1 1 1 1.1 1 fill
21
22 zone reflect dip 90 dip-direction 180 origin (0,0,0) ...
& 23 range position-x 0 -50 position-y 0 -50 position-z 0 50
24 zone reflect dip 0 dip-direction 90 origin (0,0,0) ...
& 25 range position-x 0 -50 position-y -50 50 position-z 0 50
26
27 zone cmodel assign ubiquitous-joint
28
29 zone property density 2500
30 zone property young 9.215e9 poisson 0.25 cohesion 1.248e6
31 zone property friction 44.399 tension 77e3
32
33 zone property dip 0 dip-direction 0
34 zone property joint-cohesion 0.0 joint-friction 30.0
35 zone property joint-dilation 0.0 joint-tension 0.0
36
37 zone initialize stress xx -7.5e6 yy -7.5e6 zz -7.5e6
38
39 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x -50.1 -49.99
40 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x 49.99 50.1
41
42 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z -50.1 -49.99
43 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z 49.99 50.1
44
45 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y -50.1 -49.99
46 zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y 49.99 50.1
47
48 model solve

```

Εικόνα 5.2.12 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία διασταύρωσης σηράγγων μορφής «T» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί

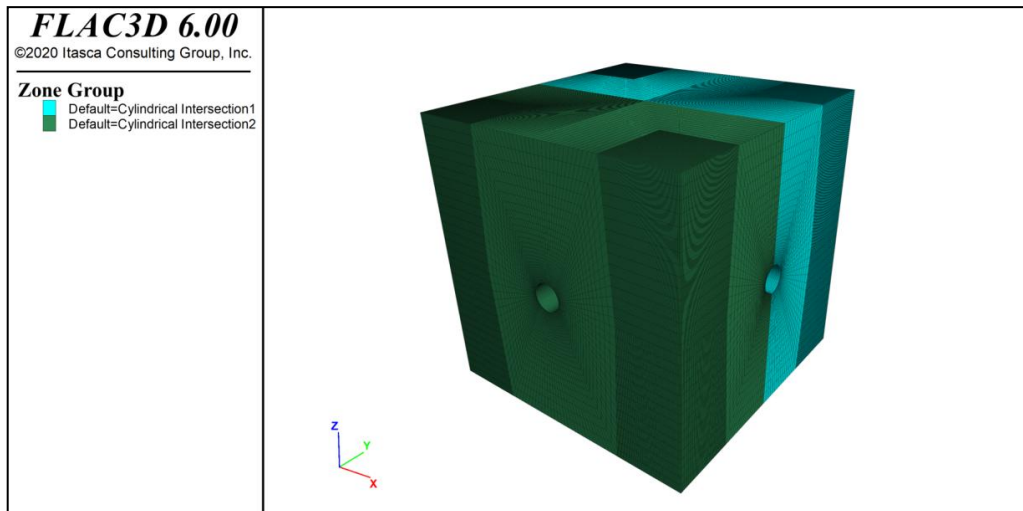
5.3 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «+»

Το δεύτερο είδος διασταύρωσης σηράγγων που εξετάστηκε σε ανισότροπη βραχομάζα είναι της μορφής σταυρού «+». Σκοπός της μελέτης του αποτέλεσε η αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η αύξηση του αριθμού των τεμνόμενων εκσκαφών στη μηχανική συμπεριφορά του υπόγειου έργου. Συγκεκριμένα, η περίπτωση που ερευνήθηκε αποτελεί την κάθετη διασταύρωση τριών κυκλικών σηράγγων ίδιου μεγέθους διατομής.

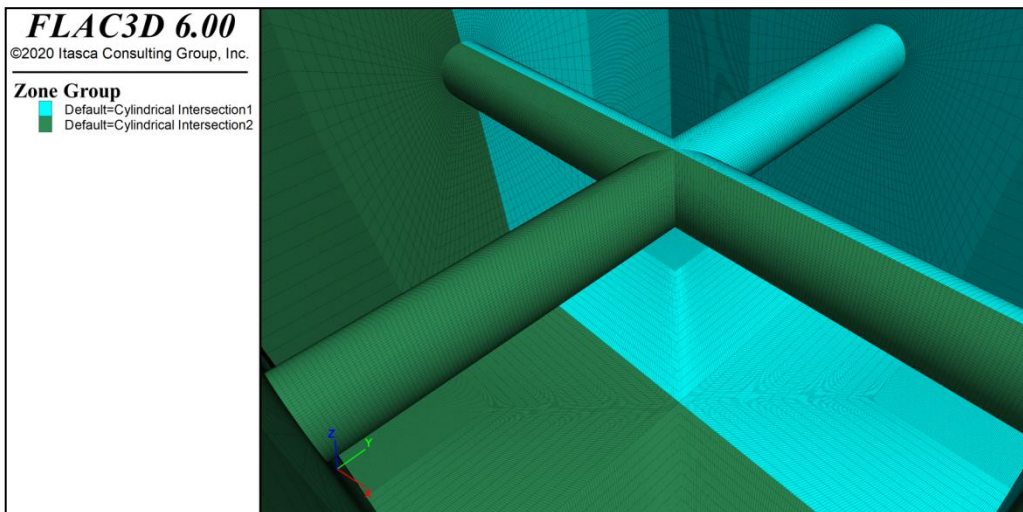
Η μοντελοποίηση αυτής της σταυρωτής διαρρύθμισης των τεμνόμενων σηράγγων ακολουθεί παρόμοια διαδικασία με αυτή της διασταύρωσης μορφής «T», με τη μόνη διαφορά ότι για την κατασκευή του μοντέλου στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται χρήση του δομικού στοιχείου radial-cylinder. Αντ' αυτού, συντάσσονται δύο εντολές “zone reflect” που εφαρμόζονται στο στοιχείο cylindrical-intersection.

Πιο αναλυτικά, ως αρχικό βήμα του σχεδιασμού ορίστηκε η μοντελοποίηση της μίας από τις δύο δευτερεύουσες σήραγγες και το μισό τμήμα της κύριας, κατά τη διαμήκη διεύθυνσή της. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό είναι ακριβώς ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (Εικόνα 5.2.3) και το μοντέλο που προκύπτει είναι αυτό της Εικόνας 5.2.4. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν οι εντολές “zone reflect”. Αρχικά συντάχθηκε η “zone reflect dip 0 dip-direction 0 origin (0,0,0)”, όπως ακριβώς πραγματοποιήθηκε και στα αρχικά στάδια σχεδιασμού της διασταύρωσης μορφής «T». Συνεπώς, το σχήμα που κατασκευάζεται είναι ίδιο με αυτό της Εικόνας 5.2.5. Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, ορίζεται η δεύτερη εντολή “zone reflect” η οποία, με σταθερό το σημείο (0,0,0), αντιγράφει και περιστρέφει το μοντέλο της Εικόνας 5.2.5 υπό κλίση 90° και διεύθυνση κλίσης 270° . Η εντολή αυτή συντάσσεται ως εξής: “zone reflect dip 90 dip-direction 270 origin (0,0,0)” και ολοκληρώνει την κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου η οποία απεικονίζεται στις Εικόνες 5.3.1 και 5.3.2.

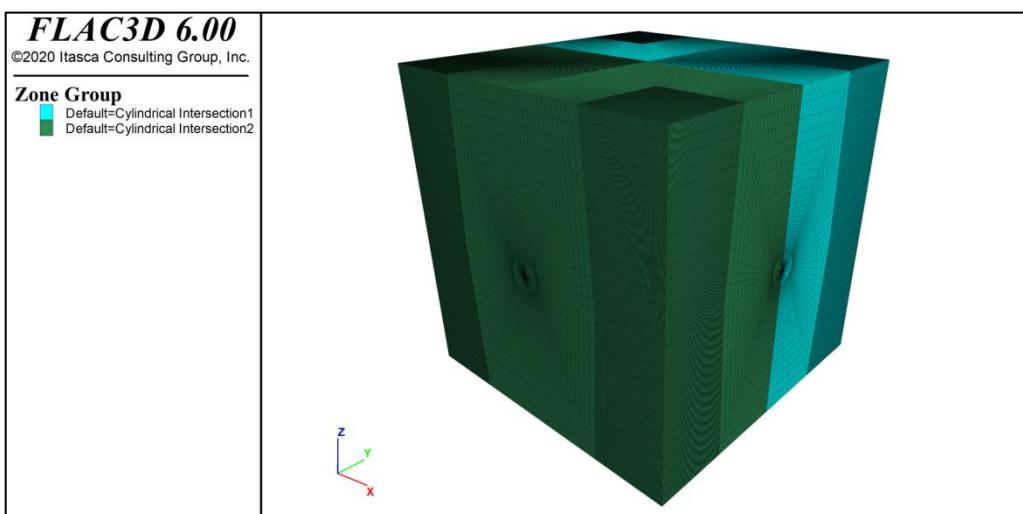
Τελευταία ενέργεια για τη μοντελοποίηση της διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων, μορφής σταυρού, σε ανισότροπη βραχομάζα αποτελεί ο προσδιορισμός των γεωστατικών τάσεων, των συνοριακών συνθηκών και των ιδιοτήτων για το κριτήριο Mohr-Coulomb και το μοντέλο Ubiquitous-Joint, όπως έχει ήδη αναλυθεί προηγουμένως. Συνολικά, το μοντέλο διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+», των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί, αποτελείται από 268800 ζώνες πεπερασμένων διαφορών και απεικονίζεται στην Εικόνα 5.3.3. Ο συνολικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.4.



Εικόνα 5.3.1 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα



Εικόνα 5.3.2 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα



Εικόνα 5.3.3 Τελικό μοντέλο σχεδιασμού διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί

```

1  model new
2
3  zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (50,0,0) point 2 (0,50,0) ...
& 4      point 3 (0,0,50) point 4 (50,50,0) point 5 (0,50,50) ...
& 5      point 6 (50,0,50) point 7 (50,50,50) point 8 (5,5,0) ...
& 6      point 9 (0,0,5) point 10 (5,50,0) point 11 (0,50,5) ...
& 7      point 12 (50,5,0) point 13 (50,0,5) ...
& 8      dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1.1 1 fill
9  zone create cylindrical-intersection point 0 (0,0,0) point 1 (0,-50,0) point 2 (50,0,0) ...
& 10     point 3 (0,0,50) point 4 (50,-50,0) point 5 (50,0,50) ...
& 11     point 6 (0,-50,50) point 7 (50,-50,50) point 8 (5,-5,0) ...
& 12     point 9 (0,0,5) point 10 (50,-5,0) ...
& 13     point 11 (50,0,5) point 12 (5,-50,0) point 13 (0,-50,5) ...
& 14     dim 5 5 5 5 5 5 size 100 100 30 30 1 rat 1 1 1 1.1 1 fill
15
16  zone reflect dip 0 dip-direction 0 origin (0,0,0)
17  zone reflect dip 90 dip-direction 270 origin (0,0,0)
18
19  zone cmodel assign ubiquitous-joint
20
21  zone property density 2500
22  zone property young 9.215e9 poisson 0.25 cohesion 1.248e6
23  zone property friction 44.399 tension 77e3
24
25  zone property dip 0 dip-direction 0
26  zone property joint-cohesion 0.0 joint-friction 30.0
27  zone property joint-dilation 0.0 joint-tension 0.0
28
29  zone initialize stress xx -7.5e6 yy -7.5e6 zz -7.5e6
30
31  zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x -50.1 -49.99
32  zone face apply velocity-normal 0.0 range position-x 49.99 50.1
33
34  zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z -50.1 -49.99
35  zone face apply velocity-normal 0.0 range position-z 49.99 50.1
36
37  zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y -50.1 -49.99
38  zone face apply velocity-normal 0.0 range position-y 49.99 50.1
39
40  model solve

```

Εικόνα 5.3.4 Κώδικας FLAC3D για τη δημιουργία διασταύρωσης σηράγγων μορφής «+» σε ανισότροπη βραχομάζα, των οποίων η διάνοιξη δεν έχει πραγματοποιηθεί

6 Δεύτερο στάδιο προσομοιώσεων - Υπολογισμός μετατοπίσεων και πλαστικής ζώνης

Επόμενο και τελικό βήμα της προσομοίωσης μετά την κατασκευή των μοντέλων διασταύρωσης του Κεφαλαίου 5 αποτελεί η διαδοχική διάνοιξη των τεμνόμενων σηράγγων και η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους εντός της ανισότροπης βραχομάζας. Η αξιολόγηση αυτή θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με το μέγεθος των μετατοπίσεων και της πλαστικής ζώνης που δημιουργούνται στο περιβάλλον πέτρωμα των εκσκαφών. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι προκαλούμενες μετατοπίσεις και η πλαστική ζώνη στη στέψη και στις παρειές των σηράγγων για διάφορους συνδυασμούς κλίσης και διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών.

Βασικός στόχος αυτών των αναλύσεων αποτελεί η κατανόηση της επίδρασης που έχει η ανισοτροπία της βραχομάζας στο μέγεθος και στα σημεία εντοπισμού των μέγιστων καταπονήσεων στις υπόγειες εκσκαφές. Επίσης, με τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών επιδιώκεται να μελετηθεί το είδος και η έκταση της αστοχίας του πετρώματος καθώς και να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών μορφών διασταύρωσης, «+» και «T».

Πρώτο βήμα πριν την έναρξη των υπολογισμών αποτελεί ο μηδενισμός των μετατοπίσεων που έχουν καταγραφεί στο μοντέλο κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού του. Συγκεκριμένα, έπειτα από την εφαρμογή των αρχικών συνθηκών (δηλαδή των συνοριακών και του γεωστατικού πεδίου) προκλήθηκαν μετατοπίσεις κατά την αυτόματη διαδικασία ισορρόπησης του μοντέλου. Ωστόσο, στην πραγματικότητα η ύπαρξη αυτού του γεωστατικού πεδίου αποτελεί τη φυσική εντατική κατάσταση του υλικού που προσημειώνεται και κατά συνέπεια δεν υφίστανται οι προαναφερθείσες μετατοπίσεις. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο μηδενισμός τους ώστε κατά τη διαδικασία διάνοιξης των τεμνόμενων σηράγγων να καταγραφούν μόνο οι μετατοπίσεις και η δημιουργούμενη πλαστική ζώνη που οφείλεται στην εκσκαφή τους. Οι εντολές για το μηδενισμό αυτό παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.1.

```
1 zone initialize state 0
2 zone gridpoint initialize displacement-x 0
3 zone gridpoint initialize displacement-y 0
4 zone gridpoint initialize displacement-z 0
```

Εικόνα 6.1 Εντολές μηδενισμού μετατοπίσεων και αστοχίας μετά την αρχική ισορροπία του μοντέλου

Η παράμετρος “state” αφορά την κατάσταση αστοχίας του υλικού και οι όροι “displacements” ορίζουν τις αντίστοιχες μετατοπίσεις στους άξονες x,y και z. Με την εντολή “initialize” και την απόδοση της τιμής μηδέν στις παραμέτρους αυτές το μοντέλο επανέρχεται σε συνθήκες ισορροπίας.

Έχοντας εξισορροπήσει το εντατικό πεδίο του μοντέλου και μηδενίσει οποιαδήποτε μη ρεαλιστικά προκαλούμενη μετατόπιση πριν τη διαδικασία της εκσκαφής, επόμενο και τελικό στάδιο αποτελεί η διάνοιξη των τεμνόμενων σηράγγων. Αυτή η ενέργεια θα πραγματοποιηθεί με την εντολή “zone delete” η οποία διαγράφει όλες τις ζώνες σε ένα συγκεκριμένο εύρος του μοντέλου που ορίζει ο χρήστης. Αν και με την εντολή αυτή δεν προσομοιώνεται επακριβώς κάποια μέθοδο υπόγειας διάνοιξης, επιτυγχάνεται η επιθυμητή ενέργεια, που αποτελεί τη δημιουργία κενού χώρου στη θέση του κυλινδρικού όγκου των σηράγγων, φαινόμενο το οποίο θα προκαλέσει στη συνέχεια μετατοπίσεις και παραμορφώσεις στην περιβάλλουσα βραχομάζα. Συνεπώς, δίχως τον καθορισμό κάποιου συγκεκριμένου τρόπου διάνοιξης μπορεί και πάλι να αξιολογηθεί, με πιο γρήγορη υπολογιστική διαδικασία, η επίδραση που έχει η ανισοτροπία του πετρώματος στη μηχανική συμπεριφορά των σηράγγων κατά τη διασταύρωσή τους.

Όσον αφορά τη διασταύρωση μορφής «T», συντάχθηκαν δύο εντολές “zone delete”, μία για την κάθε σήραγγα. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη της κύριας σήραγγας και η εντολή που χρησιμοποιήθηκε είναι η “zone delete range cylinder end-1 (0,-50,0) end-2 (0,50,0) radius 5”. Σύμφωνα με την εντολή αυτή, ορίζεται η διαγραφή του συνόλου των ζωνών που εμπεριέχονται στο εύρος του κυλινδρικού σχήματος “cylinder”, ακτίνας 5m και μήκους που ισούται με την απόσταση από το σημείο (0,-50,0) έως το (0,50,0). Για την δευτερεύουσα σήραγγα έγινε χρήση της εντολής “zone delete range cylinder end-1 (50,0,0) end-2 (0,0,0) radius 5” ώστε να πραγματοποιηθεί η εκσκαφή της και η κάθετη τομή της με την κύρια σήραγγα.

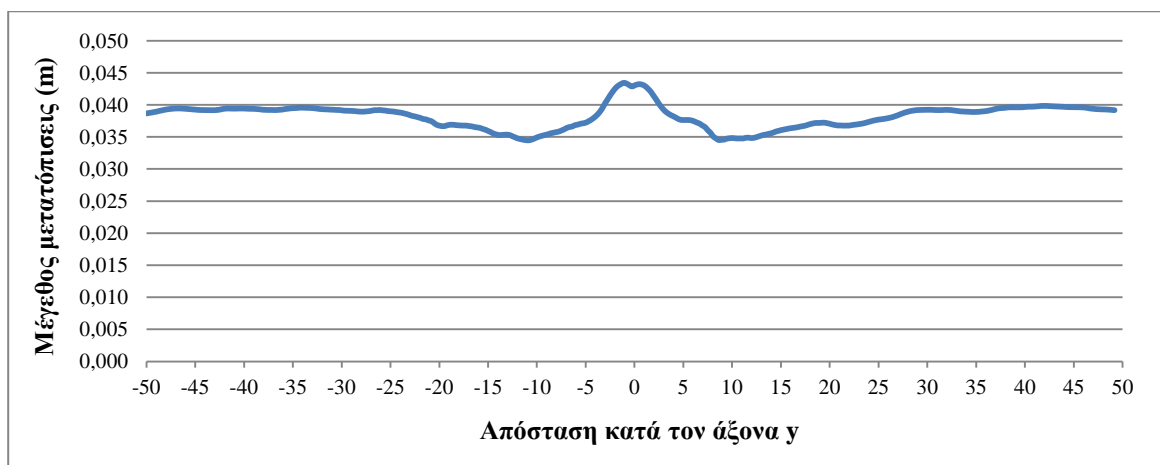
Για το σχηματισμό της διασταύρωσης μορφής σταυρού «+», οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τη διάνοιξη των σηράγγων ήταν τρεις, μία για την κύρια και δύο για τις δύο δευτερεύουσες. Γενικά, η διαρρύθμιση αυτού του είδους διασταύρωσης είναι παρόμοιο με της μορφής «T», με τη μόνη διαφορά να είναι η προσθήκη της επιπλέον δευτερεύουσας σήραγγας. Συνεπώς, οι δύο πρώτες εντολές “zone delete” θα είναι ίδιες με αυτές της διασταύρωσης σχήματος «T», ενώ η τρίτη, που αφορά τη διάνοιξη της επιπλέον δευτερεύουσας σήραγγας από την άλλη πλευρά της κύριας, ορίζεται ως “zone delete range cylinder end-1 (-50,0,0) end-2 (0,0,0) radius 5”.

