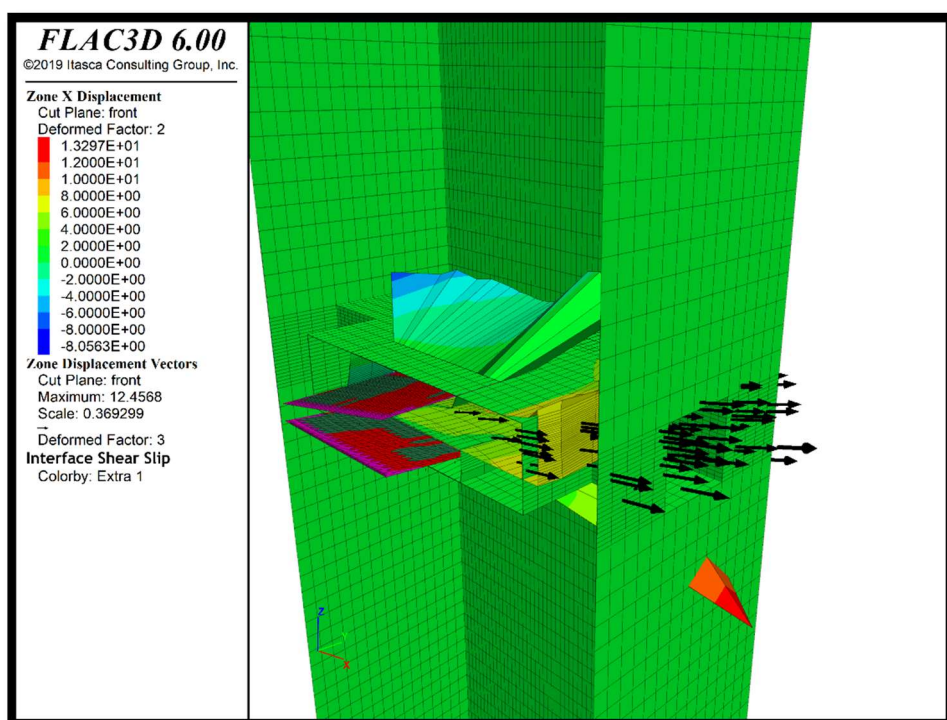




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

*«Τρισδιάστατη αριθμητική διερεύνηση επίδρασης συστήματος ασυνεχειών στην
αντοχή στύλου σε υπόγεια εκμετάλλευση»*



Αθανάσιος Α. Τσιρέκας

Εξεταστική Επιτροπή

Γεώργιος Ξηρουδάκης, Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής

Γεώργιος Σαράτσης, Ε.Δ.Ι.Π

Χανιά

Οκτώβριος 2023

Αφιερώνεται στην
οικογένειά μου.

«Everything should be made as simple as possible, but not simpler»

Albert Einstein

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής. Οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Επίσης σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία υποβάλλεται σε αξιολόγηση και οι απόψεις που περιέχονται σε αυτήν αφορούν τον συγγραφέα και δεν εκφράζουν την εξεταστική τριμελή επιτροπή.

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή μου κ. Γεώργιο Ξηρουδάκη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και μου ανέθεσε το συγκεκριμένο θέμα. Κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας, με καθοδήγησε, με βοήθησε, καθώς επίσης μου έκανε σημαντικές διορθώσεις καθ' όλο το διάστημα της επεξεργασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Σαράτση, εργαστηριακό διδακτικό προσωπικό του εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων, ο οποίος σε όλη την πορεία στάθηκε δίπλα μου με εύστοχες παρατηρήσεις. Με υπομονή, συζητήσεις και την τεχνική του βοήθεια μου έδωσε την δυνατότητα να κατανοήσω το πρόγραμμα και βοήθησε καθοριστικά στην ομαλή πορεία της παρούσας διπλωματικής.

Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Μιχαήλ Γαλετάκη, διευθυντή του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας - Υγιεινής και Ασφάλειας στην Μεταλλευτική και Κοσμήτορα της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και στην αξιολόγηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με υποστηρίζει όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και για την αμέριστη αγάπη τους, τους φίλους μου για τις αναμνήσεις που μου χάρισαν όλο αυτό το διάστημα της όμορφης φοιτητικής ζωής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ δικαιωματικά αξίζει η Ευμορφία Πανουργιά που κατά την διάρκεια της διπλωματικής, με βοήθησε συναισθηματικά όπως επίσης και με τις εύστοχες παρατηρήσεις της επί του κειμένου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή των στύλων και κατ' επέκταση την ασφάλεια των υπογείων έργων. Έτσι, διερευνά τον ρόλο ανάπτυξης των ασυνεχειών που βρίσκονται εντός της δομής του πετρώματος και μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή του αναλόγως την γωνία στην οποία αναπτύσσονται.

Κατά την κατασκευή ενός υπογείου έργου, οι ήδη υπάρχουσες τάσεις ανακατανέμονται, ειδικά στα σημεία που υπάρχουν εκσκαφές. Στην μέθοδο θαλάμων και στύλων αυτή η ανακατανομή των τάσεων έχει ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση των στύλων υποστήριξης. Γενικά, οι τάσεις και οι μετατοπίσεις σε αυτές τις περιοχές αποκλίνουν από την Θεωρία της γραμμικής Ελαστικότητας, έτσι ανάλογα με το είδος του γεωυλικού μπορούν να δημιουργηθούν φαινόμενα όπως η δημιουργία ρωγμών, είτε η δημιουργία πλαστικής ζώνης στα σύνορα της εκσκαφής. Ίσως από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους εύρεσης λύσεων κλειστής μορφής προβλημάτων, η οποία βασίζεται στην έκφραση των τάσεων και των μετατοπίσεων, είναι η χρήση αριθμητικών μεθόδων, όπως των πεπερασμένων στοιχείων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η επίλυση τέτοιους είδους προβλήματος με κατανομή των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα, το οποίο έχει υποβαθμιστεί ήδη από την ύπαρξη ασυνεχειών. Θα εξεταστεί επομένως η επίδραση ασυνεχειών στην ευστάθεια στύλου υποστήριξης υπόγειας εκμετάλλευσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποδεικνύουν πως τόσο οι ασυνέχειες που αναπτύσσονται κατακόρυφα κατά τον άξονα x , όσο και αυτές που δημιουργούν το σύστημα το οποίο αποτελείται από δύο ασυνέχειες τοποθετημένες τυχαία στον χώρο σε αντίθετες όμως κατευθύνσεις οδηγούν σε αστοχία του στύλου.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η συμβολή της παρούσας διπλωματικής αφορά την ανάπτυξη κώδικα και την δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου, καθώς επίσης και ότι οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν όχι μόνο στον μελετούμενο στύλο, αλλά σε όλο το γεωμετρικό μοντέλο. Τέλος επισημαίνεται ότι, το βάθος επιλέχθηκε στα 2000 m ώστε να αστοχήσει ο στύλος ενώ παράλληλα, οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν τυπικό ισότροπο ομοιογενές πέτρωμα.

Λέξεις κλειδιά: Ασυνέχειες, τρισδιάστατη αριθμητική διερεύνηση, μηχανική πετρωμάτων, μέθοδος θαλάμων και στύλων, αριθμητικές μέθοδοι, υπόγεια έργα, FLAC^{3D}.

Abstract

The purpose of this thesis is to investigate the parameters that affect the endurance of the pillars and, by extension, the safety of the underground projects. Thus, it investigates the role of development of discontinuities that are within the rock structure and can affect its endurance depending on the angle at which they develop.

During the construction of an underground project, the pre-existing tensions are redistributed, especially where there are excavations. In the room and pillar method this redistribution of tensions results in the loading of the support pillars. In general, the tensions and displacements in these areas deviate from the Theory of Linear Elasticity, so depending on the type of geomaterial, phenomena such as the creation of cracks, or the creation of a plastic zone at the boundaries of the excavation can be created. Perhaps one of the most effective methods of finding solutions to closed-form problems, which is based on the expression of tensions and displacements, is the use of numerical methods, such as finite elements.

In this thesis, the solution of this type of problem is investigated with the distribution of tensions and displacements around an underground opening, which has already been degraded by the existence of discontinuities. Therefore, it will be considered the effect of discontinuities on the stability of underground holding support pillar. The obtained results prove that, both the discontinuities that are developed vertically along the x-axis, as well as those that create the system which consists of two discontinuities placed randomly in space but in opposite directions, lead to failure of the pillar.

It should be noted that, the contribution of this thesis concerns the code development and the creation of this model, as well as that the boundary conditions were applied not only to the studied pillar, but to the whole geometric model. Finally, it is highlighted that, the depth was chosen at 2000 m in order to fail the pillar while, at the same time, the properties used concerned typical isotropic homogenous rock.