6.1 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «T»

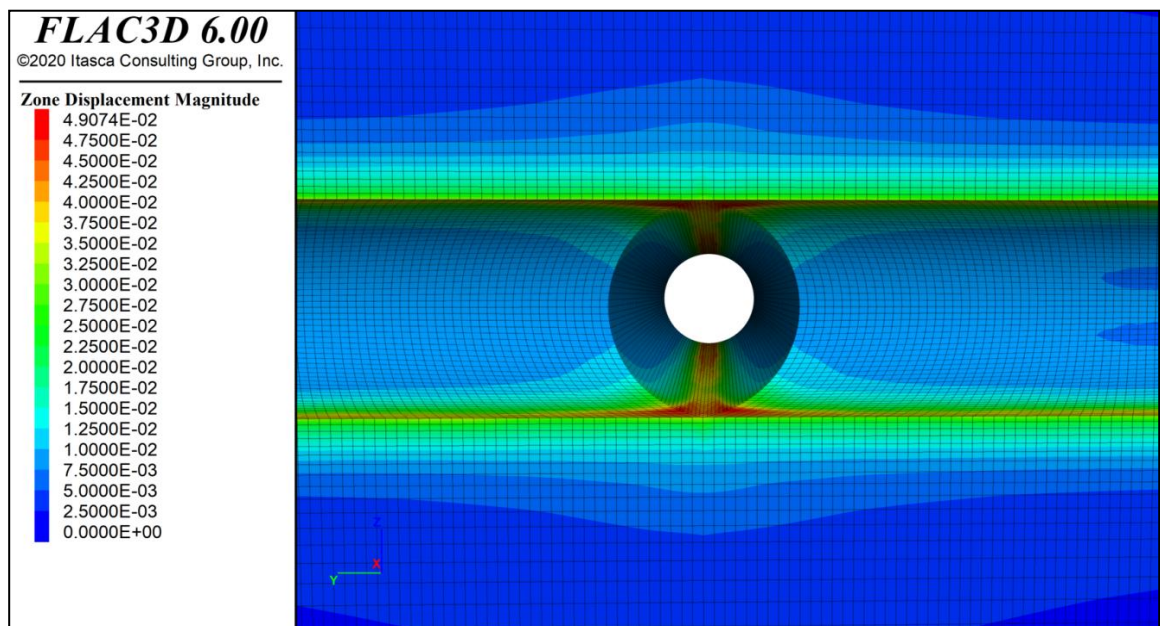
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μεγέθους των προκαλούμενων μετατοπίσεων και της σχηματιζόμενης πλαστικής ζώνη στην περιοχή διασταύρωσης κυκλικών σηράγγων, μορφής «T».

6.1.1 Κλίση ασυνεχειών ίση με 0°

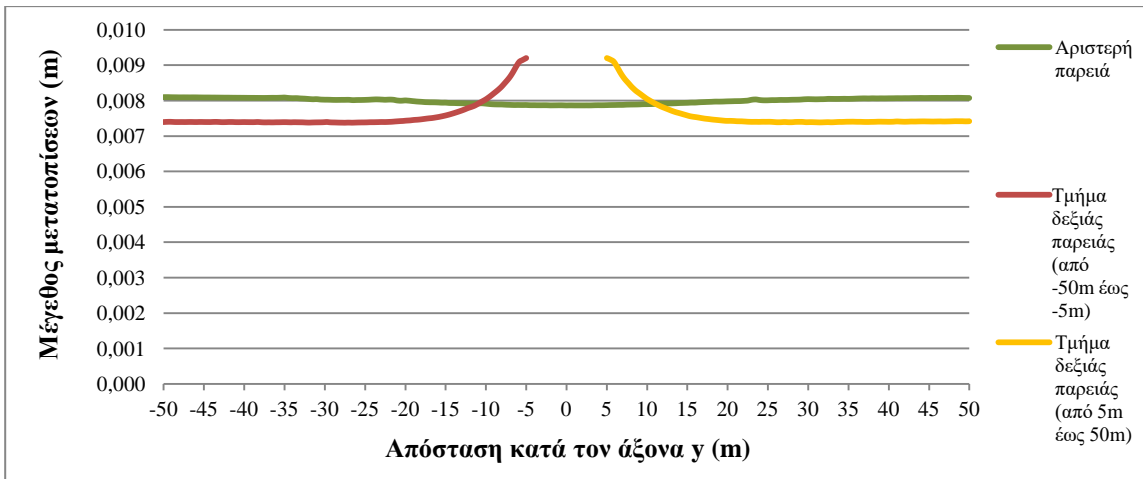
Μετατοπίσεις



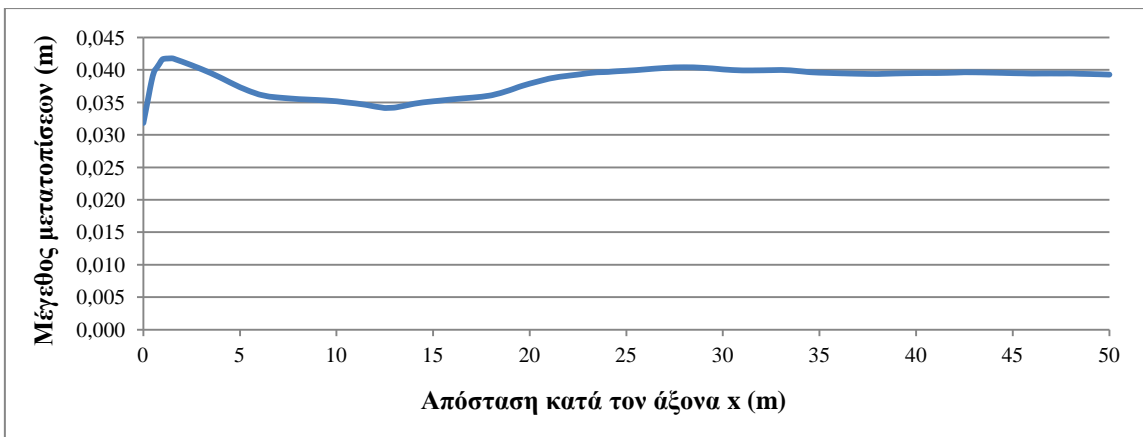
Σχήμα 6.1.1.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας



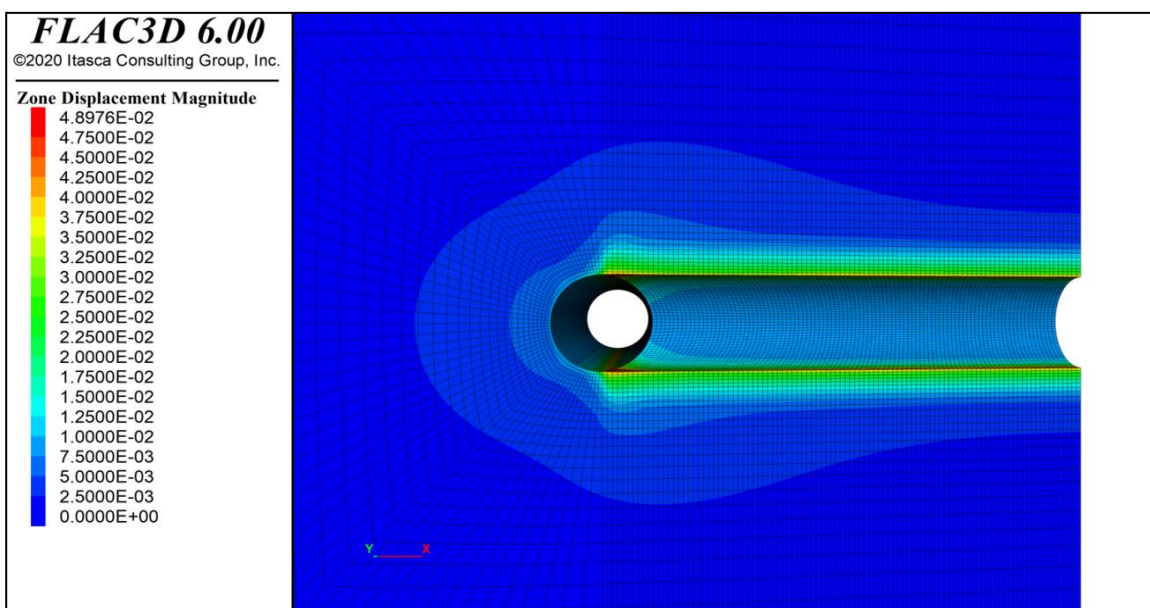
Εικόνα 6.1.1.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στο τμήμα της κάθετης διασταύρωσης της κύριας με τη δευτερεύουσα σήραγγα



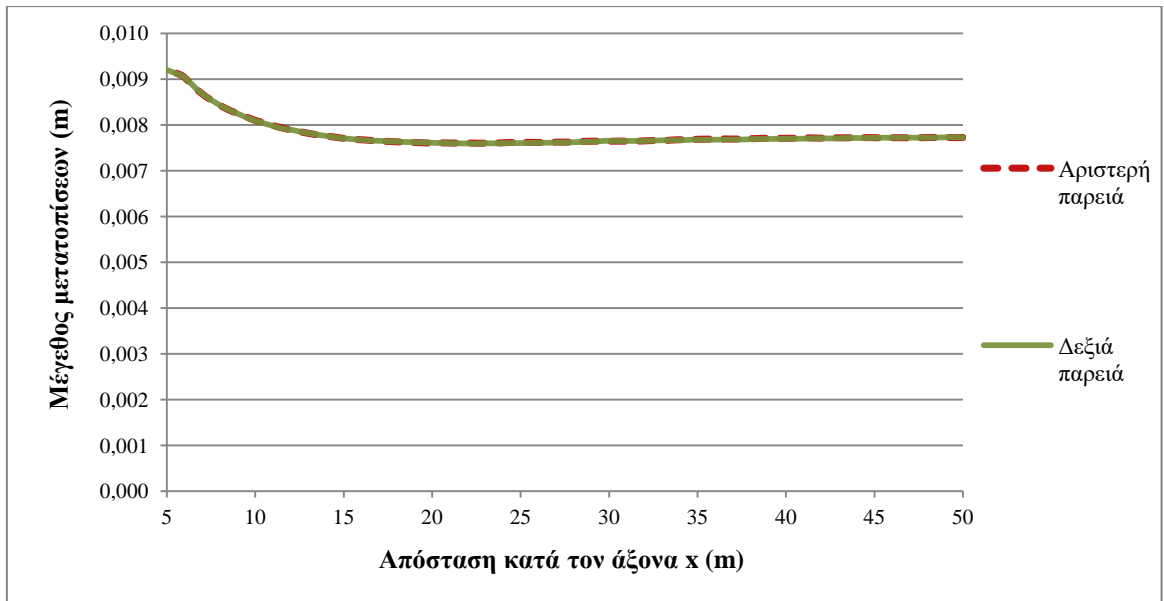
Σχήμα 6.1.1.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας



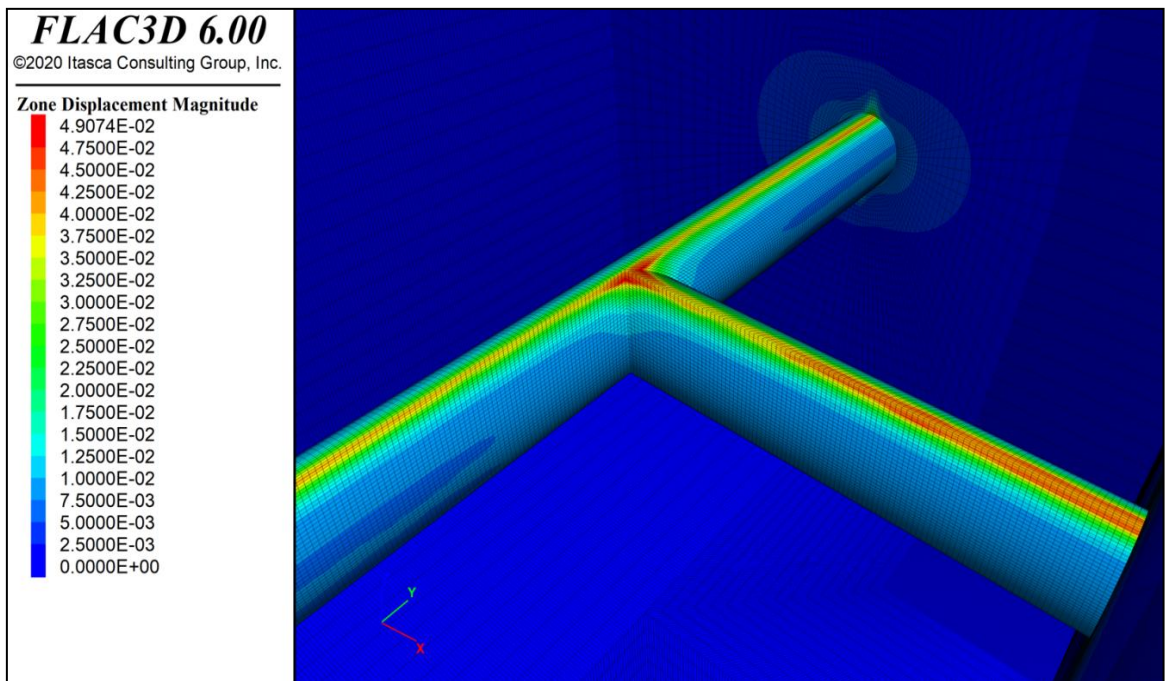
Σχήμα 6.1.1.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας



Εικόνα 6.1.1.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας

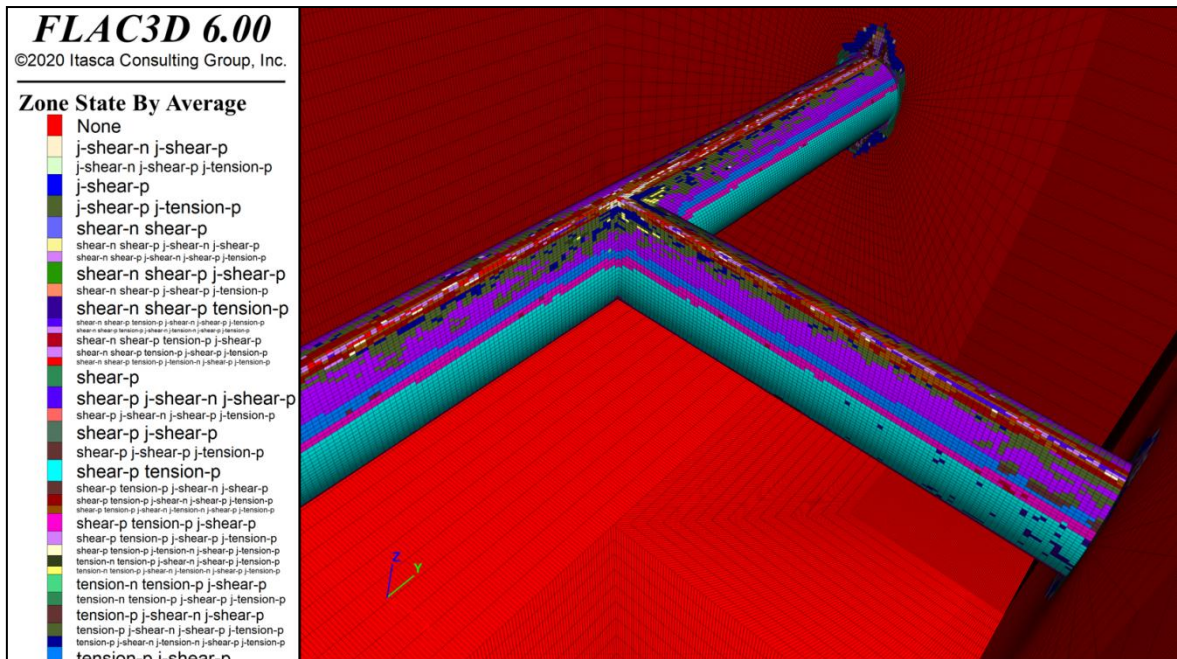


Σχήμα 6.1.1.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας

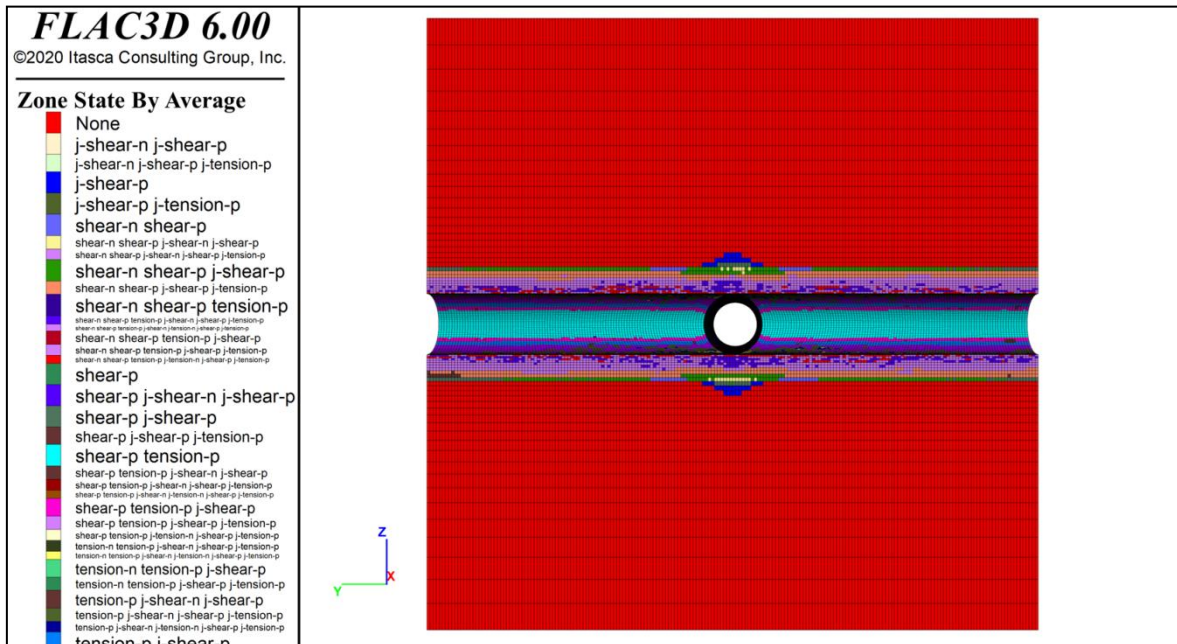


Εικόνα 6.1.1.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης των δύο κυκλικών σήραγγων

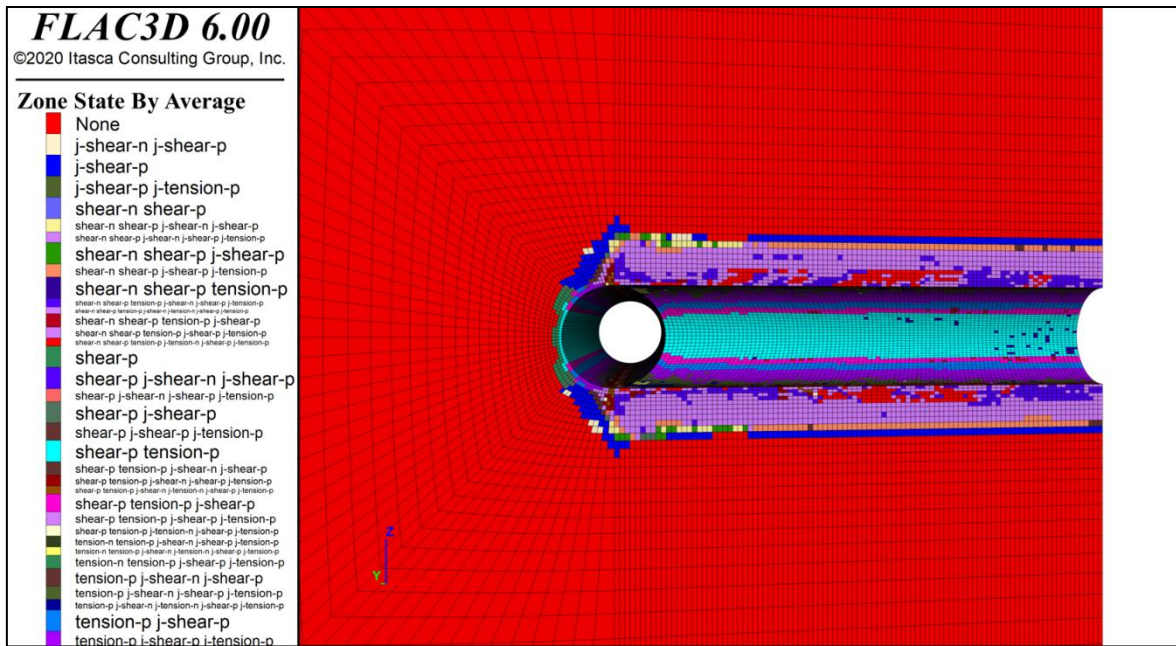
Πλαστική ζώνη



Εικόνα 6.1.1.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης στην περιοχή της διασταύρωσης των κυκλικών σήραγγων



Εικόνα 6.1.1.5 Κατανομή της προκαλούμενης πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας



Εικόνα 6.1.1.6 Κατανομή της προκαλούμενης πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τις απεικονίσεις της μοντελοποιημένης διασταύρωσης παρατηρείται η κατανομή και το μέγεθος των μετατοπίσεων, καθώς και η έκταση της πλαστικής ζώνης που προκαλούνται από την τομή των σηράγγων. Για κλίση των ασυνεχειών ίση με 0° , η μέγιστη καταπόνηση εντοπίζεται στην οροφή και το δάπεδο του υπόγειου έργου. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας καθίστανται αισθητά φτωχότερες σε διεύθυνση κάθετη στα επίπεδα της ανισοτροπίας της (όπως περιγράφηκε στο Σχ. 3.2). Συνεπώς, οι μέγιστες μετατοπίσεις αναπτύσσονται στα τμήματα όπου οι ασυνέχειες της βραχομάζας εφάπτονται του υπόγειου ανοίγματος των σηράγγων (Σχ. 3.1.2.1 και Σχ. 3.1.2.2). Ως εκ τούτου, για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° και για υδροστατικό εντατικό πεδίο, τα τμήματα αυτά αποτελούν τη στέψη και το ανάστροφο των κυκλικών εκσκαφών.

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το μέγεθος των μετατοπίσεων κατά μήκος των σηράγγων, γίνεται εμφανές, τόσο από τα Σχήματα 6.1.1.1-4 όσο και από τις Εικόνες 6.1.1.1-3, ότι μεγιστοποιείται στην περιοχή της διασταύρωσης, σημειώνοντας μία αύξηση 7-9%. Ωστόσο, στο Σχ.6.1.1.1 και πιο έντονα στο Σχ. 6.1.1.3, παρατηρείται μία μείωση της τιμής των μετατοπίσεων καθώς προσεγγίζεται το κεντρικό σημείο στην οροφή της διασταύρωσης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι τάσεις συσσωρεύονται στις δύο γωνίες που σχηματίζει η τομή των σηράγγων λόγω της απότομης γεωμετρίας τους και

κατά συνέπεια προκαλούνται πιο έντονες μετατοπίσεις στα τμήματα αυτά από ότι στο κεντρικό κομμάτι της στέψης όπου πραγματοποιούνται οι παρούσες μετρήσεις.

Όπως είναι λογικό, για κλίση ασυνεχειών 0° , οι τιμές των μετατοπίσεων είναι αισθητά μεγαλύτερες (της τάξης των εκατοστών) στην οροφή, συγκριτικά με τις μετατοπίσεις στα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής, όπου μειώνονται σε τάξη χιλιοστών. Η δεξιά παρειά της κύριας σήραγγας επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι η αριστερή, διότι σε αυτή πραγματοποιήθηκε η τομή με τη δευτερεύουσα σήραγγα και συνεπώς διαταράσσεται περισσότερο η περιβάλλουσα βραχομάζα. Από τα Σχ. 6.1.1.1 και 6.1.1.2, διακρίνεται ότι η ζώνη επιρροής που διαμορφώνει η κατασκευή της διασταύρωσης έχει έκταση ίση με 25m περίπου (δηλαδή 2.5D, όπου D η διάμετρος των σηράγγων) κατά το διαμήκη άξονα των εκσκαφών, ξεκινώντας από το κεντρικό σημείο τομής τους. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες που πραγματοποίησαν οι Liu et al. (2009) και Li et al. (2016) (βλ. υποκεφάλαιο 2.2). Παρατηρείται ότι στη ζώνη επιρροής, τόσο της κύριας όσο και της δευτερεύουσας σήραγγας, υπάρχει μία μείωση στην τιμή των μετατοπίσεων πριν μεγιστοποιηθούν στο κέντρο της διασταύρωσης. Αυτό οφείλεται στην αποφόρτιση που δέχεται το τμήμα των σηράγγων πλησίον του τμήματος της τομής τους, λόγω της διάνοιξης της δευτερεύουσας σήραγγας. Συγκεκριμένα, η εκσκαφή και η διασταύρωσή της με την κύρια, ήδη διανοιγμένη, σήραγγα προκαλεί τη σύγκλιση της περιβάλλουσας βραχομάζας προς τον κενό χώρο που έχει δημιουργήσει. Η σύγκλιση αυτή είναι πιο έντονη στην περιοχή της διασταύρωσης, λόγω μεγαλύτερου ανυποστήρικτου πλάτους οροφής και λιγότερο ομαλής γεωμετρίας (σηματισμός δύο κάθετων γωνιών μεταξύ των τεμνόμενων σηράγγων), και συνεπώς οι μέγιστες φορτίσεις και μετατοπίσεις συσσωρεύονται εκεί, αποφορτίζοντας τα τμήματα της στέψης των σηράγγων που βρίσκονται πλησίον.

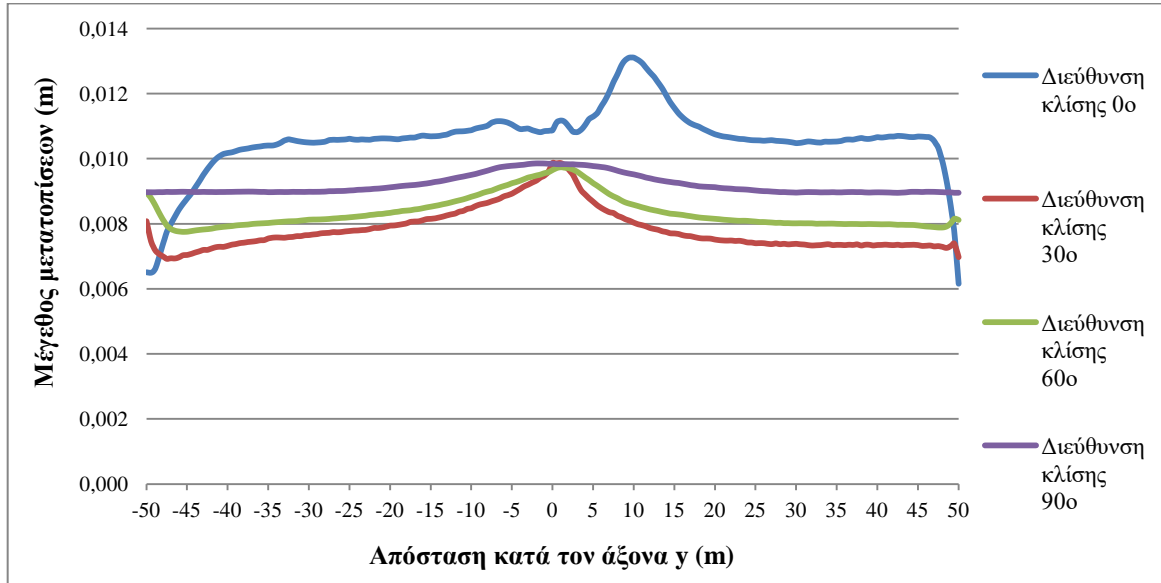
Όσον αφορά τη σχηματιζόμενη πλαστική ζώνη, οι όροι shear και tension του υπομνήματος των Εικόνων 6.1.1.4-6 συμβολίζουν την αστοχία του πετρώματος σε διάτμηση και εφελκυσμό αντίστοιχα. Όταν τοποθετηθεί το γράμμα j μπροστά (j-shear, j-tension), τότε πρόκειται για αστοχία ασυνέχειας (joint) της βραχομάζας, ενώ τα σύμβολα n και p διευκρινίζουν τη χρονική στιγμή που πραγματοποιήθηκε η αστοχία. Το n αντιστοιχεί στο παρόν υπολογιστικό βήμα, ενώ το p σε προηγούμενο, δηλώνοντας την πρόκληση αστοχίας μετά ή πριν την ολοκλήρωση της διάνοιξης του υπόγειου έργου. Με βάση αυτά, παρατηρείται ότι στη στέψη και στο δάπεδο των σηράγγων εκδηλώνονται αστοχίες τόσο του άρρηκτου πετρώματος όσο και των ασυνεχειών, οι οποίες και επικρατούν (μωβ χρώμα κυρίως το οποίο αντιστοιχεί σε j-shear-n, j-shear-p και j-tension-p). Αντίθετα, τα πλευρικά

τοιχώματα χαρακτηρίζονται κυρίως από αστοχία του πετρώματος (επικρατεί το τρικουάζ και το ανοιχτό ροζ χρώμα που συμβολίζουν shear-p και tension-p ως επί το πλείστον). Αυτό συμβαίνει διότι στην οροφή και στον πυθμένα των σηράγγων οι ασυνέχειες εφάπτονται στο υπόγειο άνοιγμα και συνεπώς η παράλληλη φόρτιση σε αυτές, από τις τάσεις του δευτερογενούς εντατικού πεδίου, τις οδηγεί σε αστοχία. Αντίθετα, στο ύψος των παρειών, όπου τα επίπεδα ανισοτροπίας της βραχομάζας είναι παράλληλα με τις γεωστατικές τάσεις και κάθετα στη διατομή της εκσκαφής, εκδηλώνεται κυρίως αστοχία του πετρώματος καθώς οι ασυνέχειες βρίσκονται σε ευνοϊκό προσανατολισμό συγκριτικά με την κατεύθυνση της φόρτισης και παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε πιθανή αστοχία τους.

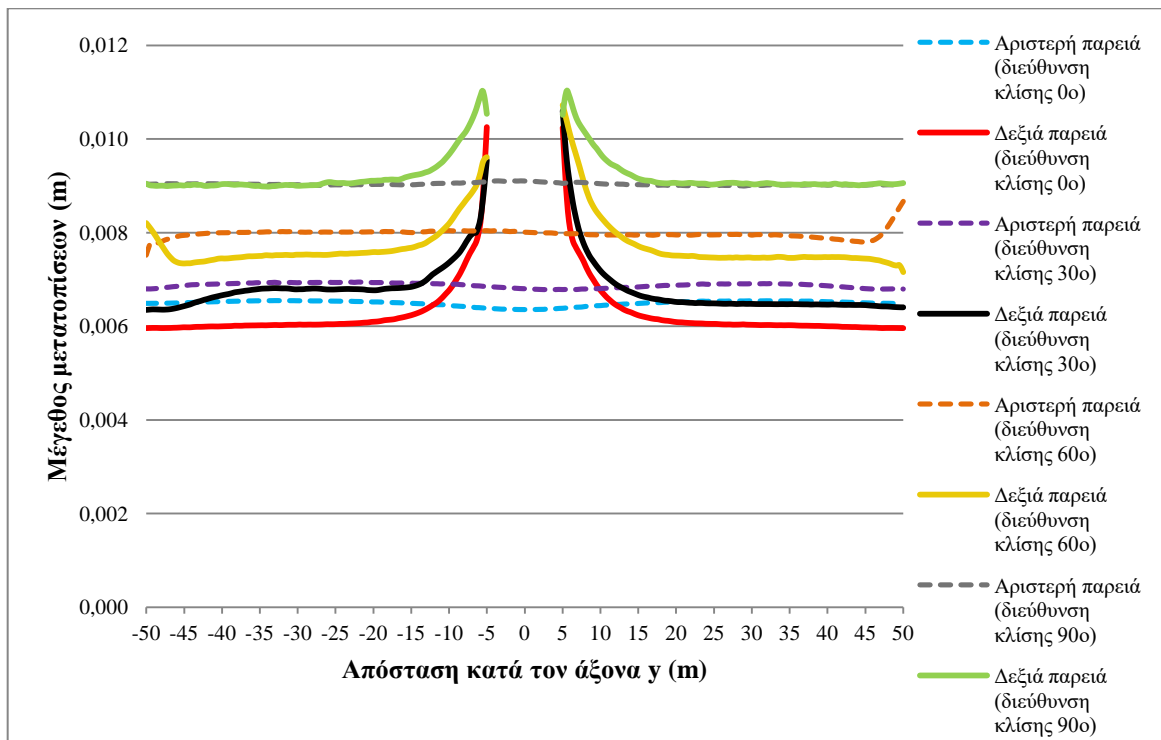
Γενικά η πλαστική ζώνη είναι αλληλένδετη με τις προκαλούμενες μετατοπίσεις και ως εκ τούτου, στην περιοχή της διασταύρωσης, όπου εντοπίζεται η μέγιστη τιμή τους, θα διαμορφωθεί και το μέγιστο εύρος της πλαστικής ζώνης. Συγκεκριμένα, το εύρος αυτό ισούται με 7m στη στέψη και το δάπεδο του σημείου τομής των σηράγγων και χαρακτηρίζεται από πολυάριθμα είδη αστοχίας τόσο στο άρρηκτο πέτρωμα όσο και στις ασυνέχειες της βραχομάζας, λόγω της έντονης καταπόνησης που δέχεται η περιοχή αυτή. Αυτή η τιμή των 7m αποτελεί μία αύξηση 2m συγκριτικά με την έκταση της πλαστικής ζώνης που σχηματίζεται σε τμήματα των τεμνόμενων σηράγγων εκτός της ζώνης επιρροής που προκαλεί η διασταύρωσή τους. Ένας παράγοντας που συμβάλλει σε αυτό το αυξημένο ποσοστό παραμορφώσεων και αστοχίας της βραχομάζας γύρω από το υπόγειο έργο αποτελεί το μεγάλο βάθος διάνοιξης (300m) των τεμνόμενων σηράγγων καθώς και τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (μηδενική συνοχή και αντοχή σε εφελκυσμό).

6.1.2 Κλίση ασυνεχειών ίση με 45°

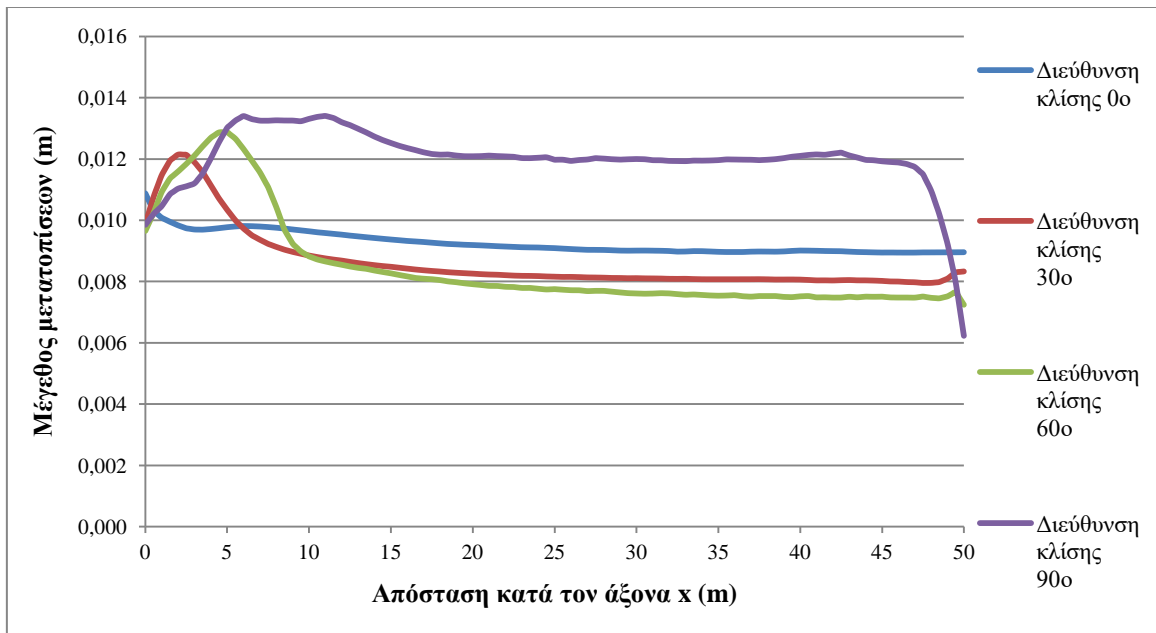
Μετατοπίσεις



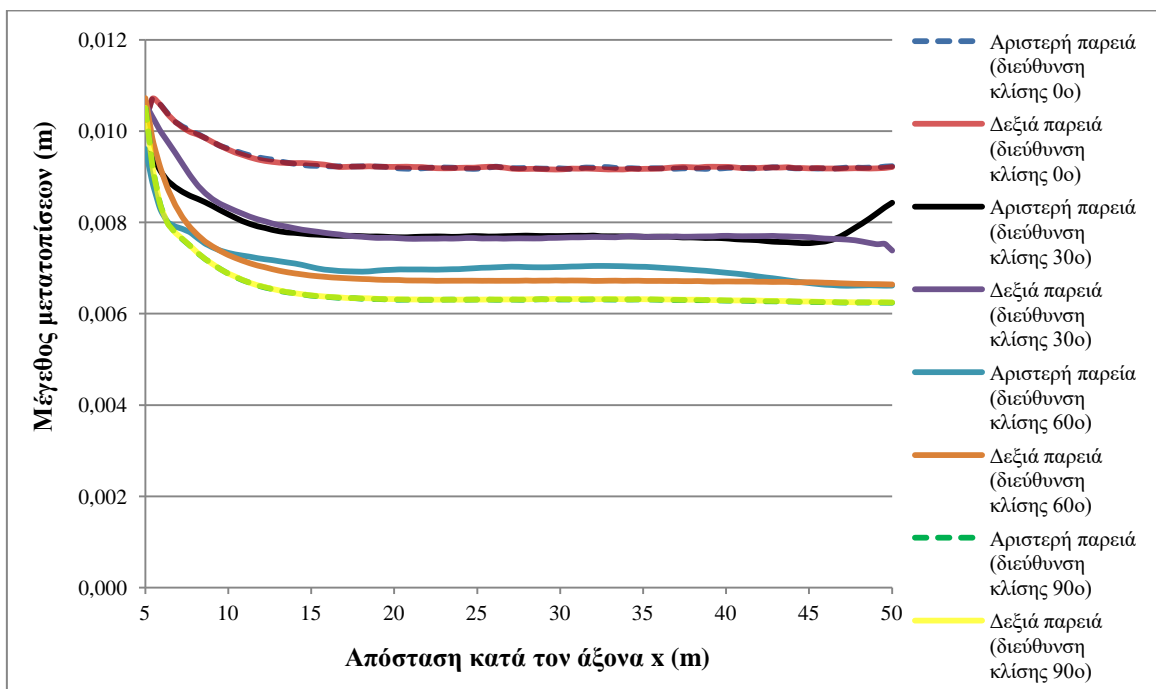
Σχήμα 6.1.2.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , 30° , 60° και 90°



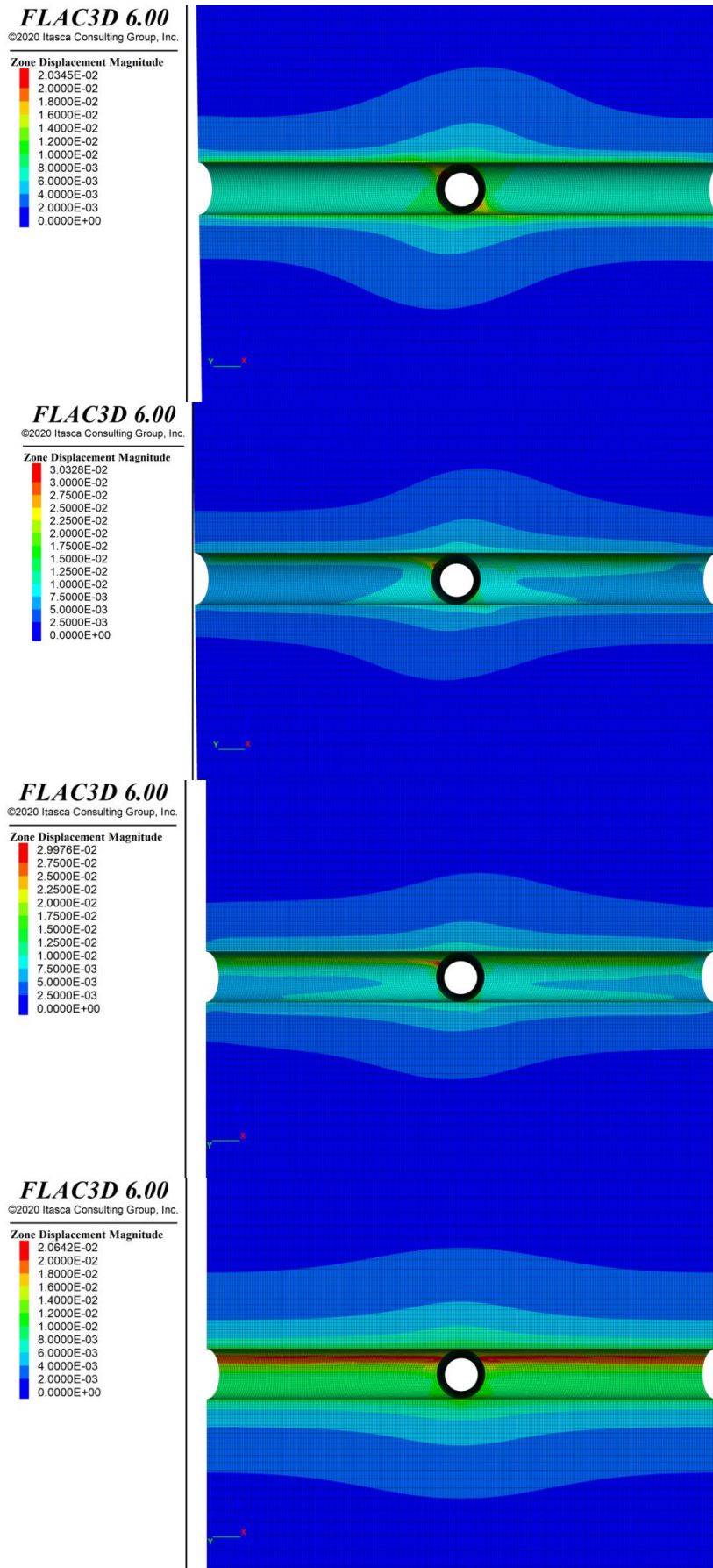
Σχήμα 6.1.2.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , 30° , 60° και 90°



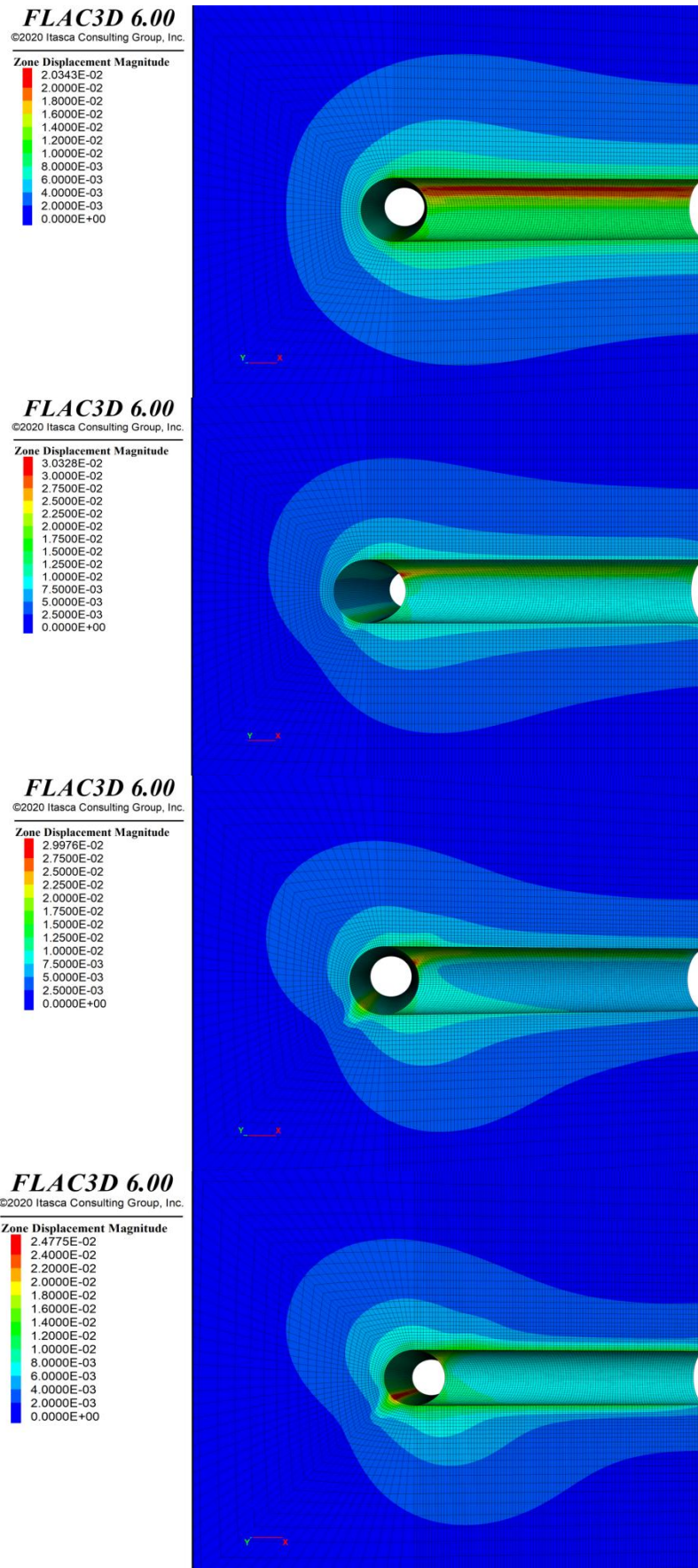
Σχήμα 6.1.2.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , 30° , 60° και 90°