Key words: Discontinuities, 3D numerical investigation, rock mechanics, chamber and column method, numerical methods, underground projects, FLAC^{3D}.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Σχημάτων	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής	2
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	4
2 Μέθοδοι υπογείων εκμεταλλεύσεων	5
2.1 Γενική εισαγωγή στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις	5
2.2 Μέθοδος θαλάμων και στύλων	7
3 Τάσεις στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις	9
3.1 Εύρεση τάσεων προσομοιώσεων	9
3.2 Τανυστής τάσεων	9
3.3 Παραμορφώσεις	11
3.4 Κριτήρια αστοχίας	12
3.4.1 Παρουσίαση κριτηρίων αστοχίας	12
3.4.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb	13
3.5 Αντοχή ρηγματωμένης βραχομάζας	14
3.5.1 Ορισμός ασυνέχειας	14
3.6 Γεωτεχνικά κριτήρια ταξινόμησης ασυνεχειών	15
3.7 Ασυνέχειες και πέτρωμα	16
3.8 Παράμετροι - ιδιότητες ασυνεχειών μοντέλου	17
4 Αριθμητικές μέθοδοι	18
4.1 Γενικά	18
4.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method)	19
4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)	20
4.4 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method)	22
5 Λογισμικό προσομοίωσης - Παρουσίαση αποτελεσμάτων	24
5.1 Γενικά για το FLAC ^{3D}	24
5.2 Μοντέλο Προσομοίωσης	25

5.3	Γεωμετρικό Μοντέλο	26
5.4	Μηχανικές ιδιότητες μοντέλου	30
5.5	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	32
6	Συμπεράσματα - Προτάσεις	45
	Βιβλιογραφία	48

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Δεδομένων και τάσεων.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πίνακας 3-2 ιδιότητες ασυνεχειών.	17
Πίνακας 5-1 Παράμετροι ασυνεχειών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση ...	31

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Ανάλυση των μεθόδων εκμετάλλευσης (Μπενάρδος, 2014)	6
Σχήμα 2-2 Κύκλος εργασιών κατά την μέθοδο διάτρηση-ανατίναξη (Heiniö, 1999) ...	7
Σχήμα 2-3 Επεξήγηση της μεθόδου θαλάμων και στύλων (Atlas Copco, 2000)	8
Σχήμα 3-1 Αναπαράσταση Τανυστών στα τρία επίπεδα (Grosser & Bormann, 2011) ..	10
Σχήμα 3-2 Τυπικό διάγραμμα τάσεων (σ)- παραμορφώσεων (ϵ) με καταγεγραμμένα τα διάφορα στάδια.	12
Σχήμα 3-3 Κριτήριο Mohr-Coulomb	14
Σχήμα 3-4 Γραμμική απεικόνιση ειδών ασυνεχειών (Latham, Van Meulen, & Dupray, 2006)	15
Σχήμα 3-5 Γεωτεχνικά κριτήρια για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών (Hudson & Harrison, 1997)	16
Σχήμα 5-1 Πρόσοψη της προς μελέτης γεωμετρίας	26
Σχήμα 5-2 Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου αριστερά brick και δεξιά uniform-wedge (πηγή: FLAC ^{3D} manual).....	27
Σχήμα 5-3 Διαστάσεις γεωμετρικού μοντέλου	28
Σχήμα 5-4 Μοντέλο θαλάμων και στύλων	28
Σχήμα 5-5 Διαστάσεις θαλάμων και στύλων	29
Σχήμα 5-6 Μοντέλο θαλάμων και στύλων τομή κατά τον άξονα y.....	30
Σχήμα 5-7 Διαστάσεις κεντρικού στύλου	30
Σχήμα 5-8 Αρχικό μοντέλο 30 μοιρών μετατοπίσεις κατά τον άξονα z	33
Σχήμα 5-9 Ανάπτυξη ασυνέχειας 30 μοιρών	34
Σχήμα 5-10 Πρόσοψη ανάπτυξης ασυνέχειας.....	34
Σχήμα 5-11 Κατακόρυφες μετατοπίσεις μοντέλου 30 μοιρών.	35
Σχήμα 5-12 Κατακόρυφες τάσεις μοντέλου 30 μοιρών.....	35
Σχήμα 5-13 Οριζόντιες τάσεις και διανύσματα μετατοπίσεων μοντέλου 30 μοιρών..	36
Σχήμα 5-14 Πρόσοψη ανάπτυξης ασυνέχειας 60 μοιρών	37
Σχήμα 5-15 Ανάπτυξη ασυνέχειας 60 μοιρών	37
Σχήμα 5-16 Κατακόρυφες μετατοπίσεις μοντέλου 60 μοιρών	38
Σχήμα 5-17 Κατακόρυφες τάσεις μοντέλου 60 μοιρών.....	38
Σχήμα 5-18 Οριζόντιες τάσεις και διανύσματα μετατοπίσεων μοντέλου 60 μοιρών..	39
Σχήμα 5-19 Πρόσοψη κεντρικού στύλου - ύπαρξη ασυνέχειας στο 1m.	39
Σχήμα 5-20 Τρισδιάστατη απεικόνιση στύλου με την ασυνέχεια εντός του.	40
Σχήμα 5-21 Άποψη του κεντρικού στύλου με την ασυνέχεια	40
Σχήμα 5-22 Αξονική ρωγμάτωση του στύλου λόγω επίδρασης των κατακόρυφων τάσεων.....	41
Σχήμα 5-23 Κατακόρυφες μετατοπίσεις	41
Σχήμα 5-24 Άποψη του κεντρικού στύλου με την ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών..	42
Σχήμα 5-25 Κατακόρυφες μετατοπίσεις του στύλου και του συστήματος ασυνεχειών.	43
Σχήμα 5-26 Κατακόρυφες τάσεις και επικρατούσα κατάσταση.....	43
Σχήμα 5-27 Κατακόρυφες τάσεις.....	44

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική πρόκειται να μελετήσει τις διάφορες παραμέτρους που τείνουν να επηρεάσουν την αντοχή ενός στύλου υπογείου, ο οποίος παραλαμβάνει δυνάμεις από την οροφή που υποστηρίζει. Σε αυτή τη εξεταζόμενη διπλωματική υπόγειου ανοίγματος με την χρήση της μεθόδου θαλάμων και στύλων, προστίθεται η επίδραση που δέχεται ο στύλος από την ύπαρξη ασυνεχειών εντός του πετρώματος.

Έτσι, θα μελετηθεί πως επηρεάζεται η αντοχή του στύλου από την εμφάνιση των ασυνεχειών στο πέτρωμα. Είναι γνωστό από τις εργαστηριακές δοκιμές καρότων πετρώματος, πως η συμπεριφορά του κάθε δείγματος διαφέρει από το επόμενο και αυτό διότι, υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις στην δομή του παραδείγματος χάρι σε ρωγμές-ασυνέχειες, μέγεθος κόκκων κ.α.

Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις τείνουν να αυξηθούν, αφενός λόγω περιβαλλοντικών λόγων (περιοχές Natura 2000), οπτικών οχλήσεων, αφετέρου λόγω ανάγκης για εύρεση πιο εμπλουτισμένων σε χρήσιμα μέταλλα κοιτασμάτων καθότι, την περίοδο που διανύουμε οι ανάγκες για στρατηγικά μέταλλα και κοιτάσματα ενεργειακών ορυκτών είναι αυξημένες όσο άλλοτε.

Ακόμη, στην χώρα μας πολλές εταιρίες εκμετάλλευσης μαρμάρων, μεταλλευμάτων, αλλά και ενεργειακών ορυκτών, χρησιμοποιούν υπόγειες εκμεταλλεύσεις ή τείνουν προς αυτή την κατεύθυνση ώστε να αυξήσουν την αποληψιμότητά του εν εκμετάλλευση σχηματισμού.

Επομένως, είναι ένα θέμα με προοπτική μελέτης, τόσο για τη βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχουσών εκμεταλλεύσεων, όσο και για την ίδρυση νέων όπου θα είναι εφικτό να αυξηθεί η αποδοτικότητα του λατομείου/μεταλλείου που θα μελετάται.

Αυτό που καθιστά την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καινοτόμα είναι το γεγονός ότι, θα μελετηθεί πως πρόκειται να συμπεριφερθεί το πέτρωμα στην περίπτωση που παρουσιάζει διαφοροποίηση στην δομή του, όπως στην εμφάνιση ασυνεχειών.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι υπόγειων εκμεταλλεύσεων. Ωστόσο, επιλέγεται να μελετηθεί η μέθοδος θαλάμων και στύλων δεδομένου ότι, είναι μία αρκετά διαδεδομένη μέθοδος και με το μικρότερο κόστος υλοποίησης, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Σημαντική είναι και η ανάπτυξη του θέματος των ασυνεχειών, για τον τρόπο δημιουργίας τους, τον λόγο που υποβαθμίζουν την βραχομάζα, όπως επίσης και την κατηγοριοποίηση τους. Ούτως ώστε να γίνει μια εισαγωγή στο αντικείμενο που πρόκειται να μελετηθεί, θα γίνει μια αναφορά στο χαρακτηρισμό της βραχομάζας, και των περιπτώσεων αστοχίας που οφείλονται στην μικροσκοπική δομή των πετρωμάτων.

Η επεξεργασία των δεδομένων έχει πραγματοποιηθεί αποκλειστικά με την χρήση του λογισμικού FLAC^{3D}. Το συγκεκριμένο λογισμικό βασίζεται στην χρήση μεθόδου αριθμητικής ανάλυσης. Αφού προκύψουν κάποια δεδομένα για υγιές πέτρωμα, στην συνέχεια θα εισαχθούν στην δομή του πετρώματος ασυνέχειες, πάλι με την χρήση κώδικα στο πρόγραμμα FLAC^{3D} και θα γίνει μελέτη για το πώς τελικά επηρεάζουν το στύλο.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Το συγκεκριμένο θέμα έχει απασχολήσει κατά καιρούς διάφορους ερευνητές-μελετητές, οι οποίοι έχουν προσπαθήσει να ανακαλύψουν τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αντοχή των πετρωμάτων, κυρίως σε υπόγεια έργα.

Πράγματι πρόκειται για ένα ενδιαφέρον θέμα καθότι, εξετάζεται η επίδραση διάφορων παραγόντων στην αντοχή των πετρωμάτων, όπως η κλίση των ασυνεχειών, οι γεωτεχνικοί παράγοντές τους, ο λόγος πλάτους - ύψους του στύλου κ.λπ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην παρούσα εργασία έχει δοθεί βαρύτητα στη δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο είναι πρωτότυπο σε σχέση με αυτά που έχουν μελετηθεί. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει και το γεγονός ότι, οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν σε όλο το μοντέλο και όχι μόνο στα όρια του στύλου, όπως σε άλλες μελέτες.