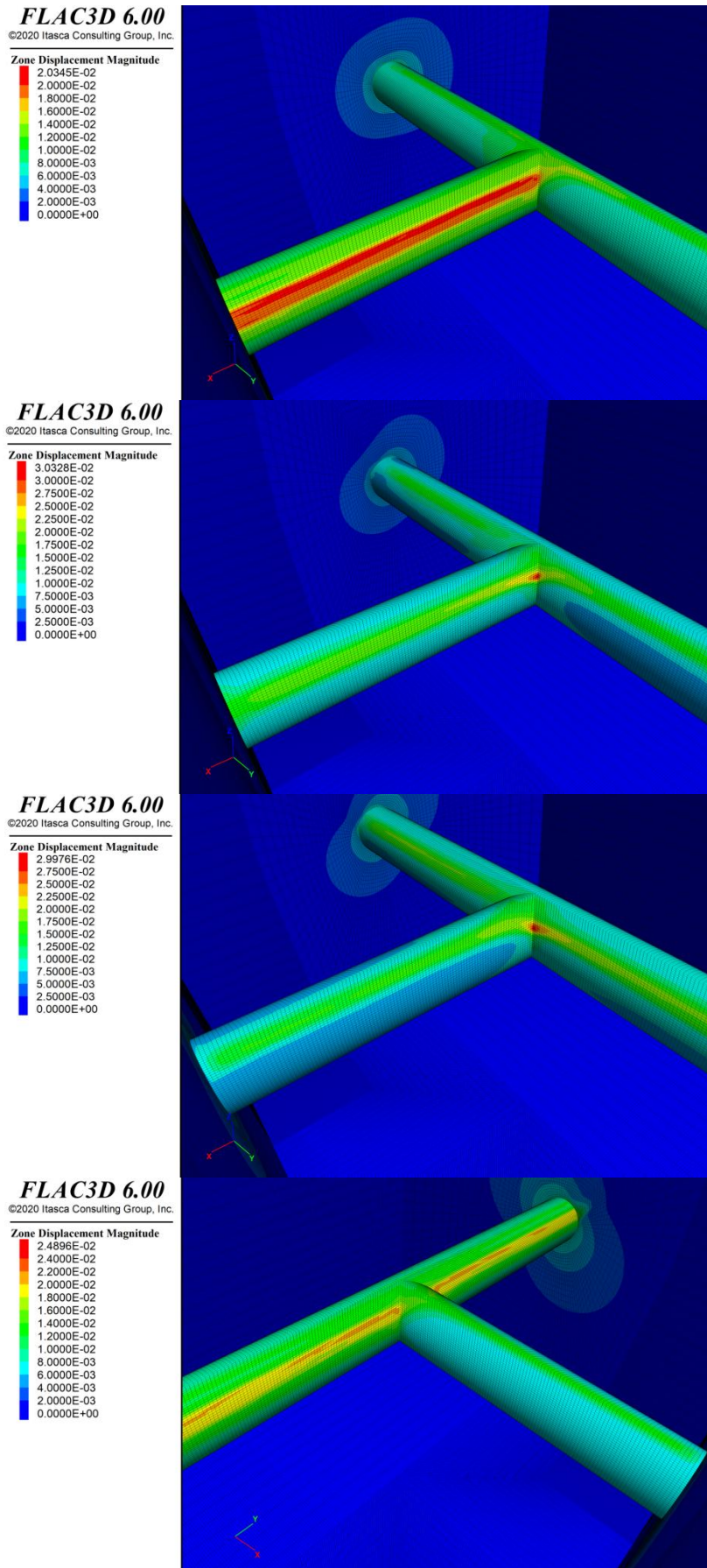
Σχήμα 6.1.2.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , 30° , 60° και 90°



Εικόνα 6.1.2.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα



Εικόνα 6.1.2.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα



Εικόνα 6.1.2.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης των δύο κυκλικών σηράγγων για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα

Για κλίση ασυνεχειών ίση με 45° και για τέσσερις πιθανές διευθύνσεις της (0° , 30° , 60° και 90°) εξετάστηκαν οι προκαλούμενες μετατοπίσεις και η σχηματιζόμενη πλαστική ζώνη που δημιουργείται στην περιοχή της κάθετης διασταύρωσης των κυκλικών σήραγγων ίδιας διατομής.

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις στη στέψη της κύριας σήραγγας (Σχ. 6.1.2.1), σημειώνεται αύξηση των τιμών τους στη περιοχή της τομής των δύο εκσκαφών. Από το κέντρο της διασταύρωσης και για περίπου 20m εκατέρωθεν αυτού, κατά τον διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας, διαμορφώνεται η ζώνη επιρροής. Συγκεκριμένα, για διεύθυνση κλίσης ίση με 0° καταγράφεται το μεγαλύτερο μέγεθος μετατοπίσεων καθώς όπως αναφέρεται και στον Πίνακα 3.1.7.1 του συστήματος κατάταξης RMR, όταν η παράταξη των επιπέδων ανισοτροπίας είναι κάθετη στον άξονα της σήραγγας και η διάνοιξη πραγματοποιείται αντίθετα από την κλίση των ασυνεχειών (όπως η παρούσα κατάσταση, με κλίση 45° και διεύθυνση κλίσης 0°) τότε η εκσκαφή χαρακτηρίζεται ως δυσμενής. Για διεύθυνση κλίσης ίση με 30° σημειώνονται οι μικρότερες μετατοπίσεις, ενώ όσο αυξάνεται τόσο μεγαλώνει και το μέγεθος των μετατοπίσεων έως ότου η παράταξη των ασυνεχειών γίνει παράλληλη στον άξονα της σήραγγας (δηλαδή για διεύθυνση κλίσης 90°) όπου η εκσκαφή χαρακτηρίζεται έως πολύ δυσμενής, όπως αναφέρει και το RMR. Η απότομη αύξηση ή μείωση των μετατοπίσεων στο Σχ. 6.1.2.1 δεν έχει κάποια φυσική εξήγηση αλλά προκαλείται λόγω των συνοριακών συνθηκών που έχουν τεθεί στο μοντέλο.

Αντίστοιχα και το μέγεθος των μετατοπίσεων στις παρειές της κύριας σήραγγας είναι ανάλογο της διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών. Η δεξιά παρειά καταπονείται περισσότερο συγκριτικά με την αριστερή για τον ίδιο λόγο που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι μετατοπίσεις στα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής είναι παρόμοιου μεγέθους με αυτές της οροφής, δηλαδή προκαλούνται μετατοπίσεις της τάξης των χιλιοστών τόσο στη στέψη όσο και στις παρειές της κύριας σήραγγας, φαινόμενο που δεν παρατηρήθηκε για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° καθώς η παράλληλη ανάπτυξη των επιπέδων ανισοτροπίας στο δάπεδο και την οροφή της εκσκαφής προκάλεσε την επιβάρυνση των συγκεκριμένων κυρίως τμημάτων.

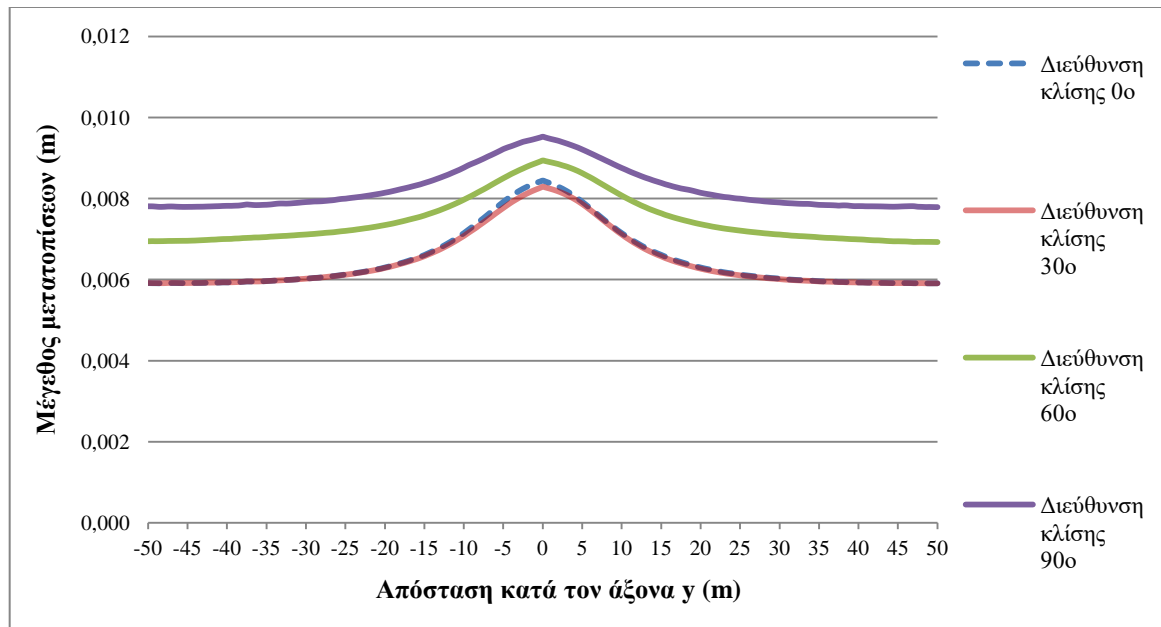
Όσον αφορά τη δευτερεύουσα σήραγγα παρατηρείται ότι δέχεται εντονότερη καταπόνηση υπό την επίδραση διαφορετικών διευθύνσεων κλίσης συγκριτικά με την κύρια. Συγκεκριμένα, οι υψηλότερες τιμές μετατοπίσεων στη στέψη της προκαλούνται στην περίπτωση διεύθυνσης κλίσης 90° , σε σχέση με τις 0° της κύριας σήραγγας, καθώς τότε η παράταξη των ασυνεχειών είναι κάθετη στον άξονα της εκσκαφής. Είναι εμφανές

επίσης ότι τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.1.2.2 και 6.1.2.4, που απεικονίζουν το μέγεθος των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών των τεμνόμενων σηράγγων, είναι εξολοκλήρου αντίθετα ως προς το ποια διεύθυνση κλίσης προκαλεί τις εντονότερες μετατοπίσεις. Συγκεκριμένα, για τη δευτερεύουσα σήραγγα, η διεύθυνση κλίσης των 90° είναι αυτή που δημιουργεί τη μεγαλύτερη καταπόνηση στις παρειές και όσο οι μοίρες της διεύθυνσης προσεγγίζουν τις 0° , τόσο μικρότερες είναι και οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται. Το ακριβώς αντίθετο ισχύει για την κύρια σήραγγα. Το φαινόμενο αυτό αιτιολογείται από την κάθετη διεύθυνση που έχουν οι άξονες των σηράγγων και συνεπώς όταν τα επίπεδα της ανισοτροπίας διατάσσονται παράλληλα στον άξονα της μίας, τότε αντίστοιχα θα αναπτύσσονται κάθετα στον άξονα της άλλης και θα επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό την καθεμία. Τέλος, η ζώνη επιρροής που ασκεί η κατασκευή της διασταύρωσης στη δευτερεύουσα σήραγγα είναι μικρότερη από αυτή της κύριας και συγκεκριμένα ισούται περίπου με 15m.

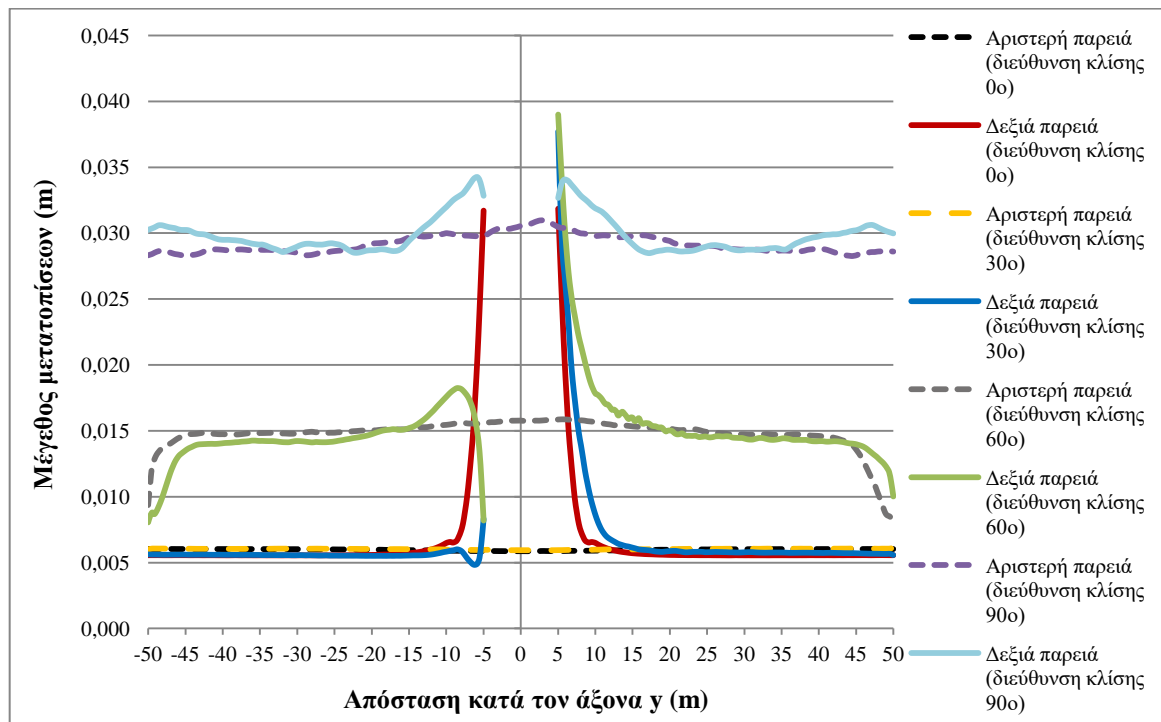
Για την δημιουργούμενη πλαστική ζώνη παρατηρείται πάλι, όπως και στην περίπτωση της κλίσης 0° , ότι στη στέψη και στο δάπεδο των σηράγγων εκδηλώνονται κυρίως αστοχίες των ασυνεχειών (μωβ χρώμα κυρίως το οποίο αντιστοιχεί σε j-shear-n, j-shear-p και j-tension-p), ενώ αντίθετα, τα πλευρικά τοιχώματα χαρακτηρίζονται κυρίως από αστοχία του πετρώματος (επικρατεί το τρκουάζ χρώμα που συμβολίζει shear-p και tension-p ως επί το πλείστον). Ωστόσο, λόγω αύξησης της κλίσης από 0° σε 45° , η έκταση της αστοχίας των ασυνεχειών μεταφέρθηκε από το δάπεδο και την οροφή προς τις παρειές των εκσκαφών καθώς στο σημείο αυτό πλέον εφάπτονται τα επίπεδα της ανισοτροπίας στην περιφέρεια των σηράγγων. Παρατηρείται στις Εικόνες 6.1.2.5 έως 6.1.2.10 ότι το εύρος της πλαστικής ζώνης είναι αισθητά μειωμένο σε σχέση αυτό που αναπτύσσεται στις Εικόνες 6.1.2.4 και 6.1.2.11 καθώς στις δύο αυτές Εικόνες, η διεύθυνση κλίσης είναι η πιο ευνοϊκή (0° για την κύρια και 90° για τη δευτερεύουσα) ώστε να προκληθούν αστοχίες στη στέψη και το ανάστροφο. Ωστόσο, η πλαστική ζώνη της παρούσας περίπτωσης συγκριτικά με αυτή που σχηματίζεται στις Εικόνες 6.1.1.5 και 6.1.1.6 για κλίση ασυνεχειών ίση με 0° , είναι αισθητά μειωμένη καθώς οι ασυνέχειες δεν εφάπτονται πλέον στην οροφή και το δάπεδο των εκσκαφών (λόγω των 45° κλίσης των επιπέδων ανισοτροπίας) και συνεπώς η πλαστική ζώνη στις περιοχές αυτές δεν εμφανίζει μεγάλη ανάπτυξη.