Αρκετοί μελετητές, προσπαθούν με προσομοιώσεις στο εργαστήριο είτε μέσω προγραμμάτων αριθμητικών επιλύσεων, να προσδιορίσουν την αντοχή της βραχομάζας σαν πρώτο βήμα πριν ξεκινήσουν τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

Υπάρχουν μελέτες όπως των (Li & Bahrani, 2021) όπου ερευνούν την αντοχή και τους μηχανισμούς αστοχίας των ρωγματομένων στύλων χρησιμοποιώντας δύο διαστάσεων πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Ακόμη άλλη μια ενδιαφέρουσα μελέτη των (Malli, Yetkin, & Kahraman, 2017) όπου ερευνούσαν την απομείωση του στύλου ώστε να ανακτηθεί περισσότερο μετάλλευμα από το εν ενεργεία μεταλλείο ψευδαργύρου – μόλυβδου στην περιοχή Bayındır στην Τουρκία. Χρησιμοποίησαν το Phase^{2D} όπως επίσης και το RocData και προσομοίωσαν τέσσερις πιθανές περιπτώσεις όπου η κάθε μία αποτελούταν από τρία βήματα και κατέγραφαν τις τάσεις. Κατά την πρώτη περίπτωση οι στύλοι εξορύχθηκαν τελείως, στην δεύτερη περίπτωση οι στύλοι εξορύχθηκαν αλλά στην θέση τους τοποθέτησαν στείρο υλικό, στην τρίτη περίπτωση ξεκίνησε η απομείωση του στύλου κατά μισό μέτρο από κάθε πλευρά και στο τέλος η ολική του ανάκτηση. Στο τέταρτο βήμα υπολογίστηκαν οι τάσεις με απομείωση του όγκου τους, έπειτα με αντικατάσταση του ενός με στείρα υλικά και τέλος και οι δύο να έχουν αντικατασταθεί με στείρο υλικό.

Σε άλλη μελέτη (Zhang, Zhao, Han, & Bai, 2022) οι μελετητές εστιάζουν με την χρήση θεωρητικών μοντέλων, αριθμητικών προσομοιώσεων όπως επίσης και μετρήσεων από το πεδίο στο να εκτιμήσουν τα φορτία που δέχονται οι στύλοι καθώς και την αντοχή τους. Αυτό είναι σημαντικό διότι μελετούν υπόγειους στύλους σε λιγνιτωρυχεία οι οποίοι έχουν ζωτική σημασία στην ασφάλεια των εργαζομένων και του έργου.

Ακόμα μία ενδιαφέρουσα μελέτη (Deliveris & Benardos, 2017), όπου χρησιμοποιείται μια δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση και τα αποτελέσματα της συγκρίνονται με αποτελέσματα από τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση. Η προσομοίωση αφορά την γεωμηχανική απόκριση του στύλου. Η μελέτη πραγματοποιείται για λιγνιτωρυχείο της βόρειο Ελλάδος ώστε να προσδιοριστεί η καλύτερη τοποθέτηση των στύλων εντός του. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το δισδιάστατο μοντέλο πλησιάζει τις τιμές του τρισδιάστατου. Ωστόσο το τρισδιάστατο μοντέλο έχει καλύτερη απόκριση όσον αφορά τα εξωτερικά φορτία που δρουν.

Υπάρχουν ακόμη πολλές ενδιαφέρουσες μελέτες όπως (Frith & Reed, 2019; Zhang, Zhao, Han, & Bai, 2022; Sarfarazi, Babanouri, Fattahi, & Asgari, 2023; Vlachogiannis & Benardos, 2023; Jessu & Spearing, 2018; Skrzypkowski, 2020) όπου στην πλειοψηφία τους ερευνούν την ασφάλεια των υπογείων έργων στην μέθοδο θαλάμων και στύλων με δισδιάστατες και τρισδιάστατες αριθμητικές μεθόδους.

Ακόμη, αναζητούν τρόπους για περεταίρω υποστήριξη του κεντρικού στύλου π.χ. μέσω ξύλινων πλαισίων στα οποία τοποθετούν στείρα υλικά τις υφιστάμενης εκμετάλλευσης, ώστε να αυξήσουν την αποληψιμότητα και να μειώσουν την πιθανότητα αστοχίας.

Επίσης, συχνή είναι η περίπτωση καταγραφής των τάσεων που επικρατούν *in situ* με σκοπό την ασφαλή συνέχιση των εργασιών. Στην περίπτωση αυτή, η προσομοίωση με αριθμητικές μεθόδους είναι αναγκαία και τα αποτελέσματα που προκύπτουν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Από τα παραπάνω είναι κατανοητό πως η ανάλυση στους λόγους που οδηγούν σε αστοχία των στύλων και η εμβάθυνση στις αριθμητικές μεθόδους με την χρήση πλέον των υπερ.-υπολογιστών σε συνδυασμό με την αυξημένη ανάγκη του πολιτισμού μας για μέταλλα (παραγωγή μπαταριών, αυτοκινήτων, ηλεκτρικών συσκευών) λόγω της πληθυσμιακής αύξησης είναι παραπάνω από επιτακτική. Αυτός είναι ο λόγος που η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καθίσταται ενδιαφέρουσα

Στη διπλωματική εργασία αρχικά θα γίνει μια εισαγωγή για τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις και συγκεκριμένα για την μέθοδο θαλάμων και στύλων, η οποία θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία. Στην συνέχεια, θα ακολουθήσει μια εισαγωγή για τις τάσεις που εφαρμόζονται και τον τρόπο που υπολογίζονται. Έπειτα, θα γίνει περιγραφή των ασυνεχειών και των τρόπων κατάταξής τους, όπως επίσης και των αριθμητικών μεθόδων. Τέλος, θα γίνει μία σύντομη αναφορά στο πρόγραμμα $FLAC^{3D}$ και στον τρόπο επίλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα καθοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν και τέλος, τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της βραχομάζας επειδή, ενώ είναι προφορτισμένη και σε ισορροπία πριν την κατασκευή του εκάστοτε τεχνικού έργου, όταν εξορυχθεί πέτρωμα όπως στα υπόγεια έργα, το εντατικό πεδίο που υπάρχει αναδιανέμεται εκ νέου, και πολλές φορές δημιουργεί πρόβλημα στην έκβαση του έργου. Τα κυριότερα προβλήματα που συναντώνται αποτελούν αστοχίες, οι οποίες μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ζωή των εργαζομένων (π.χ. κατάρρευση οροφής λόγω αστοχίας στύλου κ.λπ.), αλλά και την πορεία του έργου.

2 Μέθοδοι υπογείων εκμεταλλεύσεων

2.1 Γενική εισαγωγή στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις

Πολλά κοιτάσματα τα οποία είναι σημαντικά, είτε για την στρατηγική τους σημασία, είτε για την οικονομική τους σημασία βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Τέτοιου είδους κοιτάσματα δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν με υπαίθρια εκμετάλλευση, καθώς η προσέγγισή τους από την επιφάνεια θα είχε αρνητικό οικονομικό αποτέλεσμα. Έτσι η μεταλλευτική στρέφεται σε μεθόδους υπογείων, ώστε να καταστήσει δυνατή την εκμετάλλευσή τους.

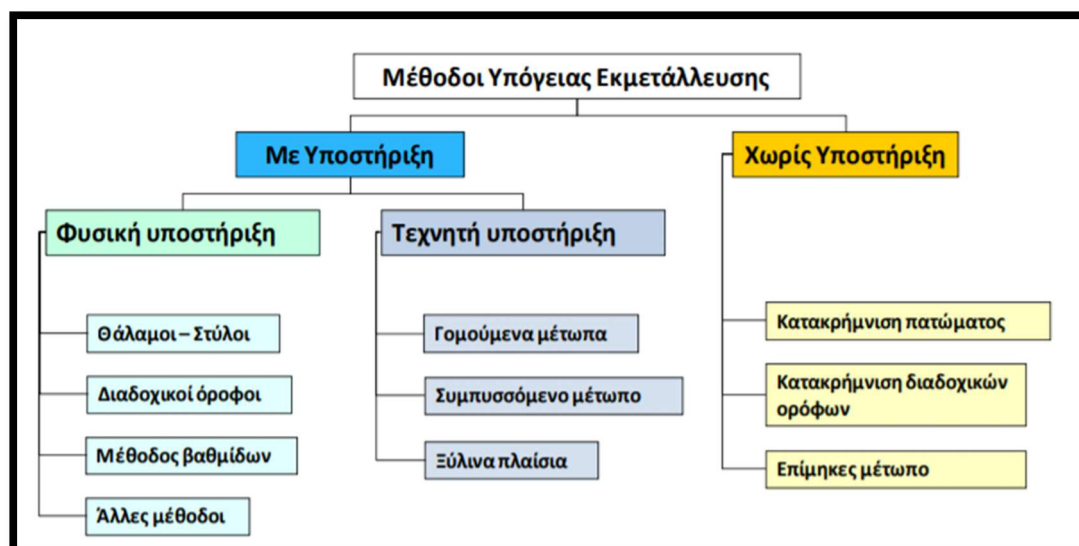
Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις, οι οποίες επιλέγονται βάση κάποιων κριτηρίων. Κάποια κριτήρια είναι το είδος του πετρώματος και του μεταλλεύματος, η αντοχή τους, η διαχωριστικότητά τους και εν γένει, μηχανικής και τεχνικής φύσεως παράγοντες που καθορίζουν την μέθοδο υπόγειας εκμετάλλευσής.

Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούν έργα προσπέλασης (όπως στοές, φρέατα, κεκλιμένα) για την προσέγγιση του κοιτάσματος και την απόσχιση του μεταλλεύματος, χωρίς να χρειάζεται η μετακίνηση μεγάλων όγκων υπερκείμενων. Ο στόχος αυτών των μεθόδων είναι, η αύξηση της απόληψης (που είναι το ποσοστό του μεταλλεύματος που μπορεί να εξορυχθεί), η μείωση του κόστους της εκμετάλλευσης και η μέγιστη δυνατή ασφάλεια του προσωπικού του έργου.

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί. Αυτές οι τρεις κατηγορίες είναι οι εξής:

1. Κενά μέτωπα
2. Γομούμενα μέτωπα
3. Κατακρημνιζόμενα μέτωπα

Στην περίπτωση i αποσχίζεται το μετάλλευμα και ο χώρος παραμένει κενός με φυσική υποστήριξη από το περιβάλλον πέτρωμα. Στην περίπτωση ii ο κενός χώρος που δημιουργείται μετά την εξόρυξη του μεταλλεύματος πληρώνεται με τα στείρα υλικά που προέκυψαν από την εξορυκτική διαδικασία. Τέλος στην περίπτωση iii ο κενός χώρος που δημιουργείται κατά την εκμετάλλευση πληρώνεται με τα υλικά που προκύπτουν από την κατακρήμνιση της οροφής.