6.1.3 Κλίση ασυνεχειών ίση με 90°

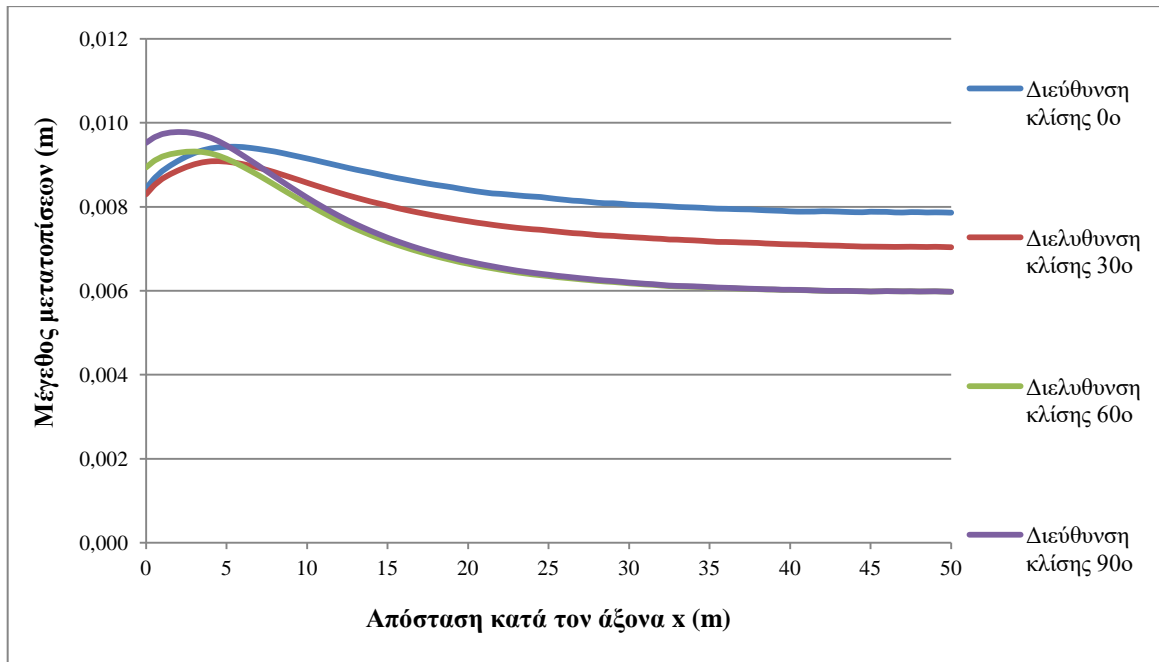
Μετατοπίσεις



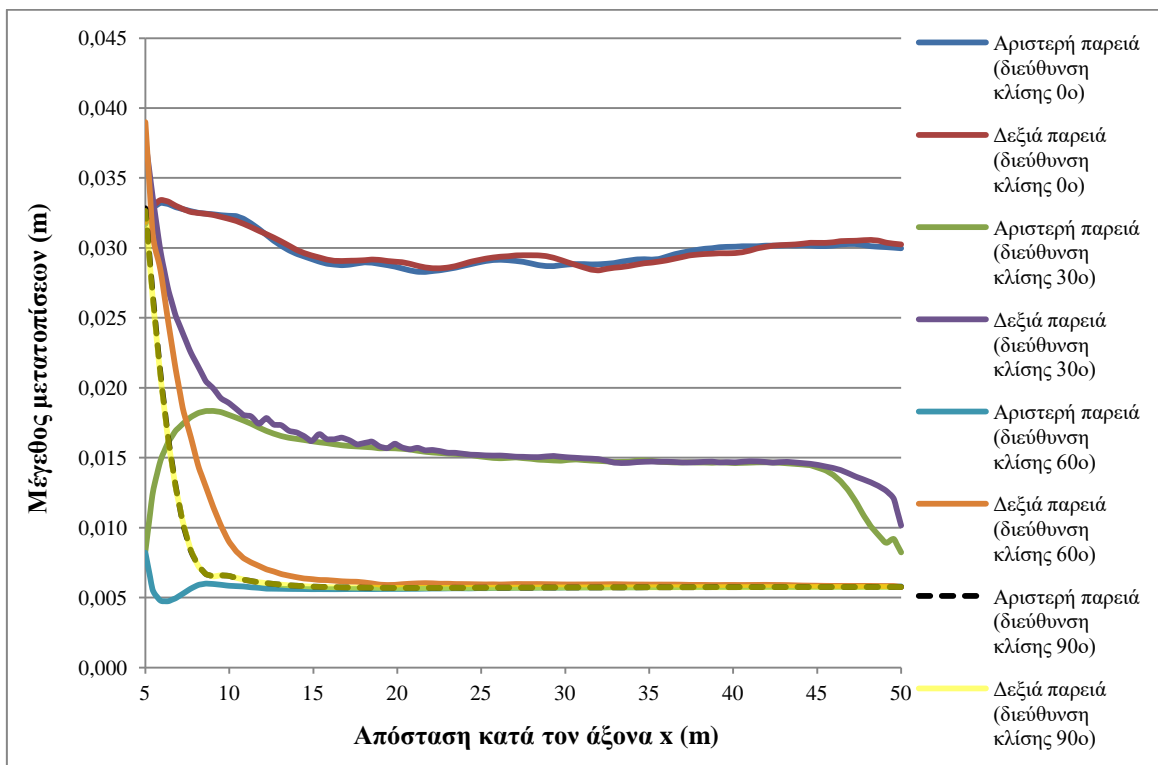
Σχήμα 6.1.3.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , 30° , 60° και 90°



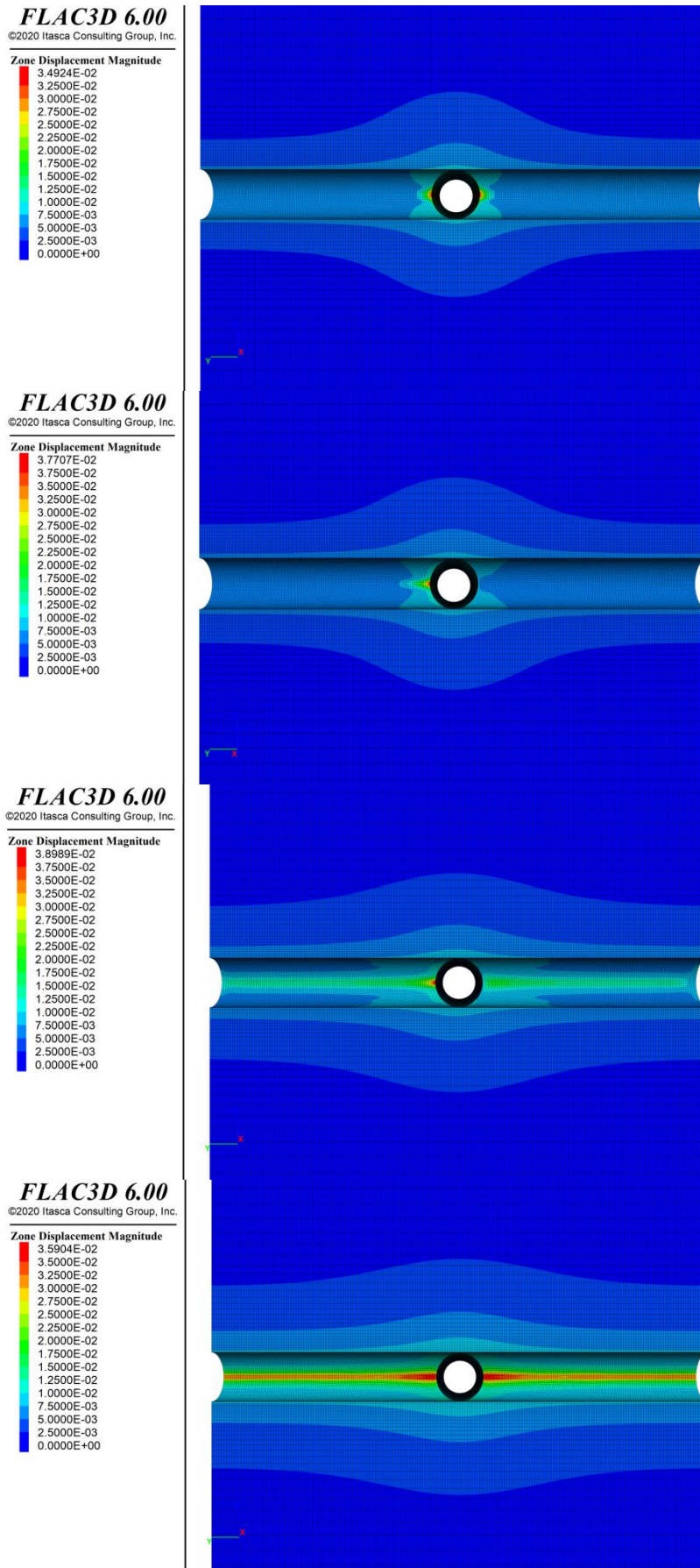
Σχήμα 6.1.3.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , 30° , 60° και 90°



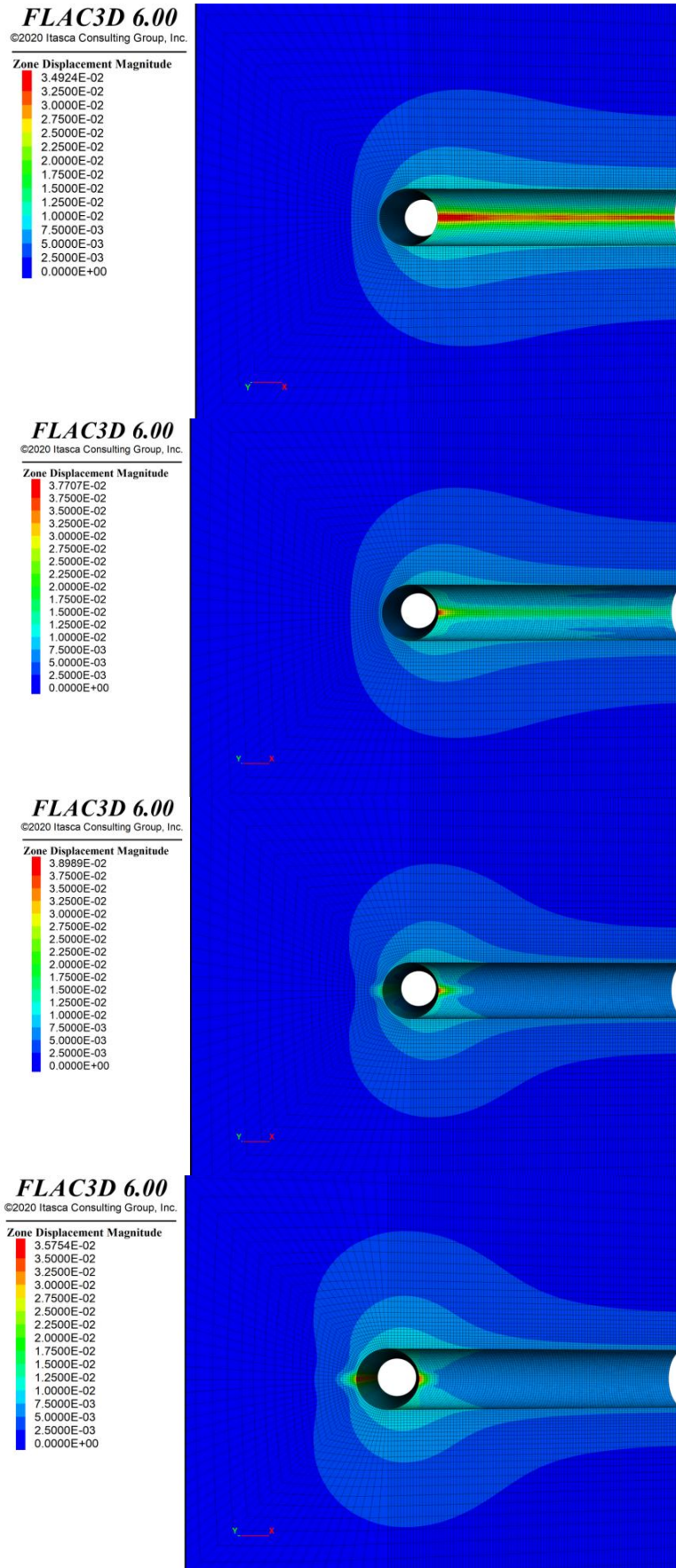
Σχήμα 6.1.3.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°



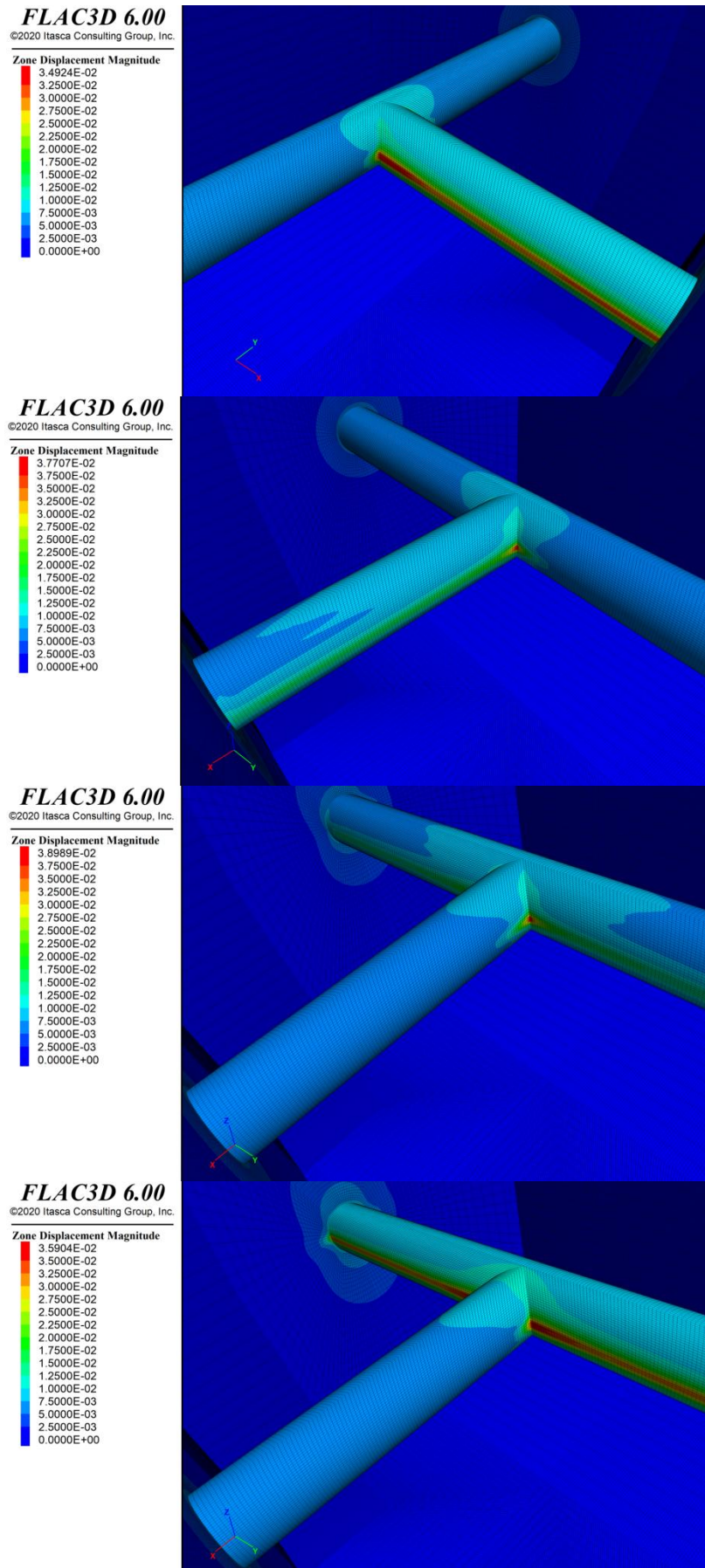
Σχήμα 6.1.3.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0°, 30°, 60° και 90°



Εικόνα 6.1.3.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα



Εικόνα 6.1.3.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα



Εικόνα 6.1.3.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης των δύο κυκλικών σηράγγων για διεύθυνση κλίσης 0°, 30°, 60° και 90° από πάνω προς τα κάτω αντίστοιχα

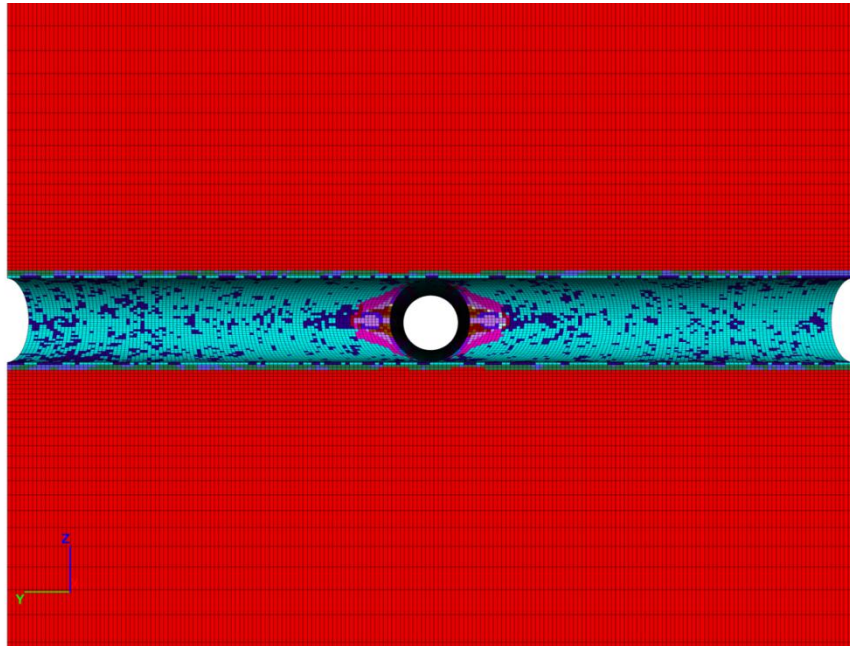
Πλαστική ζώνη

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone State By Average

- None
- j-shear-n j-shear-p
- j-shear-p
- shear-n shear-p
- shear-n shear-p j-shear-n j-shear-p
- shear-n shear-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- shear-n shear-p j-shear-p
- shear-n shear-p j-shear-p j-tension-p
- shear-n shear-p tension-p
- shear-n shear-p tension-p j-shear-p
- shear-n shear-p tension-p j-shear-p j-tension-p
- shear-p
- shear-p j-shear-n j-shear-p
- shear-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- shear-p j-shear-n j-tension-p
- shear-p j-shear-p
- shear-p j-shear-p j-tension-p
- shear-p j-tension-n j-shear-p j-tension-p
- shear-p tension-p
- shear-p tension-p j-shear-n j-shear-p
- shear-p tension-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- shear-p tension-p j-shear-p
- shear-p tension-p j-shear-p j-tension-p
- shear-p tension-p j-tension-n j-shear-p j-tension-p
- tension-n shear-p tension-p
- tension-n shear-p tension-p j-shear-p
- tension-n tension-p j-shear-n j-shear-p
- tension-n tension-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- tension-n tension-p j-shear-p
- tension-n tension-p j-shear-p j-tension-p
- tension-n tension-p j-tension-p j-shear-p j-tension-p



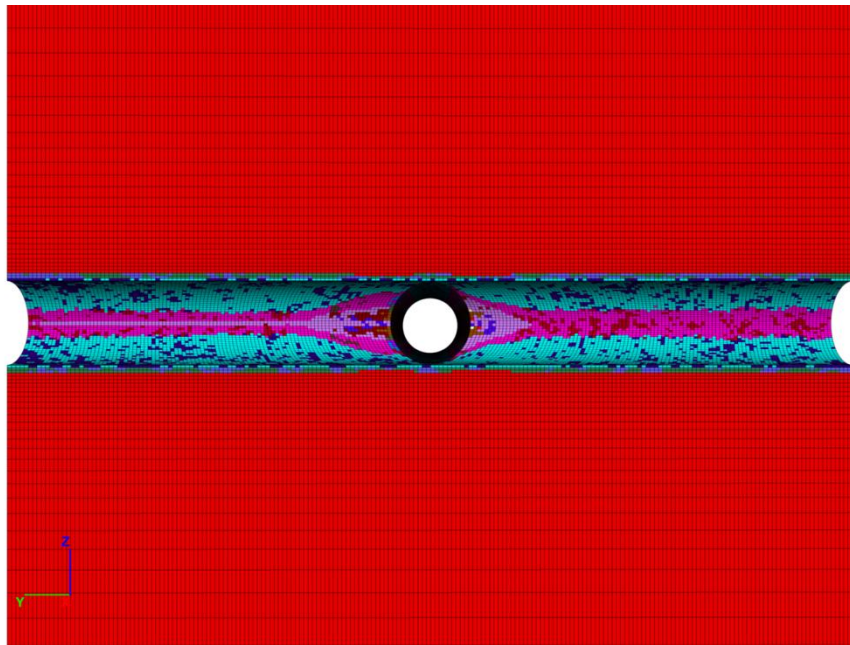
Εικόνα 6.1.3.4 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0°

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone State By Average

- None
- j-shear-n j-shear-p
- j-shear-p
- shear-n shear-p
- shear-n shear-p j-shear-n j-shear-p
- shear-n shear-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- shear-n shear-p j-shear-p
- shear-n shear-p j-shear-p j-tension-p
- shear-n shear-p tension-p
- shear-n shear-p tension-p j-shear-p
- shear-n shear-p tension-p j-shear-p j-tension-p
- shear-p
- shear-p j-shear-n j-shear-p
- shear-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- shear-p j-shear-p
- shear-p j-shear-p j-tension-p
- shear-p j-tension-n j-shear-p j-tension-p
- shear-p tension-p
- shear-p tension-p j-shear-n j-shear-p
- shear-p tension-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- shear-p tension-p j-shear-p
- shear-p tension-p j-shear-p j-tension-p
- shear-p tension-p j-tension-n j-shear-p j-tension-p
- tension-n shear-p tension-p
- tension-n shear-p tension-p j-shear-p
- tension-n tension-p j-shear-n j-shear-p
- tension-n tension-p j-shear-n j-shear-p j-tension-p
- tension-n tension-p j-shear-p
- tension-n tension-p j-shear-p j-tension-p
- tension-n tension-p j-tension-p j-shear-p j-tension-p

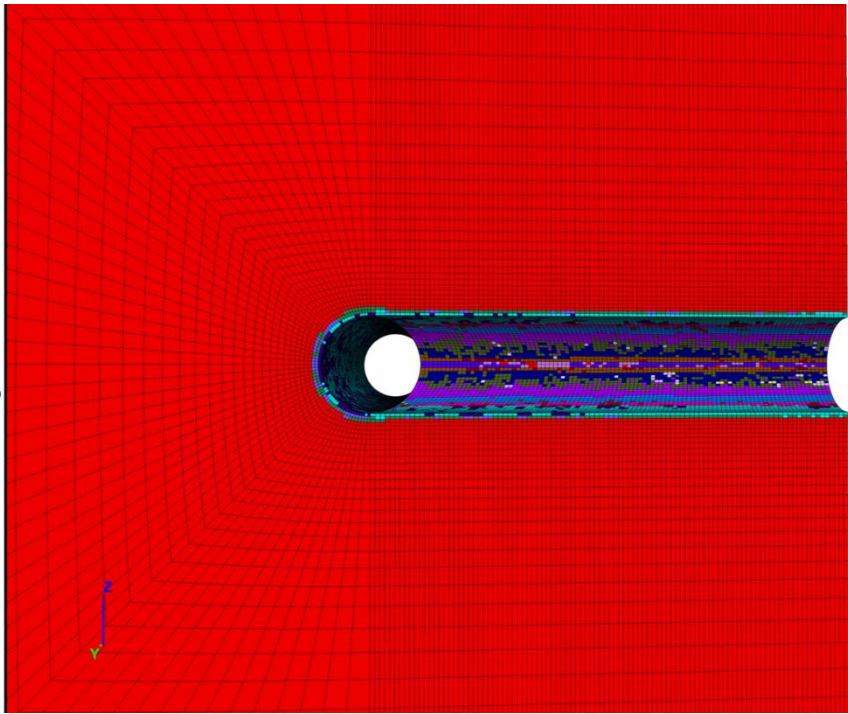


Εικόνα 6.1.3.5 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 30°

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone State By Average

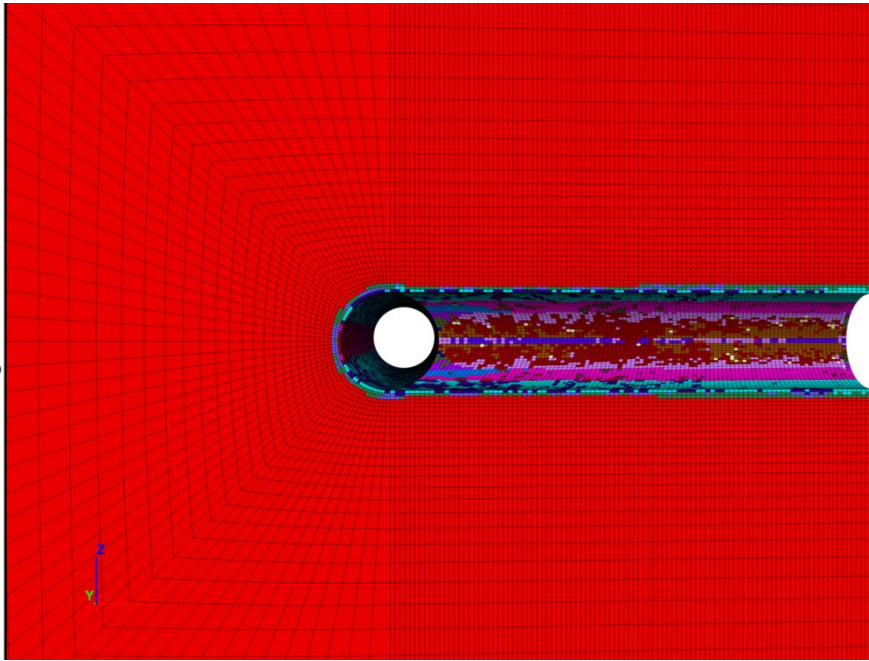


Εικόνα 6.1.3.8 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 0ο

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone State By Average



Εικόνα 6.1.3.9 Κατανομή της πλαστικής ζώνης κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 30ο

Τα παραπάνω διαγράμματα και οι απεικονίσεις της μοντελοποιημένης διασταύρωσης υποδεικνύουν την κατανομή και το μέγεθος των μετατοπίσεων, καθώς και της πλαστικής ζώνης που προκαλούνται από την τομή των σηράγγων για κλίση ασυνεχειών ίση με 90° και διεύθυνση κλίσης ίση με 0° , 30° , 60° και 90° .

Οι μετατοπίσεις τόσο στη στέψη της κύριας σήραγγας όσο και της δευτερεύουσας εμφανίζουν μια ομαλή κατανομή κατά το διαμήκη άξονα των εκσκαφών και παρουσιάζουν μία συμμετρική αύξηση στην περιοχή της διασταύρωσης περίπου 30% συγκριτικά με τις υπόλοιπες μετατοπίσεις που καταγράφονται στην οροφή της κύριας σήραγγας και 50% σε σχέση με της δευτερεύουσας. Οι προκαλούμενες μετατοπίσεις της περιβάλλουσας βραχομάζας στη στέψη του υπόγειου έργου είναι αισθητά μικρότερες (τάξης χιλιοστών) από αυτές που καταγράφονται στις παρειές του (τάξη εκατοστών). Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα επίπεδα ανισοτροπίας αναπτύσσονται κάθετα στον άξονα των σηράγγων. Αυτό συνεπάγεται ωστόσο ότι οι ασυνέχειες θα είναι παράλληλες (ή σχεδόν παράλληλες ανάλογα με τη διεύθυνση της κλίσης τους) στα πλευρικά τοιχώματα όπου και προκαλούν τις πιο έντονες διαταραχές, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 6.1.3.3 και τα Σχ. 6.1.3.2 και 6.1.3.4.

Πιο αναλυτικά, όπως είναι λογικό και απεικονίζεται και το Σχ. 6.1.3.2, οι μέγιστες μετατοπίσεις στις παρειές της κύριας σήραγγας προκαλούνται όταν η διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών είναι 90° και ως εκ τούτου τα επίπεδα ανισοτροπίας εφάπτονται στα πλευρικά τοιχώματα. Όσο μειώνεται η γωνία διεύθυνσης της κλίσης των ασυνεχειών τόσο χαμηλότερες καθίστανται και οι τιμές των μετατοπίσεων στις παρειές της κύριας εκσκαφής. Οι απότομες πτώσεις των τιμών που καταγράφονται στα άκρα του διαγράμματος αποτελούν υπολογιστικό σφάλμα του προγράμματος λόγω των συννοριακών συνθηκών που έχουν τεθεί. Ωστόσο, οι απότομες άνοδοι και μειώσεις του μεγέθους των μετατοπίσεων στο κεντρικό κομμάτι του Σχ. 6.1.3.2 αντιστοιχούν σε πραγματικές μετρούμενες τιμές οι οποίες οφείλονται στην ανώμαλη γεωμετρία των σημείων όπου καταγράφονται (στις δύο σχηματιζόμενες γωνίες της διασταύρωσης των σηράγγων). Όταν η διεύθυνση κλίσης είναι 60° (ή για 30° όπου το φαινόμενο είναι πιο ομαλό) παρατηρείται πολύ μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων στη μία γωνία και πτώση των τιμών τους στην άλλη. Αυτό το φαινόμενο δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην μία σχηματιζόμενη γωνία της διασταύρωσης οι ασυνέχειες σχεδόν τη διχοτομούν άρα λόγω του προσανατολισμού τους δεν επιφέρουν διαταραχή, ενώ στην άλλη γωνία τα επίπεδα ανισοτροπίας σχηματίζουν νοητό τρίγωνο με τα πλευρικά τοιχώματα των εκσκαφών

δημιουργώντας ένα πιο δυσμενές εντατικό πεδίο που ευνοεί την ανάπτυξη μετατοπίσεων και αστοχιών. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές και στο Σχ. 6.1.3.4 και συγκεκριμένα πιο αναπτύσσεται πιο έντονα για διεύθυνση κλίσης 30° .

Όσον αφορά την πλαστική ζώνη, η έκταση της στην οροφή και το δάπεδο των εκσκαφών είναι ελάχιστη καθώς οι ασυνέχειες της ανισότροπης βραχομάζας έχουν κλίση 90° . Το μέγιστο εύρος της εντοπίζεται στην παρειά της κύριας ή της δευτερεύουσας σήραγγας για διεύθυνση κλίσης 90° ή 0° αντίστοιχα, και ισούται με 5m. Κατά μήκος της κύριας σήραγγας, όταν η διεύθυνση κλίσης είναι 0° παρατηρείται ως επί το πλείστον αστοχία στο άρρηκτο πέτρωμα (τιρκουάζ χρώμα στην Εικόνα 6.1.3.4 που συμβολίζει shear-p και tension-p). Η επικράτηση αυτού του είδους αστοχίας οφείλεται στο ότι τα επίπεδα ανισοτροπίας είναι κάθετα τόσο στις παρειές της εκσκαφής όσο και στην οροφή και το δάπεδο. Ως εκ τούτου, ο ευνοϊκός αυτός προσανατολισμός των ασυνεχειών ως προς τον άξονα της κύριας σήραγγας αποτρέπει σημαντικά την αστοχία τους, την οποία υφίστανται όμως ως εφελκυστική και διατμητική τα τεμάχια του άρρηκτου πετρώματος.

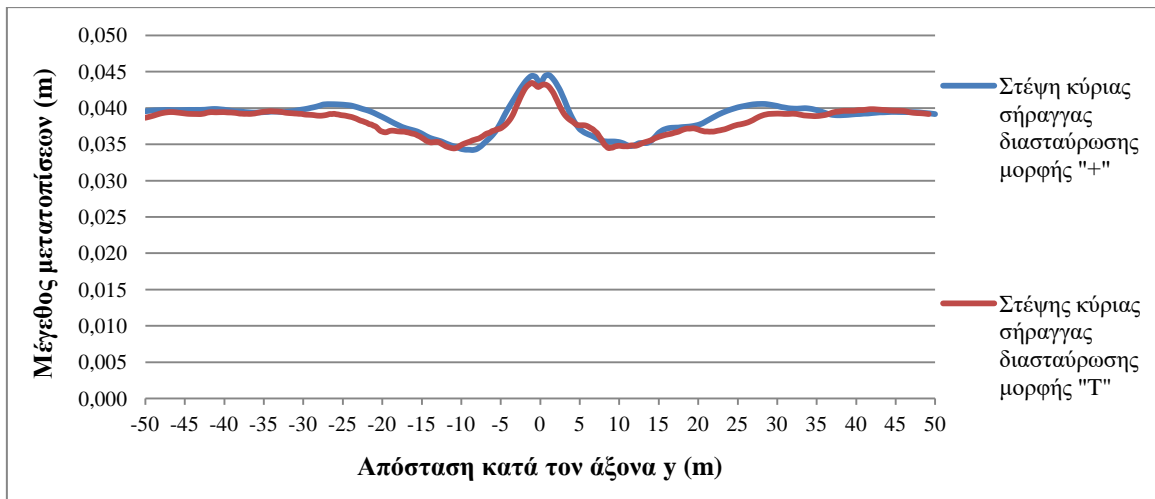
Αντίθετα, στη δευτερεύουσα σήραγγα, για διεύθυνση κλίσης των ασυνεχειών ίση με 0° , είναι εμφανής η έντονη διαταραχή της (Εικόνα 6.1.3.8) και διακρίνονται πολυάριθμα είδη αστοχίας. Στις παρειές της, όπου εφάπτονται τα επίπεδα ανισοτροπίας, λαμβάνουν χώρα αστοχίες σε διάτμηση και εφελκυσμό τόσο των ασυνεχειών όσο και του άρρηκτου πετρώματος. Η κάθετη φόρτιση των επιπέδων ανισοτροπίας από τις υδροστατικές γεωστατικές τάσεις, σε συνδυασμό με την παράλληλη διάταξη των ασυνεχειών στα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής, καθιστούν τις παρειές της πολύ ευάλωτες σε καταπονήσεις. Αντίθετα, η οροφή και το δάπεδο της δευτερεύουσας σήραγγας χαρακτηρίζονται από τον ίδιο τύπο πλαστικής ζώνης που σχηματίζεται στα πλευρικά τοιχώματα της κύριας (όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο). Αυτό γίνεται κατανοητό από το σχετικό προσανατολισμό που έχουν οι άξονες των σήραγγων τόσο μεταξύ τους όσο και με τα επίπεδα των ασυνεχειών. Δηλαδή, όταν οι ασυνέχειες είναι παράλληλες στις παρειές της δευτερεύουσας σήραγγας (έχουν δηλαδή διεύθυνση κλίσης ίση με 0°), τότε διακρίνονται ως κάθετες στη διαμήκη τομή της κύριας. Αντίστροφα, όταν η διεύθυνση κλίσης είναι ίση με 90° , τότε οι ασυνέχειες εφάπτονται στα τοιχώματα της κύριας σήραγγας και είναι κάθετες στις δευτερεύουσας. Συνεπώς, η πλαστική ζώνη της Εικόνας 6.1.3.4 για την κύρια σήραγγα είναι ίδια με αυτή της Εικόνας 6.1.3.11 για τη δευτερεύουσα και ομοίως, η Εικόνα 6.1.3.7 της κύριας σήραγγας αφορά την ανάπτυξη αντίστοιχης πλαστικής ζώνης με αυτή της Εικόνας 6.1.3.8 της δευτερεύουσας.