Σχήμα 2-1 Ανάλυση των μεθόδων εκμετάλλευσης (Μπενάρδος, 2014)

Η εκμετάλλευση πραγματοποιείται στις ακόλουθες τρεις φάσεις. Πρώτη είναι η φάση της προσπέλασης του κοιτάσματος, κατά την οποία πραγματοποιούνται οι διανοίξεις των οδών πρόσβασης προς την περιοχή ενδιαφέροντος. Η δεύτερη φάση αποτελείται από την περιχάραξη του κοιτάσματος, όπου πραγματοποιούνται τα προπαρασκευαστικά και τα έργα ανάπτυξης αντίστοιχα, ώστε να προσεγγισθεί το κοίτασμα και να ξεκινήσει η εκμετάλλευση του. Η τρίτη και τελευταία φάση είναι το στάδιο της εξόφλησης, κατά το οποίο ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση. Σ' αυτό το στάδιο γίνεται επιπλέον εκμετάλλευση της μάζας του κοιτάσματος (απομείωση των στύλων ώστε να ανακτηθεί περισσότερο μέταλλευμα), η οποία όμως είναι σύμφωνη με τις παραδοχές της εκάστοτε ακολουθούμενης μεθόδου και της τεχνικής μελέτης του έργου, ώστε να μην δημιουργηθούν θέματα ασφαλείας.

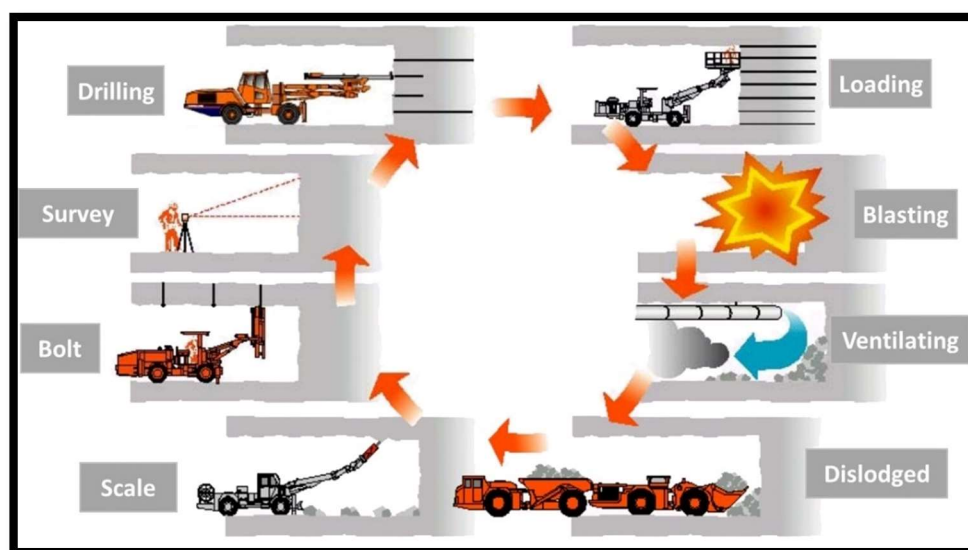
Ο κύκλος εργασιών που ακολουθείται λόγω την χρήσης εκρηκτικών στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις με την μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης, έχεις τα εξής στάδια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-2:

1. Διάτρηση
2. Γόμωση
3. Πυροδότηση
4. Αερισμός του μετώπου
5. Αποκομιδή του θραυσμένου υλικού
6. Ξεσκάρωμα (αναλόγως το είδος του πετρώματος)

7. Υποστήριξη της οροφής
8. Αποτύπωση της στοάς

Στο στάδιο της διάτρησης πραγματοποιείται η όρυξη των διατρημάτων τα οποία θα γομωθούν με εκρηκτικά. Ακολουθεί η γόμωση των διατρημάτων με την εκρηκτική ύλη. Στην συνέχεια, κατά το στάδιο της πυροδότησης ανατινάσσεται το γομωμένο με εκρηκτικά μέτωπο της εκσκαφής, ώστε να γίνει διάρρηξη της συνοχής του πετρώματος. Ακολουθεί ο αερισμός του μετώπου ώστε να απομακρυνθούν τα αέρια από την ανατίναξη, καθώς επίσης και ο κονιορτός που έχει δημιουργηθεί.

Έπειτα, γίνεται η αποκομιδή του θραυσμένου υλικού το οποίο μεταφέρεται εκτός του μετώπου ανατίναξης. Επόμενη εργασία αποτελεί το ξεσκάρωμα, κατά το οποίο απομακρύνονται μέσω μηχανικού εξοπλισμού οι επισφαλείς και ασταθείς όγκοι της οροφής, ώστε να αποτραπεί η μελλοντική πτώση τους. Κατά το στάδιο της υποστήριξης της οροφής εξελίσσεται μια διαδικασία κατά την οποία κοχλιώνεται η οροφή με μεταλλικές ράβδους και την εισαγωγή ρητίνης. Η τελευταία εργασία που πραγματοποιείται είναι η αποτύπωση της στοάς μετά την ανατίναξη.



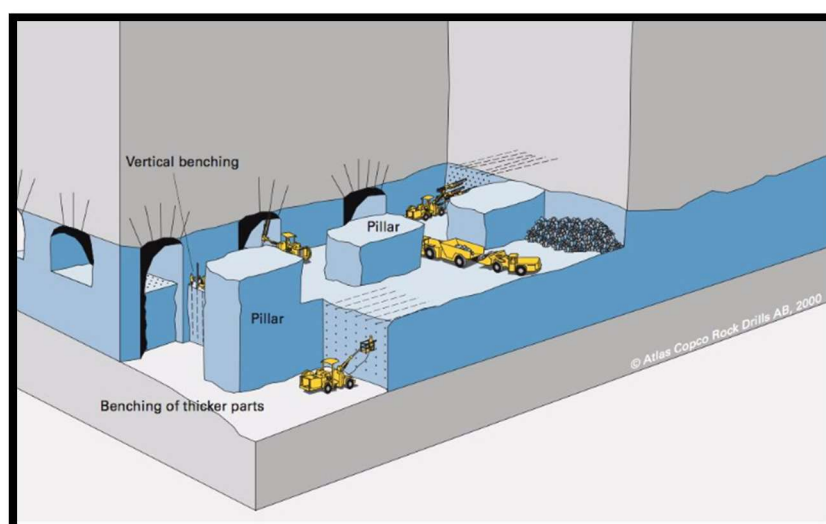
Σχήμα 2-2 Κύκλος εργασιών κατά την μέθοδο διάτρηση-ανατίναξη (Heiniö, 1999)

2.2 Μέθοδος θαλάμων και στύλων

Η μέθοδος θαλάμων και στύλων είναι μέθοδος εκμετάλλευσης που εντάσσεται στις μεθόδους με κενά μέτωπα διότι, ο χώρος που δημιουργείται μετά την εκσκαφή παραμένει φυσικά ανοιχτός από την υποστήριξη του πετρώματος. Χρησιμοποιείται σαν μέ-

θοδος εκμετάλλευσης σε μέτριας κλίσης στρωσιγενή κοιτάσματα, τα οποία έχουν συνήθως ανθεκτική οροφή και μέτριο πάχος. Για την εφαρμογή της μεθόδου δημιουργούνται παράλληλες στοές των οποίων οι άξονες ισαπέχουν μεταξύ τους. Έπειτα δημιουργούνται κάθετες στοές ως προς τις πρώτες με την ίδια διαδικασία. Κατ' αυτό τον τρόπο δημιουργούνται οι στύλοι καθώς ο ενδιαμέσος χώρος των στοών απομακρύνεται και παραμένουν μόνο οι στύλοι που στηρίζουν την οροφή.

Οι διαστάσεις της μεθόδου δημιουργούνται αφού ληφθούν υπόψιν οι εξής παράγοντες: το εντατικό πεδίο το οποίο εφαρμόζεται στην περιοχή, οι μηχανικές ιδιότητες του μεταλλεύματος αλλά και του υπερκείμενου πετρώματος, όπως επίσης και το πάχος του κοιτάσματος. Οι προαναφερόμενοι παράγοντες είναι σημαντικοί καθότι, βάση αυτών θα γίνει ο σχεδιασμός της διάταξης και της διατομής των στύλων μέσα στο έργο. Συνήθως οι στύλοι δεν τοποθετούνται με συγκεκριμένη μορφή ή θέση και αυτό διότι, ηθελμένα προσπαθούν, εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν, να τοποθετηθούν σε φτωχά σημεία του μεταλλεύματος. Είναι σημαντικό επίσης ότι, κατά την φάση της εξόφλησης μειώνεται εκ νέου η διάσταση των στύλων ώστε να αυξηθεί ο συντελεστής απόληψης και να απομακρυνθεί όσο το δυνατόν περισσότερο μέταλλευμα.



Σχήμα 2-3 Επεξήγηση της μεθόδου θαλάμων και στύλων (Atlas Copco, 2000)

3 Τάσεις στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις

3.1 Εύρεση τάσεων προσομοιώσεων

Στα υπόγεια έργα, οι τάσεις μπορούν να υπολογιστούν με έναν απλό και γρήγορο τρόπο. Εφόσον είναι γνωστό το βάθος και πρόκειται για ομαλή τοπογραφία χωρίς ρήγματα, τότε μπορεί να υπολογιστεί η κατακόρυφη (αξονική) τάση σ_{33} που επικρατεί με τον εξής τύπο:

$$\sigma_v = \gamma * h \quad [3.1]$$

Όπου γ το ειδικό βάρος του σχηματισμού και h το ύψος των υπερκείμενων. Η σ_v συμβολίζεται και ως σ_{33} .

Για της εγκάρσιες (διατμητικές) τάσεις σ_{11} και σ_{22} ο υπολογισμός τους πραγματοποιείται από τον εξής τύπο:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} * \sigma_v \quad [3.2]$$

όπου ν είναι ο συντελεστής Poisson και σ_v η κατακόρυφη αξονική τάση.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις δημιουργήθηκαν σε ένα φύλλο επεξεργασίας του excel με τους παραπάνω τύπους. Στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της πυκνότητας, της επιτάχυνσης της βαρύτητας και του συντελεστή Poisson, όπως και το βάθος όπου θεωρήθηκε ότι υφίσταται η υπόγεια εκμετάλλευση, τα οποία εφαρμόστηκαν στους παραπάνω τύπους.

Πίνακας 3-1 Δεδομένων και τάσεων

P (kg/m ³)	γ (m/s ²)	ν	h (m)	σ_v (Pa)	σ_h (Pa)
2700	9.81	0.25	2000	$5.3 * 10^7$	$1.32 * 10^7$

3.2 Τανυστής τάσεων

Στην μηχανική των πετρωμάτων, η τάση συνδέεται με τον ελκυστή τάσεων,

$$T = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad [3.3]$$

όπου το T είναι ο τανυστής τάσεων στο επίπεδο που μελετάται και έχει μονάδες Pascal. Ο τανυστής τάσεων προκύπτει από τον τανυστή τάσεων του Cauchy, ο οποίος είναι τανυστής 2^{ης} τάξης με 9 συνιστώσες και προσδιορίζει ακριβώς την εντατική κατάσταση

σε ένα σημείο μέσα στο υπό μελέτη υλικό στις τρεις κατευθύνσεις, όταν αυτό έχει δεχθεί μικρή παραμόρφωση. Η σχέση που συνδέσει τον τανυστή με τις τάσεις είναι η εξής:

$$T_j^{(n)} = \sigma_{ij} * n_i \quad [3.4]$$

έτσι αν αναπτυχθεί η εξίσωση 3.3 θα προκύψει:

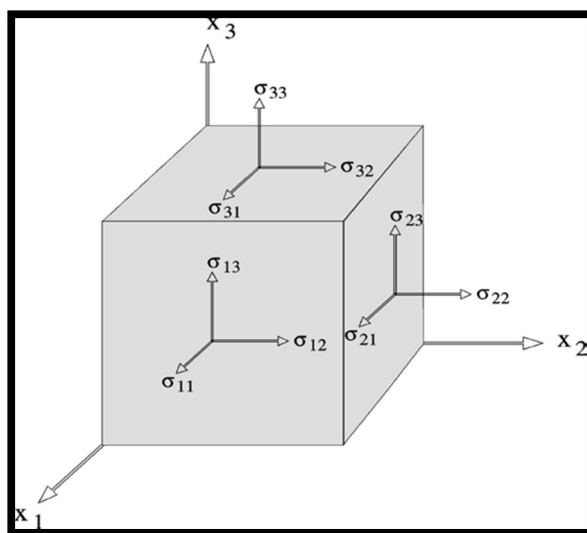
$$\begin{bmatrix} T_1^{(n)} & T_2^{(n)} & T_3^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Όπως φαίνεται, ο τανυστής συνδέει ένα μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης (n) με το διάνυσμα των τάσεων (T) κάθετα σε μια φανταστική επιφάνεια n. Υπάρχουν επίσης τρεις κύριες τάσεις που αποκαλούνται και αναλλοίωτες, των οποίων οι τιμές δεν εξαρτώνται από το σύστημα συντεταγμένων ή την επιφάνεια του στοιχείου που μελετάται. Σημαντικό είναι να επισημανθεί πως, η τάση ανήκει στο επίπεδο που είναι κάθετο προς τον άξονα που συμβολίζει ο πρώτος δείκτης και είναι παράλληλη προς τον άξονα που συμβολίζει ο δεύτερος δείκτης (Αγιουντάνης, 2019).

Οι κύριες τάσεις είναι στην διαγώνιο του παρακάτω πίνακα.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Οι υπόλοιπες είναι διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται στο σώμα.



Σχήμα 3-1 Αναπαράσταση Τανυστών στα τρία επίπεδα (Grosser & Bormann, 2011)

3.3 Παραμορφώσεις

Τα πετρώματα όπως και κάθε στερεό σώμα, όταν δεχθούν εξωτερικές δυνάμεις, προκαλείται μεταβολή των εσωτερικών τους σημείων και αλλάζει το σχήμα τους ή το μέγεθός τους. Αυτή η μεταβολή ονομάζεται παραμόρφωση.

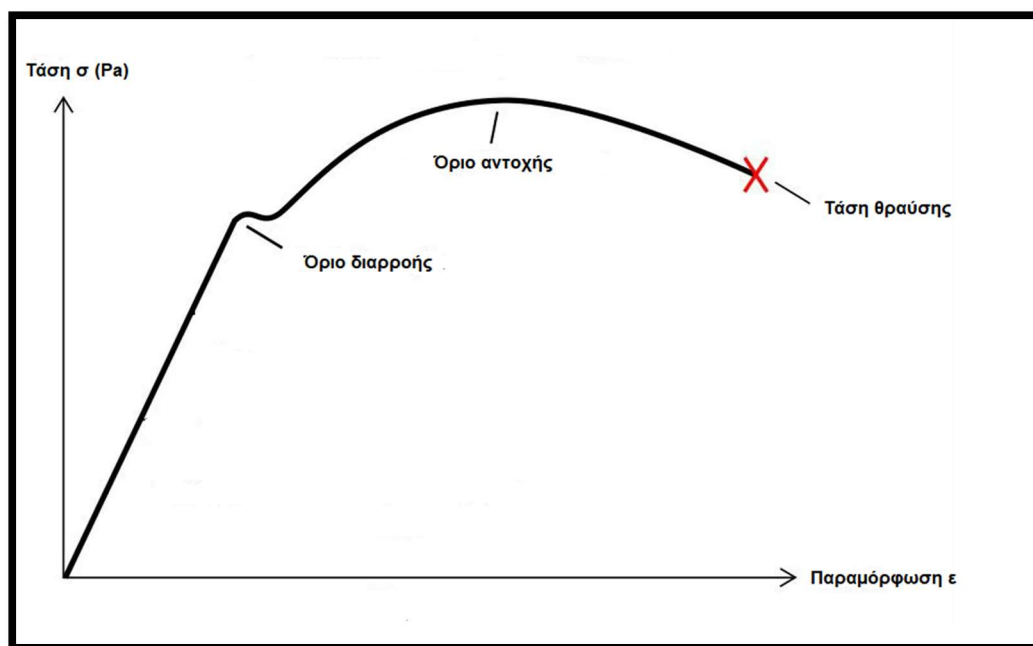
Η παραμόρφωση δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \quad [3.5]$$

όπου το l_0 είναι η αρχική απόσταση μεταξύ δύο σημείων και l_1 είναι η τελική απόσταση. Έχει ενδιαφέρον να γνωρίζεις κανείς την παραμόρφωση που μπορεί να δεχθεί ένα πέτρωμα πριν αστοχήσει, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης ενός σώματος. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να επιλεγθούν τα κριτήρια αστοχίας που θα εφαρμοσθούν.

Ένας πολύ συχνός τρόπος να παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είναι με την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων. Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τις τάσεις που εφαρμόζονται προς την παραμόρφωση που επιδέχεται το σώμα. Είναι χρήσιμη η αναφορά για την παραμόρφωση, καθώς στο συγκεκριμένο πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η αντοχή του στύλου.

Σ' ένα στερεό σώμα όταν δέχεται δυνάμεις που ξεπερνάνε το όριο ελαστικότητας επέρχεται μόνιμη παραμόρφωση, η οποία ονομάζεται πλαστική παραμόρφωση. Η τελευταία έχει ένα ανώτερο όριο το όριο θραύσης, πάνω από το οποίο το στερεό σώμα αρχίζει να εμφανίζει ρωγμές. Στα υπόγεια τεχνικά έργα είναι ζωτικής σημασίας για τους εργαζομένους, τον μηχανολογικό εξοπλισμό αλλά και για το ίδιο το έργο, να είναι γνωστό το όριο θραύσης ώστε να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες.



Σχήμα 3-2 Τυπικό διάγραμμα τάσεων (σ)- παραμορφώσεων (ϵ) με καταγεγραμμένα τα διάφορα στάδια.

3.4 Κριτήρια αστοχίας

3.4.1 Παρουσίαση κριτηρίων αστοχίας

Η εντατική κατάσταση ενός υλικού είναι δυνατόν να αναχθεί σε μία μορφή τέτοια, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη της αντοχής του υλικού (Αγιουτάντης, 2019).

Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω, στα πετρώματα η διατύπωση της αντοχής τους σε θλίψη, εφελκυσμό ή σε διάτμηση, εκφράζεται με τα κριτήρια αστοχίας. Τα κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα εξής:

1. Κριτήριο Coulomb ή θεωρία της αστοχίας σε διάτμηση που αναφέρει ότι, ένα υλικό μπορεί να αστοχήσει σε διάτμηση κατά ένα επίπεδο αν οι τάσεις που αναπτύσσονται υπερβούν την συνοχή του υλικού ή την αντίσταση λόγω τριβής.
2. Κριτήριο Mohr που είναι μια συνάρτηση κατά την οποία δημιουργείται μια καμπύλη. Αν η καμπύλη βρίσκεται κάτω από το κριτήριο δεν πληρούνται οι συνθήκες αστοχίας. Αντίθετα, αν εφάπτεται ή ξεπερνάει το κριτήριο τότε πληρούνται οι συνθήκες αστοχίας.
3. Κριτήριο Griffith κατά το οποίο η θραύση του υλικού πραγματοποιείται από την συγκέντρωση τάσεων στα άκρα μικροσκοπικών ρωγμών οι οποίες εν τέλει μεγαλώνουν και οδηγούν σε αστοχία.

4. Κριτήριο Hoek-Brown κατά το οποίο δεν ορίζεται η τιμή της διατμητικής τάσης για την οποία αστοχεί το υλικό, αλλά η τιμή της κύριας τάσης, για την οποία επέρχεται η θραύση.
5. Κριτήριο Mohr-Coulomb κατά το οποίο υπάρχει ένα σημείο, του οποίου η διατμητική τάση προκαλεί θραύση για μια συγκεκριμένη ορθή τάση. Άρα είναι ένα ζεύγος τάσεων οι οποίες προκαλούν θραύση. Αυτά τα κοινά σημεία δημιουργούν μια κοινή εφαπτομένη που την ονομάζουμε περιβάλλουσα θραύσης.