6.2 Διασταύρωση σηράγγων μορφής «+»

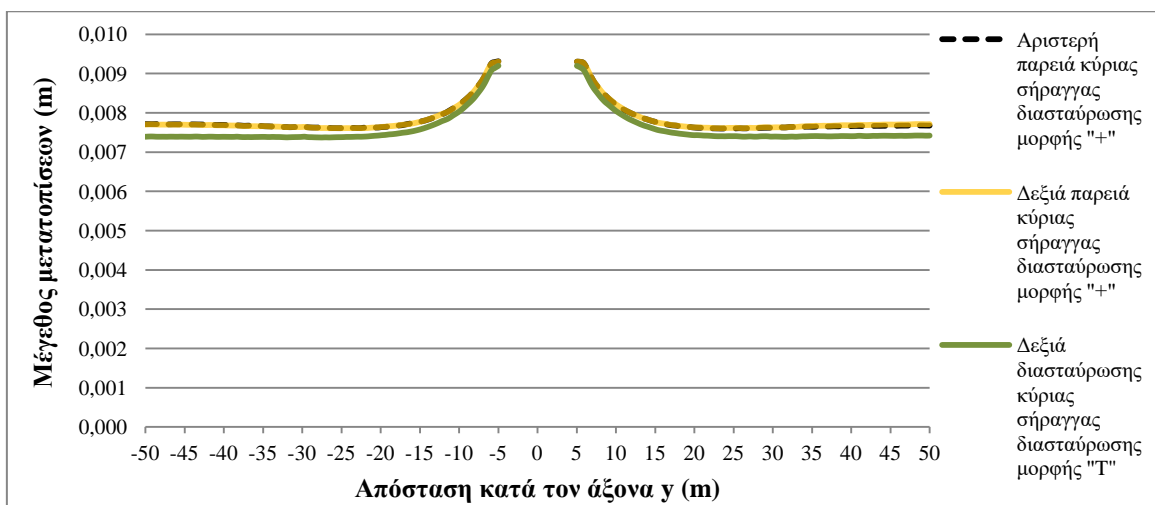
Με σκοπό να εκτιμηθεί η επίδραση που έχει η αύξηση του αριθμού των τεμνόμενων σηράγγων στο μέγεθος των προκαλούμενων μετατοπίσεων και στην έκταση της σχηματιζόμενης πλαστικής ζώνης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και σε διασταύρωση μορφής «+». Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

6.2.1 Κλίση ασυνεχειών ίση με 0°

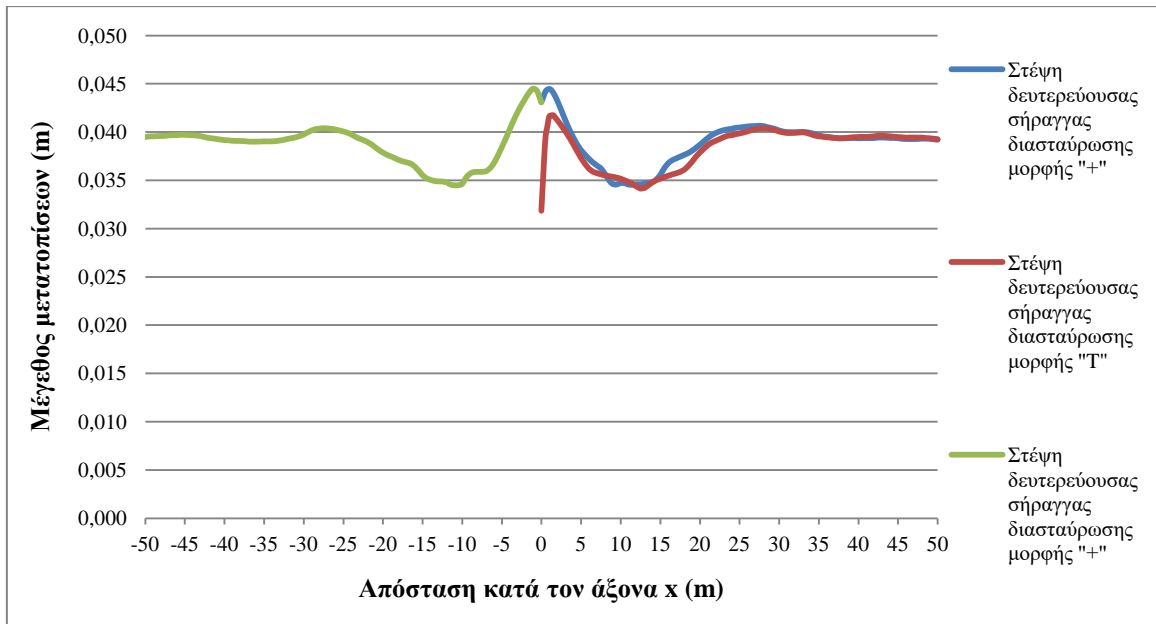
Μετατοπίσεις



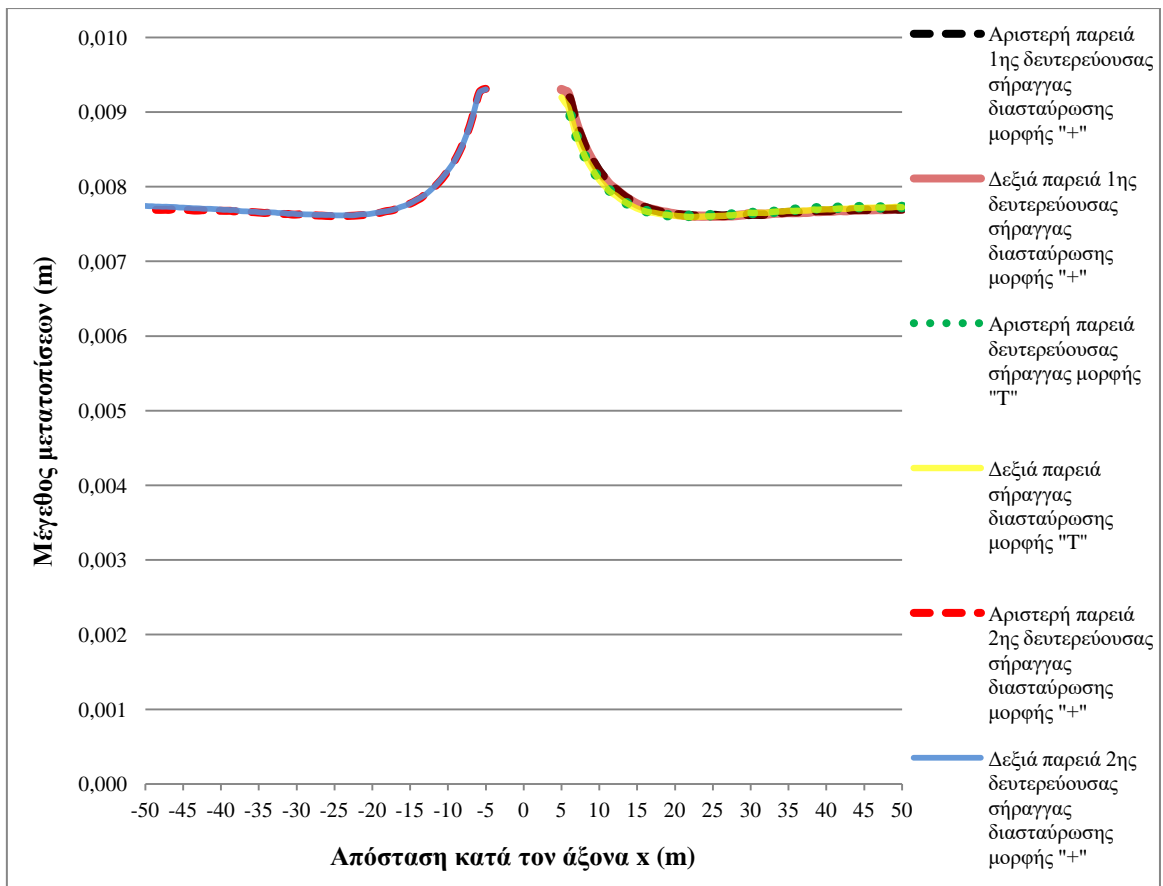
Σχήμα 6.2.1.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+»



Σχήμα 6.2.1.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «+» και κατά μήκος της δεξιάς παρειάς της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T»



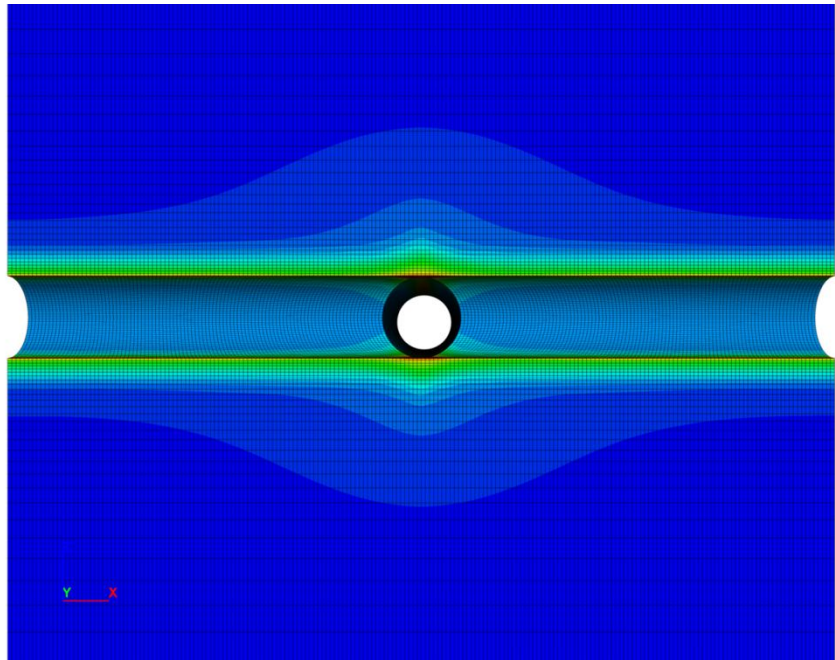
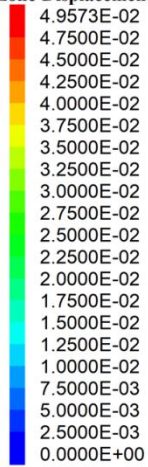
Σχήμα 6.2.1.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+»



Σχήμα 6.2.1.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T» και των δευτερευουσών σήραγγων διασταύρωσης μορφής «+»

FLAC3D 6.00
©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Displacement Magnitude

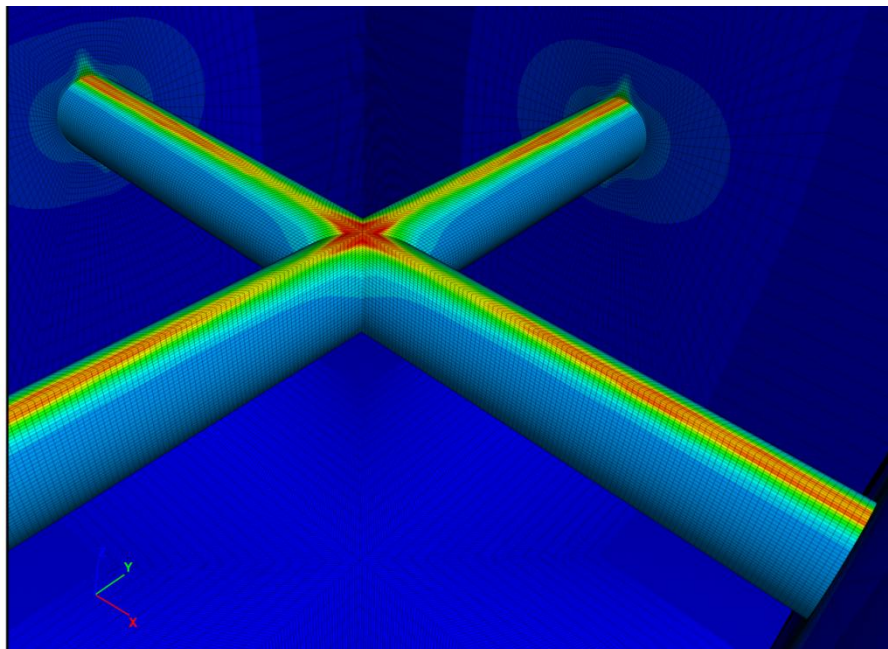
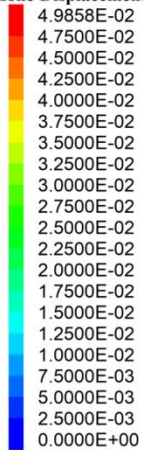


Εικόνα 6.2.1.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας που ταυτίζεται και με την κατανομή των μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Displacement Magnitude



Εικόνα 6.2.1.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης μορφής «+» των σηράγγων

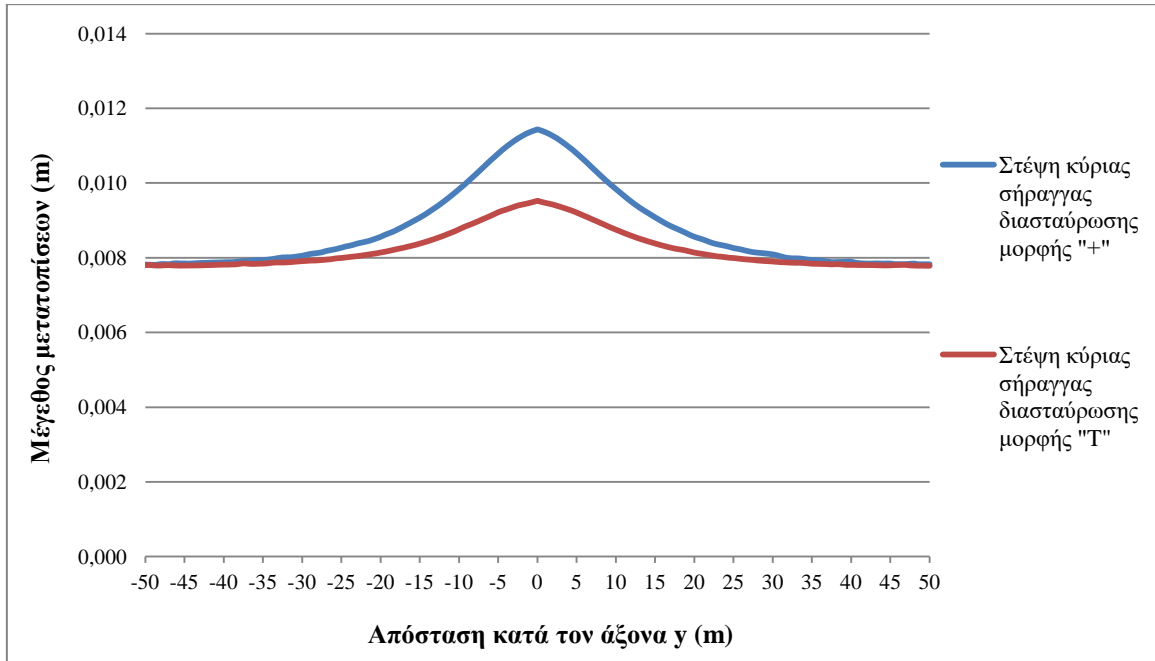
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα μεταβολής της τιμής των μετατοπίσεων κατά μήκος των τεμνόμενων σηράγγων, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ μίας διασταύρωσης μορφής «T» και μίας μορφής «+» που διανοίγονται σε ανισότροπη βραχομάζα με κλίση ασυνεχειών ίση με 0° .

Κύριο συμπέρασμα αποτελεί το γεγονός ότι η κατασκευή μίας επιπλέον δευτερεύουσας σήραγγας για τη δημιουργία διασταύρωσης μορφής «+» δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των προκαλούμενων μετατοπίσεων. Συγκεκριμένα, κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας παρατηρείται μία μέγιστη αύξηση του ενός χιλιοστού στην περιοχή της διασταύρωσης (Σχ. 6.2.1.1), ενώ στα πλευρικά τοιχώματα η επίδραση είναι ακόμα μικρότερη (Σχ. 6.2.1.2). Όσον αφορά τις δευτερεύουσες σήραγγες, οι προκαλούμενες μετατοπίσεις στις παρειές τους είναι σχεδόν ίδιου μεγέθους και για τα δύο είδη διασταύρωσης (Σχ. 6.2.1.4), ενώ αντίθετα στη στέψη καταγράφεται μία διαφορά τριών χιλιοστών όσον αφορά την τιμή της μέγιστης μετατόπισης (Σχ. 6.2.1.3). Αν και δεν παρατηρείται έντονη μεταβολή στο μέγεθος των μετατοπίσεων, η έκτασή τους σημειώνει αισθητή αύξηση (σύγκριση των Εικόνων 6.2.1.1 και 6.2.1.2 με τις Εικόνες 6.1.1.1 και 6.1.1.3). Αυτό γίνεται αντιληπτό επίσης από το Σχ. 6.2.1.3, όπου στην περίπτωση τομής των εκσκαφών σε σχήμα «T», οι μετατοπίσεις στην οροφή της δευτερεύουσας σήραγγας κατά τον κεντρικό διαμήκη άξονα εμφανίζουν μία απότομη μείωση όταν προσεγγίσουν το κέντρο της διασταύρωσης. Αυτό συμβαίνει διότι οι ασκούμενες τάσεις και συνεπώς οι προκαλούμενες μετατοπίσεις συσσωρεύονται στις σχηματιζόμενες γωνίες των τεμνόμενων σηράγγων μειώνοντας έτσι τις μετατοπίσεις στον κεντρικό άξονα (όπως διακρίνεται στην Εικόνα 6.1.1.3). Στην περίπτωση όμως της κάθετης τομής των σηράγγων υπό μορφή «+», το εύρος της ζώνης καταπόνησης επεκτείνεται (Σχ. 6.2.1.2 σε σύγκριση με το Σχ. 6.1.1.3) και συνεπώς η μείωση αυτή του μεγέθους των μετατοπίσεων στο κέντρο της διασταύρωσης είναι σημαντικά μικρότερη (όπως διακρίνεται στο Σχ. 6.2.1.3).

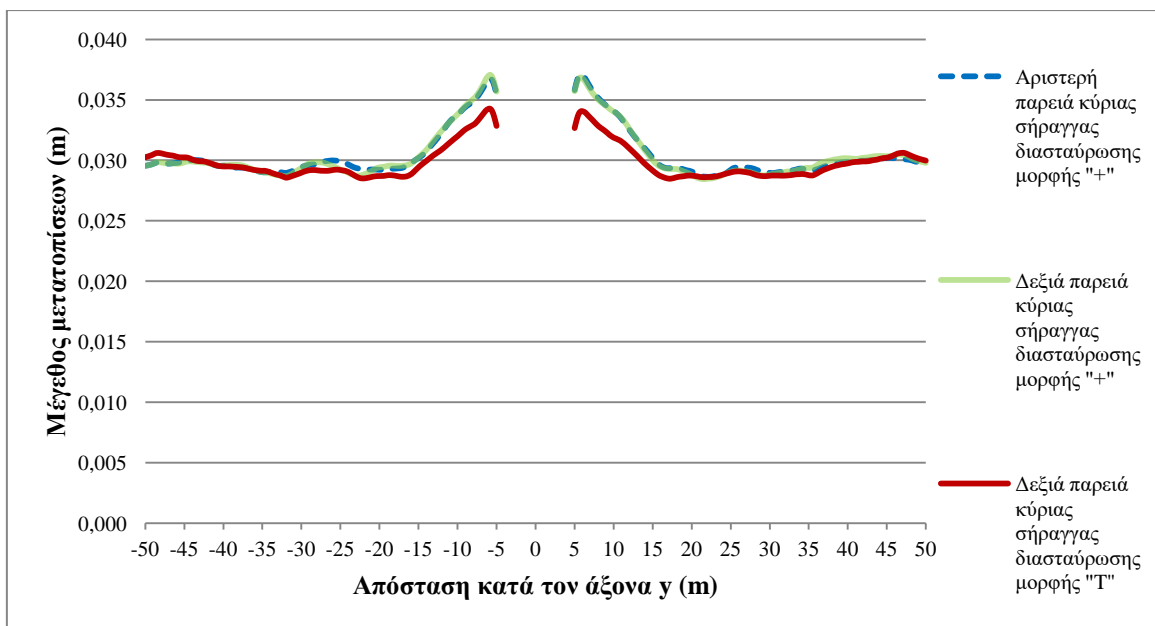
Όσον αφορά την πλαστική ζώνη, αναφέρθηκε ότι η έκταση των προκαλούμενων μετατοπίσεων αυξήθηκε στην περίπτωση της διασταύρωσης μορφής «+» (διακρίνεται επίσης και στη σύγκριση της τομής στην Εικόνα 6.2.1.1 με αυτή της Εικόνας 6.1.1.1). Ως εκ τούτου επηρεάζεται αντίστοιχα και η σχηματιζόμενη πλαστική ζώνη στην οποία παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών τόσο του πετρώματος όσο και των επιπέδων ανισοτροπίας (σύγκριση Εικόνας 6.2.1.3 με Εικόνα 6.1.1.5).

6.2.2 Κλίση ασυνεχειών ίση με 90°

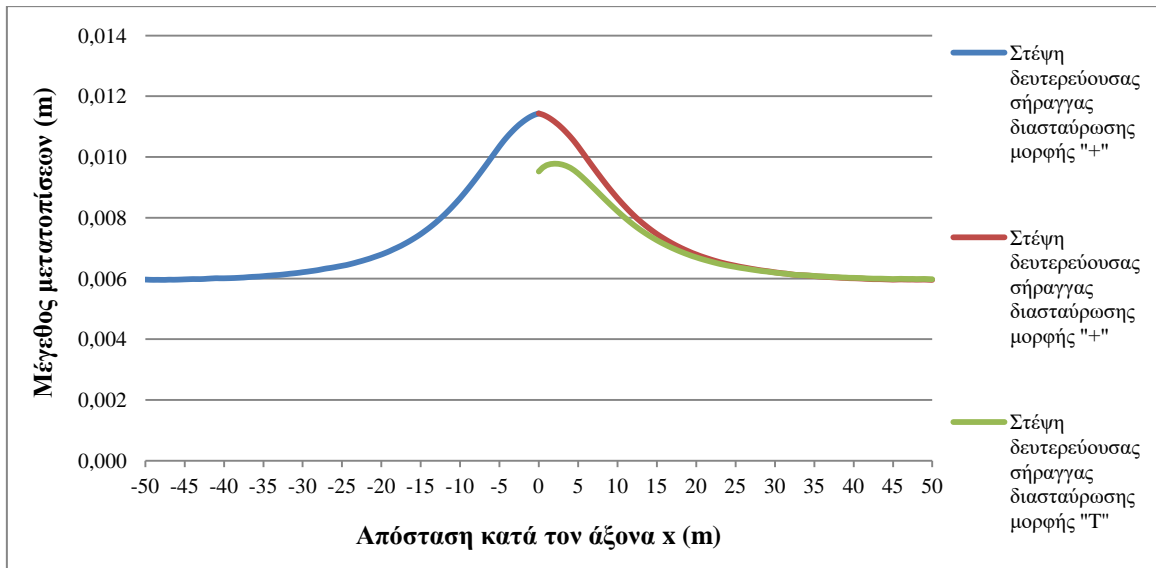
Μετατοπίσεις



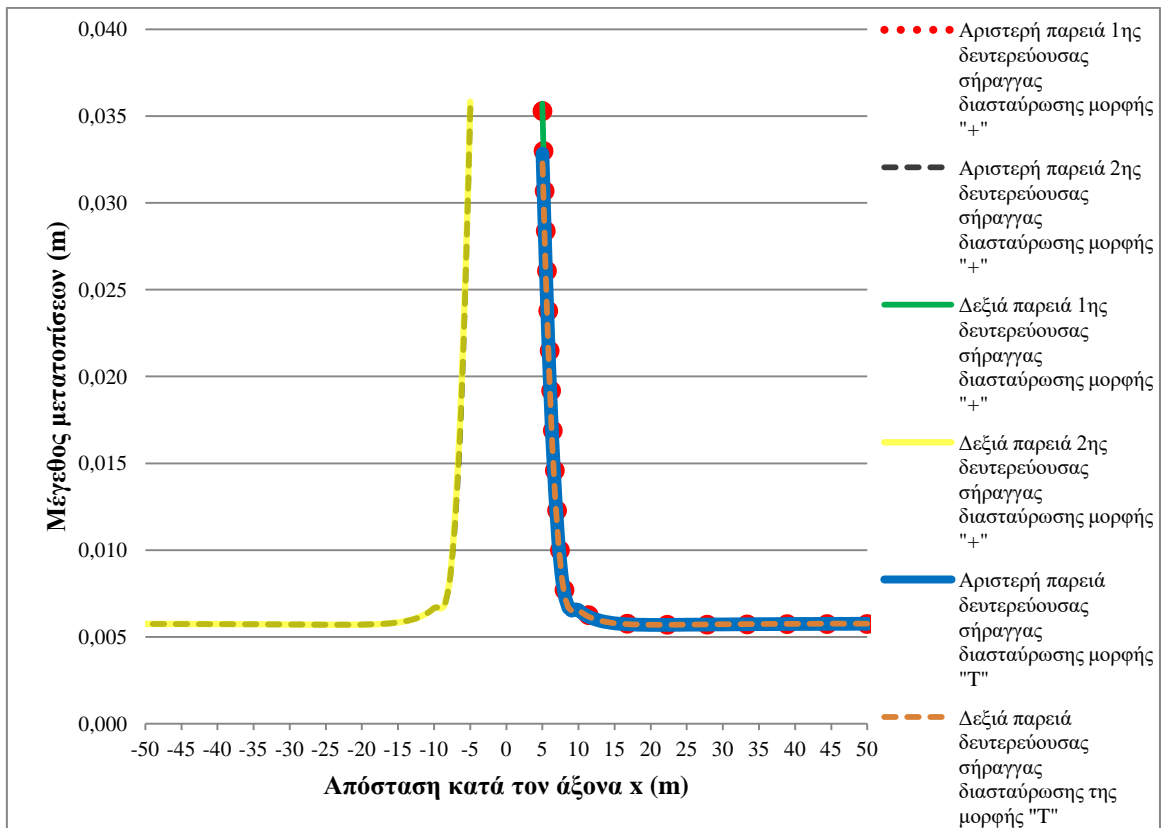
Σχήμα 6.2.2.1 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της κύριας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+»



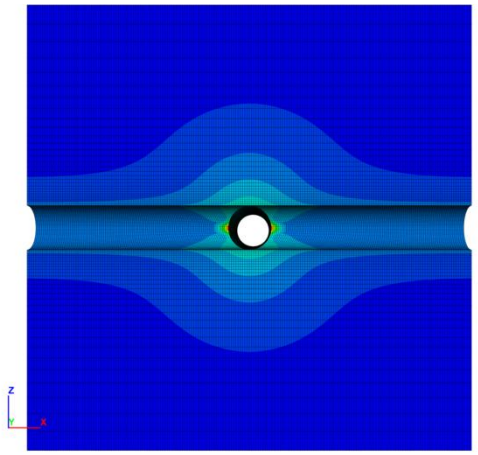
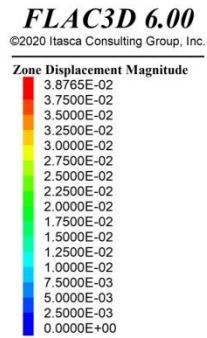
Σχήμα 6.2.2.2 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «+» και κατά μήκος της δεξιάς παρειάς της κύριας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T»



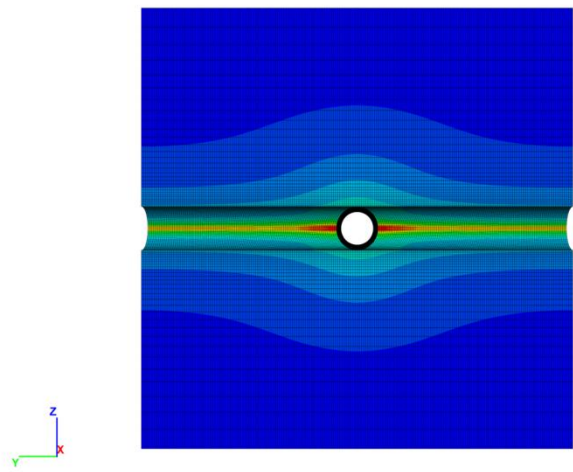
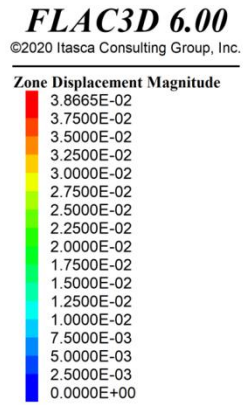
Σχήμα 6.2.2.3 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος της στέψης της δευτερεύουσας σήραγγας για διασταύρωση μορφής «T» και «+»



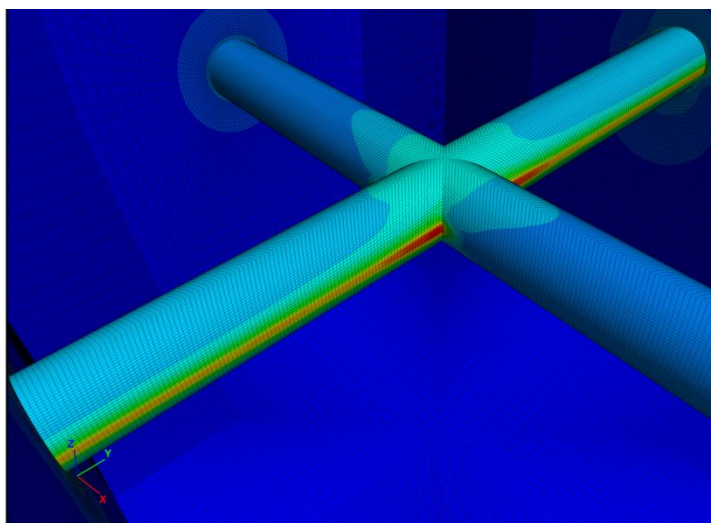
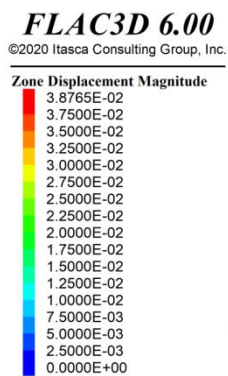
Σχήμα 6.2.2.4 Μεταβολή του μεγέθους των μετατοπίσεων κατά μήκος των παρειών της δευτερεύουσας σήραγγας διασταύρωσης μορφής «T» και των δευτερευουσών σήραγγών διασταύρωσης μορφής «+»



Εικόνα 6.2.2.1 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της δευτερεύουσας σήραγγας



Εικόνα 6.2.2.2 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων κατά το διαμήκη άξονα της κύριας σήραγγας



Εικόνα 6.2.2.3 Κατανομή των προκαλούμενων μετατοπίσεων στην περιοχή διασταύρωσης μορφής «+»

7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διασταύρωση σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων στο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC3D 6.00.