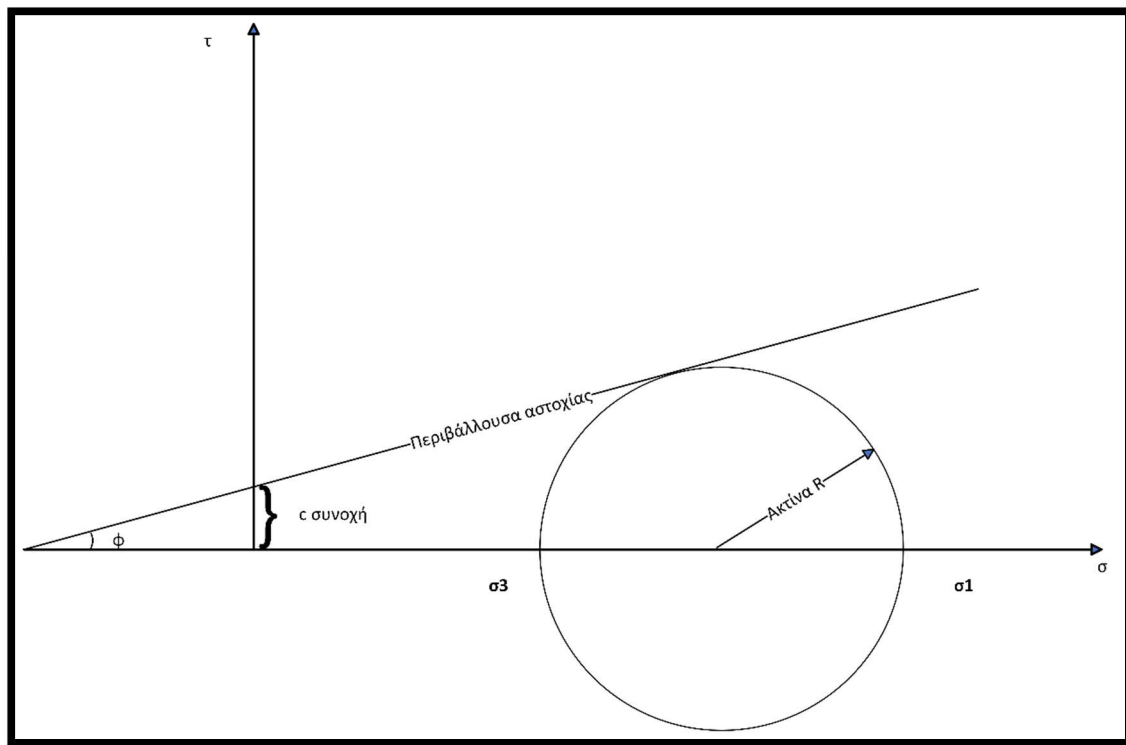
Με τα παραπάνω κριτήρια λοιπόν, δύναται να γίνει ο έλεγχος αστοχίας του υπό μελέτη πετρώματος. Ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία, το κριτήριο το οποίο επιλέγεται για την μελέτη της συμπεριφοράς είναι των Mohr-Coulomb.

3.4.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το κριτήριο Mohr-Coulomb είναι ένα κριτήριο με το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να εντοπιστεί το ζεύγος εκείνο τις διατμητικής και της ορθής τάσης κατά το οποίο επέρχεται θραύση. Η θεμελιώδης εξίσωση του κριτηρίου είναι η εξής:

$$1. \quad \tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan(\varphi) \quad \text{όπου}$$

- τ_f = η διατμητική τάση θραύσεως
- c = η συνοχή
- σ_f = η ορθή τάση θραύσεως
- φ = η γωνία τριβής



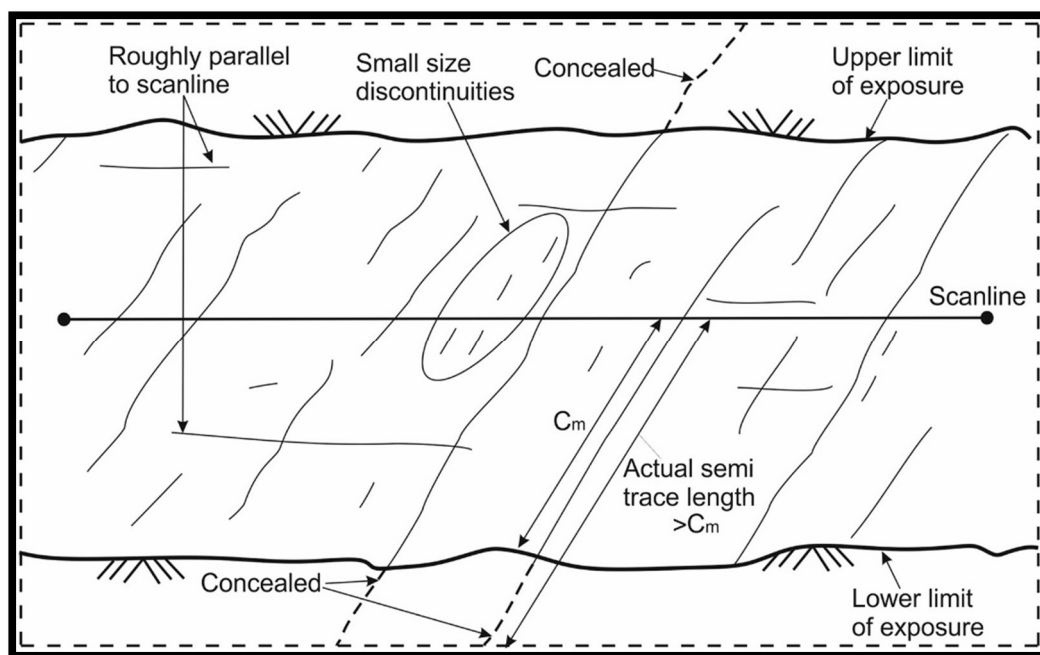
Σχήμα 3-3 Κριτήριο Mohr-Coulomb

3.5 Αντοχή ρηγματωμένης βραχομάζας

3.5.1 Ορισμός ασυνέχειας

Ως ασυνέχεια θεωρείται η οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στην συνέχεια της βραχομάζας ή κάθε επίπεδο αδυναμίας στην βραχομάζα και χαρακτηρίζεται από μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, αυτές που εντοπίζονται συστηματικά και αποτελούν συστήματα ασυνεχειών, καθώς και αυτές που δε συναντώνται συστηματικά, όπως τα ρήγματα.

Αναλόγως τις τεκτονικές διεργασίες που έχει υποστεί η βραχομάζα από την περίοδο σχηματισμού της έως τώρα από διεργασίες παραμορφωτικού ή διαρρηκτικού τύπου, συναντώνται τα ακόλουθα επίπεδα αδυναμίας, τα οποία αποτελούν και ασυνέχειες. Πρόκειται για τις διακλάσεις, τις ζώνες διάτμησης, τα επίπεδα σχιστότητας και τέλος, τα επίπεδα στρώσης.



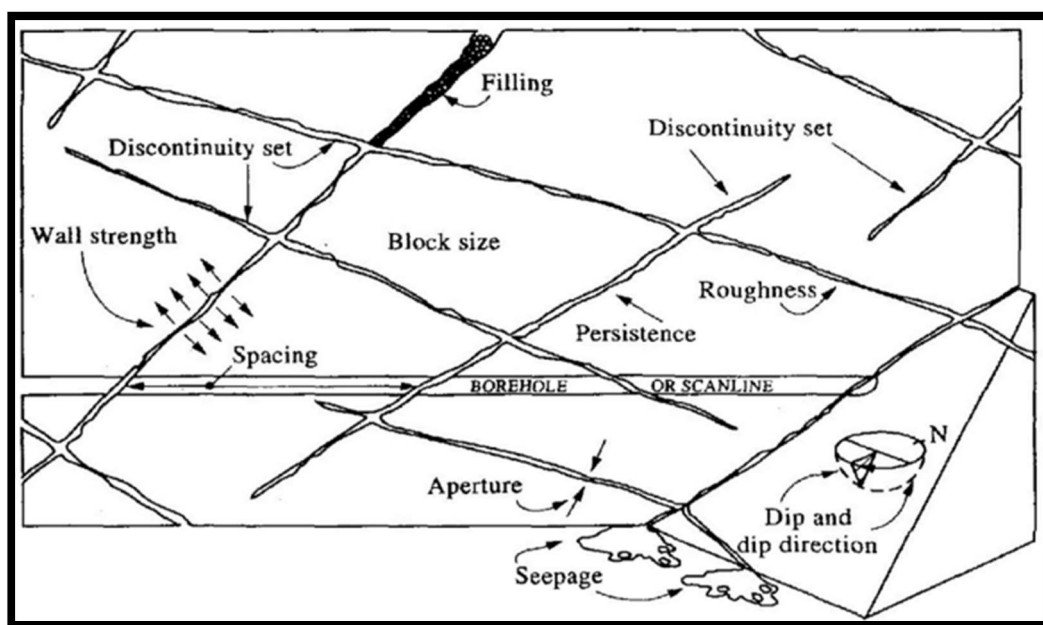
Σχήμα 3-4 Γραμμική απεικόνιση ειδών ασυνεχειών (Latham, Van Meulen, & Dupray, 2006)

3.6 Γεωτεχνικά κριτήρια ταξινόμησης ασυνεχειών

Οι παράμετροι για να γίνει ταξινόμηση στις ασυνέχειες γίνεται με γεωτεχνικά κριτήρια, όπως προσδιορίστηκαν από την Διεθνή Ένωση Βραχομηχανικής (ISRM, 1975) και είναι τα εξής:

1. Ο προσανατολισμός τους, δηλαδή η γεωμετρία στο χώρο. Επειδή θεωρούνται ως επίπεδες επιφάνειες και μπορούν να περιγραφούν στον χώρο με γωνίες, χρησιμοποιείται η παράταξη τους, η γωνία κλίσης τους και η κατεύθυνση της γωνίας κλίσης τους.
2. Η συνέχεια, δηλαδή την επιφάνεια που καταλαμβάνει στην βραχομάζα και πόσο εξαπλώνεται μέσα σε αυτή.
3. Το άνοιγμα της, που είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο τεμαχίων πετρώματος που τέμνει η ασυνέχεια.
4. Η απόσταση, η οποία καθορίζει το μέγεθος των τεμαχίων που χωρίζεται η βραχομάζα.
5. Η τραχύτητα, που είναι η απόκλιση από την λεία επιφάνεια, καθώς μια ασυνέχεια πολύ δύσκολα θα είναι λεία, αντιθέτως θα είναι εμφανής μία κυμάτωση.

6. Η αντοχή τοιχωμάτων, η οποία συνήθως εξαρτάται από τον βαθμό που έχει αποσαθρωθεί η βραχομάζα λόγω χημικών (νερό) και θερμοκρασιακών μεταβολών (πάγος).
7. Το υλικό πλήρωσης, το οποίο είναι εδαφικό υλικό διάφορων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων που προέρχεται είτε από το μητρικό πέτρωμα, είτε από μεταφορά γειτονικών. Η πλήρωση με το υλικό αφενός διαχωρίζει τα τοιχώματα μιας ασυνέχειας και αφετέρου καθορίζει την διατμητική αντοχή.



Σχήμα 3-5 Γεωτεχνικά κριτήρια για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών (Hudson & Harrison, 1997)

3.7 Ασυνέχειες και πέτρωμα

Σε ένα υπόγειο τεχνικό έργο οι ασυνέχειες που υπάρχουν δημιουργούν προβλήματα τα οποία αφορούν κυρίως την ευστάθεια του έργου. Αυτό συμβαίνει διότι οι ασυνέχειες, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υποβαθμίζουν την ποιότητα του πετρώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα τεχνικό έργο το οποίο, καθώς αναπτύσσεται σε πέτρωμα που περιβάλλεται και περιέχει ασυνέχειες, πρέπει σε κάθε βήμα του να αξιολογείται, να παρακολουθούνται οι μετατοπίσεις του, όπως επίσης εάν είναι εφικτό, να γίνει μια προσομοίωση του ώστε να προβλεφθεί κατά την προχώρησή του οποιαδήποτε αστοχία.

Φυσικά αυτό είναι αδύνατον να συμβεί στις περισσότερες τεχνικές εταιρείες, καθότι δεν διαθέτουν το απαραίτητο λογισμικό, ενώ παράλληλα το ενδιαφέρον τους συγκεντρώνεται στο τεχνικό κομμάτι των έργων και όχι σε αυτό της προσομοίωσης. Σε αυτή την περίπτωση τα case study τα οποία μελετώνται από διπλωματικές εργασίες, βοηθάνε

στην κατανόηση γεγονότων τα οποία ενδεχομένως θα συμβούν σε κάποιο στάδιο του τεχνικού έργου.

3.8 Παράμετροι- ιδιότητες ασυνεχειών μοντέλου

Στον Πίνακα 3-2 παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις ασυνέχειες στο μοντέλο Mohr – Coulomb. Οι τιμές έχουν παρθεί από βιβλιογραφία που αφορά ομοιογενές ισότροπο γεωθλικό, όπως από τους *(Wanga, Xibing, & Shanyong, 2018)*.

Πίνακας 3-2 ιδιότητες ασυνεχειών

Παράμετροι Ασυνεχειών	Τιμές
Πυκνότητα ρ	$2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Μέτρο ακαμψίας (stiffness normal) n	$10,2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
Συντελεστής διάτμησης (stiffness shear) G	$3,8 \cdot 10^3 \text{ Pa}$
Τριβή ϕ	30°
Συνοχή c	$5 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
Poisson ν	0,25
Μέτρο του Young E	$1,3 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

4 Αριθμητικές μέθοδοι

4.1 Γενικά

Στην βραχομηχανική για την επίλυση προβλημάτων στις τρεις διαστάσεις, όπως και για την μοντελοποίηση διάφορων μη γραμμικών προβλημάτων, χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές μέθοδοι. Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι πανίσχυρα εργαλεία επίλυσης τέτοιων προβλημάτων, καθώς δύνανται να λύσουν μεγάλα συστήματα εξισώσεων με αναλυτικό τρόπο.

Σαν μέθοδοι, παρέχουν αλγόριθμους για τον αριθμητικό υπολογισμό των ζητούμενων. Επίσης προσεγγίζουν την άγνωστη πραγματική τιμή, το εύρος της περιοχής και ακόμη, το εύρος γύρω από την προσέγγιση. Το εύρος μπορεί να μειωθεί όσο απαιτεί η υπόθεση που τρέχει, αλλά δεν μπορεί να γίνει μηδέν.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες είναι οι εξής:

1. Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method)
2. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)
3. Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method)
4. Μέθοδος των Διακριτών Στοιχείων (Distinct Element Method)

Ωστόσο το ενδιαφέρον στην παρούσα διπλωματική εργασία εντοπίζεται στις Μεθόδους Πεπερασμένων Διαφορών οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στα επόμενα υποκεφάλαια. Η βασική διαφοροποίηση των μεθόδων έγκειται στη διακριτοποίηση που επιτυγχάνει η καθεμία στο μέσο που εφαρμόζεται. Συνοπτικά, η Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (ΜΠΔ) εισάγει διακριτά στοιχεία που αντικαθιστούν τα συνεχή και στους κόμβους τους επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας. Ακολούθως, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) χωρίζει σε σχήματα το μέσο και τα άγνωστα μεγέθη της διαφορικής εξίσωσης προσεγγίζονται μέσω των συναρτήσεων παρεμβολής. Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ) διακριτοποιεί το σύνορο του μέσου σε επιμέρους κομμάτια τα οποία τα προσεγγίζει μέσω συναρτήσεων παρεμβολής.

4.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method)

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται για επίλυση διαφορικών εξισώσεων, που δεν μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Επιτυγχάνει την προσέγγιση των μερικών παραγώγων που αποτελούν μια διαφορική εξίσωση από διηρημένες πεπερασμένες διαφορές (Αβδελάς & Σίμος, 2004). Οι πεπερασμένες διαφορές είναι τεχνική αριθμητικής επίλυσης για διαφορικές εξισώσεις που είναι γνωστές, είτε οι αρχικές τιμές, είτε οι συνοριακές συνθήκες είτε και οι δύο.

Είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης από μηχανικούς και αυτό συμβαίνει διότι, μπορούν να περιγράψουν και να επιλύσουν προβλήματα, τα οποία είναι δύσκολο έως αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Η αναλυτική επίλυση προϋποθέτει την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα υπολογίσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του προς ανάλυση σώματος. Ωστόσο, εάν σε ένα πρόβλημα εμπεριέχονται συνοριακές συνθήκες και αρχικές τιμές και δύσκολη γεωμετρία, είναι φυσικά δύσκολο να επιλυθεί αναλυτικά. Η μόνη δυνατή λύση σε αυτή την περίπτωση είναι η χρήση αριθμητικών μεθόδων

Η επίλυση διαφορικών εξισώσεων προϋποθέτει την προσέγγιση της εξαρτημένης μεταβλητής, όπως και των παραγώγων της στους κόμβους. Πρόκειται για τις εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες υπολογίζονται με διάφορους τρόπους. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτές που συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται.

Κατά την ανάπτυξη με την σειρά Taylor, θεωρείται μία συνάρτηση η οποία είναι αναλυτική και αναπτύσσεται σε σειρά Taylor. Στην συνέχεια, επιλύεται ως προς την πρώτη παράγωγο και αφού απαλειφθούν της ίδιας τάξης η μεγαλύτερης όροι, προκύπτει η τελική σχέση. Ανάλογα με τον τελικό τύπο ονομάζεται, είτε πρόδρομη, είτε ανάδρομη, είτε κεντρώα έκφραση πεπερασμένων διαφορών για την 1^η τάξη και την 1^η παράγωγο, 2^η τάξη και την 1^η παράγωγο και ούτω κάθε εξής.

Κατά τον υπολογισμό με πολώνυμο παρεμβολής, υπολογίζονται οι συντελεστές της εξαρτημένης μεταβλητής σε συγκεκριμένα και επιλεγμένα σημεία. Για να γίνει ο υπολογισμός των αγνώστων αυτών συντελεστών, χρειάζονται τρία γειτονικά σημεία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην επίλυση.

4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)

Ο τρόπος λειτουργίας της συγκεκριμένη μεθόδου ταυτίζεται με αυτόν της μητρικής ανάλυσης, προσομοιώνεται το μέσο που πρόκειται να επιλυθεί σε στοιχεία που συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Στην συνέχεια επιλέγονται συναρτήσεις που θα εκφράσουν την λύση του προβλήματος. Το επόμενο βήμα είναι να παραχθεί το μητρώο ακαμψίας μέσω των εξισώσεων ισορροπίας. Τα επιμέρους μητρώα ακαμψίας που προέκυψαν από τα διάφορα στοιχεία, συνθέτουν ένα συνολικό μητρώο ακαμψίας που τα περιλαμβάνει όλα. Πρέπει να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες και το συμβιβαστό των παραμορφώσεων, ώστε να μπορέσει να επιλυθεί το πρόβλημα.

Έτσι, το σύστημα φτάνει στο σημείο να επιλυθεί ως προς κάποιο άγνωστο μέγεθος και από τις σχέσεις που το συνδέουν με τα υπόλοιπα να ευρεθούν και τα υπόλοιπα. Παραδείγματος χάριν, αν υπολογισθούν οι μετατοπίσεις, θα ευρεθούν και οι τάσεις αλλά και οι παραμορφώσεις. Επίσης, πρέπει σε όλο το μέσο που αποτελείται από διακριτά στοιχεία να ισχύουν και οι νόμοι της μηχανικής όπως:

1. Η ισορροπία των δυνάμεων
2. Η ισορροπία των ροπών
3. Το συμβιβαστό των παραμορφώσεων
4. Το συμβιβαστό των μετατοπίσεων
5. Το συμβιβαστό των ροπών

Τέλος, το κάθε ένα στοιχείο του μέσου συνδέεται με κόμβους (nodes) με τα γειτονικά στοιχεία του και αφού ασκηθούν οι δυνάμεις και οι ροπές, κατά αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των αντίστοιχων μετατοπίσεων.

Ως μητρώο ακαμψίας, εννοείται ο πίνακας ο οποίος συνδέει τις ανεξάρτητες μετατοπίσεις των κόμβων και των δυνάμεων που εφαρμόζονται στα ίδια σημεία. Προκύπτει ένας τελικός πίνακας μέσω της σύνθεσης των ακαμψιών, που είναι το άθροισμα των επιμέρους ακαμψιών αναγόμενα στην ίδια τάξη με του γενικού μητρώου.