Βασικός στόχος της μελέτης αποτέλεσε η αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η ανισοτροπία της βραχομάζας στις προκαλούμενες μετατοπίσεις και τη σχηματιζόμενη πλαστική ζώνη στην περιοχή της διασταύρωσης δύο ή περισσότερων σηράγγων. Εφόσον κύριο μέλημα της ανάλυσης καθίσταται η εξέταση του βαθμού επιρροής των επιπέδων ανισοτροπίας, οι προσομοιώσεις επικεντρώθηκαν στην παράμετρο της κλίσης και της διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών της ανισότροπης βραχομάζας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για εννέα διαφορετικούς συνδυασμούς τους, κρατώντας σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες, όπως το μέγεθος των σηράγγων, την γωνία τομής τους, το φυσικό εντατικό πεδίο και τις μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών και του άρρηκτου πετρώματος. Με αυτόν τον τρόπο, οι μεταβολές στο μέγεθος, την έκταση και τις θέσεις ανάπτυξης των μετατοπίσεων εξαρτιόντουσαν εξ' ολοκλήρου από την αλλαγή προσανατολισμού των ασυνεχειών.

Το πρώτο μοντέλο διασταύρωσης που εξετάστηκε ήταν της μορφής «T», με κυκλικές σήραγγες, ίδιας διατομής. Αυτό το είδος διασταύρωσης αποτελεί ένα από τα απλούστερα και ασφαλέστερα λόγω: 1) του ομαλού κυκλικού σχήματος των σηράγγων που συμβάλλει στην εκτροπή των τάσεων, 2) του όμοιου μεγέθους διατομής των εκσκαφών που αποτελεί την πιο ευνοϊκή περίπτωση (Liu et al. (2020), Chortis & Kavnadas (2020)), ενώ 3) η κάθετη γωνία διασταύρωσης που σχηματίζεται, σύμφωνα με πολυάριθμες μελέτες (Gercek (1986), Hsiao et al. (2008), Li et al. (2015), Gharouni-Nik & Farmahini Farahani (2016) και Liu et al. (2020)) έχει αποδειχθεί ως η λιγότερο δυσμενής. Οι συνθήκες αυτές ορίζουν ένα ιδανικό μοντέλο, που δεν επηρεάζεται από πολυάριθμες παραμέτρους, ώστε να εξεταστεί επιτυχώς η επίδραση της ανισοτροπίας στην υπόγεια τομή των σηράγγων.

Το μοντέλο μελετήθηκε για κλίσεις ασυνεχειών 0° , 45° και 90° ενώ οι διευθύνσεις των κλίσεων ορίστηκαν ίσες με 0° , 30° , 60° και 90° . Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, οι μέγιστες μετατοπίσεις αναπτύσσονται στα τμήματα της περιφέρειας του υπόγειου ανοίγματος στα οποία εφάπτονται τα επίπεδα της ανισοτροπίας. Το φαινόμενο αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις μελέτες των Tonon & Amadei (2003), Bewick & Kaiser

(2009), Fortsakis et al. (2012) και Wang (2013), που αναλύονται στα υποκεφάλαια 3.1.2 και 3.1.3, και παρατηρείται διότι οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας καθίστανται αισθητά φτωχότερες σε διεύθυνση κάθετη στα επίπεδα της ανισοτροπίας της (όπως περιγράφηκε στο Σχ. 3.2). Συνεπώς, οι μέγιστες μετατοπίσεις αναπτύσσονται στα τμήματα όπου οι ασυνέχειες της βραχομάζας εφάπτονται του υπόγειου ανοίγματος των σηράγγων. Στις περιοχές αυτές καταγράφεται και η μέγιστη έκταση της πλαστικής ζώνης όπου χαρακτηρίζεται κυρίως από διατμητικές και εφελκυστικές αστοχίες των ασυνεχειών. Αυτό δικαιολογείται από την θεώρηση των τμημάτων του άρρηκτου πετρώματος, ανάμεσα στα επίπεδα των ασυνεχειών, ως απλές δοκούς (όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.2, σύμφωνα με τις αναλύσεις των Fortsakis et al. (2012) και Σοφιανός (2015)). Δηλαδή οι επιφάνειες των ασυνεχειών, που χαρακτηρίζονται μηχανικά από μηδενική συνοχή και εφελκυστική αντοχή (παράμετροι που ορίστηκαν κατά την φάση της μοντελοποίησης) αναπτύσσουν τη δυνατότητα απομάκρυνσης και ολίσθησης μεταξύ τους προς τον κενό χώρο της υπόγειας εκσκαφής.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι το φαινόμενο αυτό της αστοχίας των ασυνεχειών σε διάφορα τμήματα της υπόγειας εκσκαφής, ανάλογα με την διεύθυνση και την κλίση τους, καθιστά ιδιαίτερη την ανάλυση μία διασταύρωσης σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα. Δηλαδή όταν ο προσανατολισμός των ασυνεχειών της βραχομάζας είναι ευνοϊκός για μία εκ των δύο τεμνόμενων σηράγγων τότε είναι πολύ πιθανό να χαρακτηρίζεται ως δυσμενής για την άλλη (φαινόμενο που παρατήρησε και ο Grecek, 1986, Σχ. 2.2).

Συγκεκριμένα, για τις κλίσεις και τις διευθύνσεις τους που εξετάστηκαν, αρχικά για κλίση 0° , εφόσον πρόκειται για οριζόντιες ασυνέχειες, τότε εφάπτονται στην οροφή και το δάπεδο και των δύο εκσκαφών και προκαλούν στις περιοχές αυτές την μέγιστη διαταραχή. Όταν η κλίση τίθεται ίση με 45° τότε για διεύθυνση κλίσης 0° , την μεγαλύτερη καταπόνηση δέχεται η δευτερεύουσα σήραγγα καθώς τα επίπεδα ανισοτροπίας διατάσσονται παράλληλα σε τμήμα διαγώνια από την οροφή και την παρειά της. Ωστόσο, για αντίστοιχο συνδυασμό κλίσης και διεύθυνσης κλίσης η κύρια σήραγγα δεν δέχεται τόσο έντονη επιρροή καθώς ο προσανατολισμός των ασυνεχειών δεν είναι τόσο δυσμενής ως προς το δικό της άξονα. Όταν όμως η διεύθυνση κλίσης αυξηθεί κατά 90° τα σενάρια θα αντιστραφούν. Αντίστοιχη περίπτωση αποτελεί και η κλίση των 90° που όταν χαρακτηρίζεται από διεύθυνση ίση με 0° τότε μεγαλύτερη επίδραση δέχεται η δευτερεύουσα σήραγγα και αντίστροφα για διεύθυνση κλίσης 90° .

Συμπερασματικά, κατά τη κατασκευή μίας διασταύρωσης σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα, αποτελεί σχεδιαστικό βήμα ζωτικής σημασίας η καταγραφή του προσανατολισμού των κύριων ασυνεχειών. Με τον τρόπο αυτό, είναι εφικτή η επιλογή κατάλληλου άξονα διάνοιξης του υπόγειου έργου ώστε η προκαλούμενη διαταραχή να κατανέμεται όσο το δυνατόν ισότιμα στις δύο σήραγγες και όχι να επιβαρύνει μόνο τη μία.

Τέλος, εξετάστηκε διασταύρωση μορφής «+» για δύο περιπτώσεις κλίσης και διεύθυνσης κλίσης ώστε να μελετηθεί η επίδραση που προκαλεί η διάνοιξη μιας επιπλέον σήραγγας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αν και οι τιμές των μετατοπίσεων δεν εμφανίζουν έντονη αύξηση, η έκταση της πλαστικής ζώνης μεγαλώνει σημαντικά σε σχέση με την αντίστοιχη που αναπτύσσεται για ίδια κλίση και διεύθυνση κλίσης ασυνεχειών σε διασταύρωση μορφής «T». Το γεγονός αυτό αιτιολογείται από την επιπρόσθετη διαταραχή που προκαλεί η διάνοιξη μιας εκσκαφής δημιουργώντας κενό υπόγειο άνοιγμα το οποίο ευνοεί την επέκταση της ζώνης παραμόρφωσης.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι υποδείξεις του συστήματος RMR που χαρακτηρίζουν το πόσο δυσμενής ή ευμενής είναι η κατάσταση διάνοιξης μίας σήραγγας για διάφορους προσανατολισμούς των ασυνεχειών ως προς τον άξονά της (Πίνακας 3.1.7.1), επιβεβαιώθηκαν με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών από τα μοντέλα των προσομοιώσεων.

Επομένως, συνοψίζοντας τα παραπάνω, η κατασκευή μίας διασταύρωσης σηράγγων σε ανισότροπη βραχομάζα αποτελεί ένα γεωτεχνικό έργο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Πέρα από την παρούσα μελέτη, η οποία εστίασε στον προσανατολισμό των ασυνεχειών και τον αριθμό των τεμνόμενων σηράγγων, για να μελετηθεί περαιτέρω το θέμα και να κατανοηθεί σε βάθος, καθίσταται απαραίτητη η ανάλυση της επίδρασης που έχουν και άλλοι παράγοντες όπως οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών και του άρρηκτου πετρώματος, ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων και το βάθος διάνοιξης. Η εξέταση αυτών των παραμέτρων ως προς το βαθμό που επηρεάζουν τη δομική συμπεριφορά της διασταύρωσης θα συμβάλει ουσιαστικά στην καλύτερη κατανόηση και μελλοντικής σχεδίαση και κατασκευή αντίστοιχων υπόγειων έργων.

Τέλος, όσον αφορά την υποστήριξη της διασταύρωσης, οι Hsiao et al. (2008) καθώς και οι Gkikas & Nomikos (2020), αναφέρουν προτεινόμενα μέτρα στήριξης της περιοχής της υπόγειας τομής των εκσκαφών (όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.7). Ωστόσο, η εφαρμογή των μέτρων αυτών δεν λαμβάνει υπόψη την ανισοτροπία της βραχομάζας και

συνεπώς προτείνεται να ληφθούν ως ενδεικτικές προτάσεις για μια αρχική μελέτη της απαιτούμενης στήριξης στην περιοχή της διασταύρωσης. Για τον τελικό σχεδιασμό του συστήματος υποστήριξης αποτελεί απαραίτητο βήμα να πραγματοποιηθούν αριθμητικές αναλύσεις και προσομοιώσεις της υπόγειας εκσκαφής, ειδικά όταν αντιμετωπίζονται απαιτητικές συνθήκες υπεδάφους, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του έργου και η ευστάθεια της υπόγειας τομής των σηράγγων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bewick R and Kaiser P K, (2009). “Influence of Rock Mass Anisotropy on Tunnel Stability”.
- Bidgoli M N, Jing Lanru, (2014). “Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks”.
- Bieniawski Z.T, (1989). “Engineering Rock Mass Classifications, A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering”.
- Bobet A, (2010). “Lined Circular Tunnels in Elastic Transversely Anisotropic Rock at Depth”
- Chortis F and Kavvadas M, (2020). “Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections”, (Greece)
- Everitt R A and Lajati E Z, (2004). “The influence of rock fabric on excavation damage in the Lac du Bonnett granite”.
- Fortsakis P, Nikas K, Marinos V, Marinos P, (2012). “Anisotropic behaviour of stratified rock masses in tunnelling”. (Greece)
- Fugelso L. E, Van Eeckhout E. M, Marshall M E, Morgan M M, (1989). “Use of Three Computer Codes in the Analysis of Tunnel Intersection Stability Under Quasi-Static Loading”
- Gaspari G. M, Zanoli O, Pescara M, (2010). “Three-dimensional Modelling of the Tunnel Intersections In Weak Rock Mass On the Kadikoy-Kartal Metro Line of Istanbul”. ISRM International Symposium-EUROCK 2010 (Switzerland).
- Gerecek H, (1986). “Stability considerations for underground excavation intersections”. (Turkey)
- Gharouni-Nik M and Farmahini Farahani A, (2016). “Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam”.
- Gkikas V I and Nomikos P P, (2020). “Primary Support Design for Sequentially Excavated Tunnel Junction in Strain-Softening Hoek-Brown Rock Mass”.
- Hoek E and Marinos P G, (2009). “Tunnelling in overstressed rock”. (Croatia)
- Hoek E, Grabinsky M.W, Diederichs, M.S (1991). “Numerical Modeling for Underground Excavation Design”
- Hsiao F. Y, Wang C. L, Chem J. L, (2008). “Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area”. (Taiwan)
- Itasca Consulting Group (2017). “FLAC3D 6.0 FLAC3D Modeling”, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA
- Itasca Consulting Group (2017). “FLAC3D 6.0 Theory and Background”, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA
- Jaeger J C (1960). “Shear failure of anisotropic rocks”
- Li J, Wei X, Liang W, (2015). “The Effects of Different Excavation Angle on Intersecting Tunnel Surrounding Rock Stability”. MIC 2015

- Li Y, Jin X, Lv Z, Dong J, Guo J, (2016). “Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel”.
- Liu H H, Li S, Li L, Zhang Q, (2017). “Study on Deformation Behavior at Intersection of Adit and Mazor Tunnel in Railway”.
- Liu HY, Small JC, Carter JP, Williams DJ, (2009). “Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels”.
- Liu N, Huang Yi-X, Cai W, Chen K, (2020). “Application of Improved Single-Hole Superposition Theory in Nonequal Cross- Section Tunnel Intersection”. (China)
- Madkour H, (2012). “Parametric analysis of tunnel behavior in jointed rock”.
- Pottler R, (1992). “Technical note on Practical Applications: Three-Dimensional Modelling of Junctions at the Channel Tunnel Project”. (Germany)
- Riley W F, (1964). “Stresses at Tunnel Intersections” (Chicago).
- Sainsbury B L & Sainsbury D P, (2017). “Practical Use of the Ubiquitous-Joint Constitutive Model for the Simulation of Anisotropic Rock Masses”
- Simanjuntak T.D.Y.F, Marence M, Mynett A.E, Schleiss A.J, (2014). “Effects of Rock Mass Anisotropy on Deformations and Stresses around Tunnels during Excavation”. International Symposium on DAMs in a global environmental challenges (Indonesia)
- Spyridis P and Bergmeister K, (2015).”Analysis of lateral openings in tunnel linings”, (Austria)
- Swoboda G, Shen X.P, Rosas L (1998). “Damage Model for Jointed Rock Mass and Its Application to Tunnelling”
- Tonon F and Amadei B, (2003). “Stresses in anisotropic rock masses : an engineering perspective building on geological knowledge”.
- Tsuchiyama S, Hayakawa M, Shinokawa T, Konno H, (1988). “Deformation behavior of the tunnel under the excavation of crossing tunnel”.
- Wang T and Huang T, (2013). “Anisotropic Deformation of a Circular Tunnel Excavated in a Rock Mass Containing Sets of Ubiquitous Joints: Theory Analysis and Numerical Modeling”.
- Wittke W (1990). “Rock Mechanics Theory and Applications with Case Histories”
- Zhang W, Xu B, Mei J, Yue G, Shi W, (2020). “A numerical study on mechanical bahacior of jointed rock masses after tunnel excavation”
- Zhao Q & He Z, (2011). “The Ubiquitous-joint Model and Its Application in Predicting the Strength of Stratified Rock”
- Αγιουτάντης Ζ.Γ, (2010). “Στοιχεία Γεωμηχανικής: Μηχανική Πετρωμάτων”, Χανιά: Εκδόσεις ΙΩΝ
- Νομικός Π, (2015). “Εισαγωγή στη Μηχανική Πετρωμάτων”.
- Πριμέντης Κ, (2020). “ Επίδραση διάνοιξης σήραγγας στα μέτρα στήριξης προϋπάρχουσας γειτονικής σήραγγας”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Σοφιανός Α Ι, (2015). “Υποστήριξη Υπόγειων Έργων”