Η μέθοδος στα κομβικά σημεία υπολογίζει την άγνωστη μεταβλητή χρησιμοποιώντας κάποιες εξισώσεις, που προκύπτουν από τα δεδομένα του προβλήματος και έχουν σχέση με διάφορες παραμέτρους του προβλήματος, όπως οι ιδιότητες του υλικού κ.α.

Οι εξισώσεις αυτές είναι ένα γραμμικό σύστημα $[n * n]$, όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας. Οι εξισώσεις λοιπόν, είναι της μορφής:

$$[K] * \{U\} = \{F\}$$

Όπου:

1. K : είναι το μητρώο ακαμψίας (stiffness matrix)
2. U : το άγνωστο διάνυσμα των μετατοπίσεων
3. F : το γνωστό διάνυσμα των δυνάμεων

Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται το εντατικό πεδίο γύρω από τετραγωνικούς στύλους. Έτσι, το διάνυσμα των άγνωστων μετατοπίσεων θα αφορά τις μετατοπίσεις των κόμβων.

Βήματα μεθόδου:

Σημαντικά για την εφαρμογή κάθε μεθόδου είναι τα βήματα της μεθόδου, καθώς αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την ομαλή έκβαση της υπολογιστικής διαδικασίας, όπως επίσης και για τυχόν σφάλματα που μπορούν να αποφευχθούν.

Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι τα εξής:

1. Διακριτοποίηση του προβλήματος, δηλαδή διαμοιρασμός του συνολικού σχήματος σε μικρότερα σχήματα και πιο διαχειρίσιμα.
2. Υπολογισμός των:
 1. μητρώου ακαμψίας,
 2. διανυσμάτων των μετατοπίσεων.
3. Σχηματισμός των τελικών εξισώσεων που περιγράφουν το υπό επεξεργασία μοντέλο.
4. Επίλυση με την χρήση συνοριακών συνθηκών των εξισώσεων για να βρεθούν οι άγνωστες τιμές.
5. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

4.4 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method)

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων βασίζεται στην επίλυση της εξίσωσης στο σύνορο του σχήματος που εξετάζεται. Το γεγονός λοιπόν ότι, η διακριτοποίηση γίνεται στα σύνορα του σχήματος επωφελεί στην μείωση της τάξης του προβλήματος και αυτό διότι, στις δύο διαστάσεις με την ΜΣΣ χρειάζονται γραμμικά στοιχεία, ενώ στις τρεις διαστάσεις χρειάζονται τριγωνικά ή τετραγωνικά στοιχεία.

Ακόμη, όταν δεν ακολουθείται η γραμμική συμπεριφορά στα υλικά, πρέπει να επιτευχθεί επιπλέον διακριτοποίηση. Ο υπολογισμός των εξισώσεων πραγματοποιείται για το κέντρο βάρους κάθε συνοριακού στοιχείου και στην συνέχεια, με τις κατάλληλες σχέσεις, υπολογίζονται στα εσωτερικά σημεία του μέσου.

Η εφαρμογή των συνοριακών στοιχείων έχει ως σκοπό, αφενός να δημιουργηθούν δυνάμεις στο μοντέλο που μελετάται και αφετέρου, να επιβληθούν περιορισμοί ώστε το μοντέλο να παραμείνει σε ισορροπία.

Για την επίλυση των συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε ολοκληρώματα. Τα ολοκληρώματα εφαρμόζονται στα στοιχεία που είναι προς εξέταση. Εφόσον ικανοποιούνται οι συνοριακές συνθήκες, προκύπτει ένα σύνολο από γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις στο οποίο εφαρμόζεται μοναδική λύση. Κατ' αυτό τον τρόπο, αφού βρεθούν οι τιμές των μεταβλητών στο σύνορο του χωρίου που μελετάται, μπορεί να βρεθεί η τιμή σε οποιοδήποτε σημείο που έχει ενδιαφέρον.

Στην βραχομάζα πολλές φορές δημιουργούνται ασυνέχειες, ρήγματα, και γενικά μπορεί να είναι διακεκομμένη η συνέχεια της. Έτσι δημιουργούνται πολλά διακριτά τεμάχια, τα οποία μπορούν να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, να δεχθούν παραμορφώσεις, ακόμη και να περιστραφούν ή να μετατοπιστούν.

Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων βασίζεται στην εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα η οποία εφαρμόζεται στα σωματίδια, καθώς και σε μία καταστατική εξίσωση η οποία είναι, είτε δύναμης είτε μετατόπισης, και επιβάλλεται στις επαφές. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της περιστροφικής και της μεταφορικής κίνησης του εκάστοτε σωματιδίου. Το κάθε σωματίδιο επηρεάζεται από τα διπλανά του σωματίδια, από τις βαρυτικές δυνάμεις που του ασκούνται, καθώς και από τις εξωτερικές δυνάμεις που δέχεται.

Τα τρία βασικά βήματα της μεθόδου, τα οποία από την διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται και ως ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθιστώντας την κατάλληλη για χρήση στην μοντελοποίηση πετρωμάτων με ασυνέχειες είναι τα εξής:

- Σαν μέθοδος χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων ο οποίος αναφέρεται με τον όρο "explicit". Ο τελευταίος επιτρέπει να δεχθεί το σώμα μεγάλες μετατοπίσεις αλλά και περιστροφές έως ότου αστοχήσει.
- Προσομοιώνει το πέτρωμα ως συγκεντρωμένα διακριτά τεμάχια τα οποία επιδρούν το ένα με το άλλο μέσω των πλευρών με τις οποίες το ένα έρχεται σε επαφή με το άλλο, αλλά και τις γωνίες που σχηματίζουν μεταξύ τους.
- Οι μηχανικές διακοπές της βραχομάζας θεωρούνται ως αλληλεπιδράσεις των συνόρων μεταξύ των διακριτών τεμαχίων.

5 Λογισμικό προσομοίωσης - Παρουσίαση αποτελεσμάτων

5.1 Γενικά για το FLAC^{3D}

Λόγω της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα επιλύονται με αριθμητικές αναλύσεις. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επίλυσης διότι, προσφέρουν μεγάλη αξιοπιστία και ταχύτητα. Οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν την δυνατότητα να δημιουργηθεί το κατάλληλο προς μελέτη μοντέλο, όπως και επίσης να ληφθούν υπόψιν παράγοντες που αφορούν το σύνολο των δομικών χαρακτηριστικών του πετρώματος.

Το FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), της εταιρίας Itasca Consulting Group Inc, είναι ένα λογισμικό αριθμητικής μοντελοποίησης και ανάλυσης γεωτεχνικών προβλημάτων. Η λειτουργία του βασίζεται στην μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών οι οποίες αναπτύσσονται κατά Lagrange. Κατ' αυτή την μέθοδο, το πρόγραμμα θεωρεί το πέτρωμα ως ισοδύναμο συνεχές μέσο και ενσωματώνει σε αυτό τις ιδιότητες των ασυνεχειών.

Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα δημιουργείται πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών, το οποίο αποτελείται από τρισδιάστατα στοιχεία. Στην συνέχεια, καθορίζονται οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των υλικών που θα τεθούν προς μελέτη, των συνοριακών συνθηκών που θα χρησιμοποιηθούν, όπως επίσης και της αρχικής εντατικής κατάστασης, αλλά και της παραμορφωσιακής κατάστασης της κατασκευής.

Η επεξεργασία στο συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει ευελιξία χρήσης στον χρήστη, όπως να εισάγει τις εντολές, είτε στην γραμμή εντολών, είτε μέσω αρχείου κειμένου. Στην παρούσα διπλωματική έγινε χρήση αρχείου κειμένου το οποίο περιέχει τις άνωθεν παραμέτρους.

Στην συνέχεια, ο κώδικας επίλυσης του προβλήματος, που όπως αναφέρθηκε βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, επιλύει το μοντέλο για τις παραμέτρους που έχουν εισαχθεί. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, είτε με αρχεία τύπου ASCII (American Standard Code for Information Interchange) όπου μπορεί ο χρήστης να τα χρησιμοποιήσει σε άλλα συστήματα λογισμικού για επεξεργασία, είτε μέσω γραφικών απεικονίσεων που προσφέρει το λογισμικό.

5.2 Μοντέλο Προσομοίωσης

Στην παρούσα διπλωματική δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο μοντέλο από τα υπάρχοντα του λογισμικού, αλλά δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης το οποίο χωρίστηκε σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα δημιουργήθηκε ένα μοντέλο το οποίο αποτελούσε το προς μελέτη πέτρωμα, χωρίς ωστόσο να έχει υποστεί την εκσκαφή και να έχει δημιουργηθεί ο στύλος.

Στην συνέχεια, στο δεύτερο τμήμα δημιουργήθηκε η εκσκαφή και ο στύλος που μελετήθηκε. Ο λόγος που χωρίστηκαν τα δύο μοντέλα είναι το γεγονός ότι, στο πρώτο εφαρμόστηκε ελαστικό κριτήριο και στο δεύτερο κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb, το οποίο εφαρμόστηκε μόνο στον στύλο ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του με την ύπαρξη των ασυνεχειών.

Στο πρώτο μέρος, το μοντέλο επιλύθηκε εφαρμόζοντάς του ελαστικό μοντέλο επίλυσης. Έτσι, δημιουργήθηκαν δεδομένα τα οποία αποτέλεσαν τα πρωταρχικά. Με αυτά τα δεδομένα μπόρεσαν να ελεγχθούν οι παραγόμενες τιμές του ελαστικού μοντέλου έτσι επαληθεύτηκε ότι το μοντέλο επιλύεται σωστά αλλά και ότι οι συνοριακές συνθήκες είναι σωστές.

Αυτό συνέβη καθώς στο δεύτερο μέρος, κατά την επίλυση εφαρμόστηκε το μοντέλο Mohr – Coulomb όπου πλέον δεν υπήρχαν ελαστικές μετατοπίσεις αλλά αντιθέτως φαινόμενα διαταραχής και ρωγμάτοσης της βραχομάζας όπου οδηγεί και στην αστοχία της και το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ελαστικό απλά άλλαξε το μοντέλο που εφαρμόζοταν όπως επίσης δημιουργήθηκαν οι εκσκαφές και οι ιδιότητες των ασυνεχειών οι οποίες έχουν περιγραφή σε προηγούμενο κεφάλαιο.

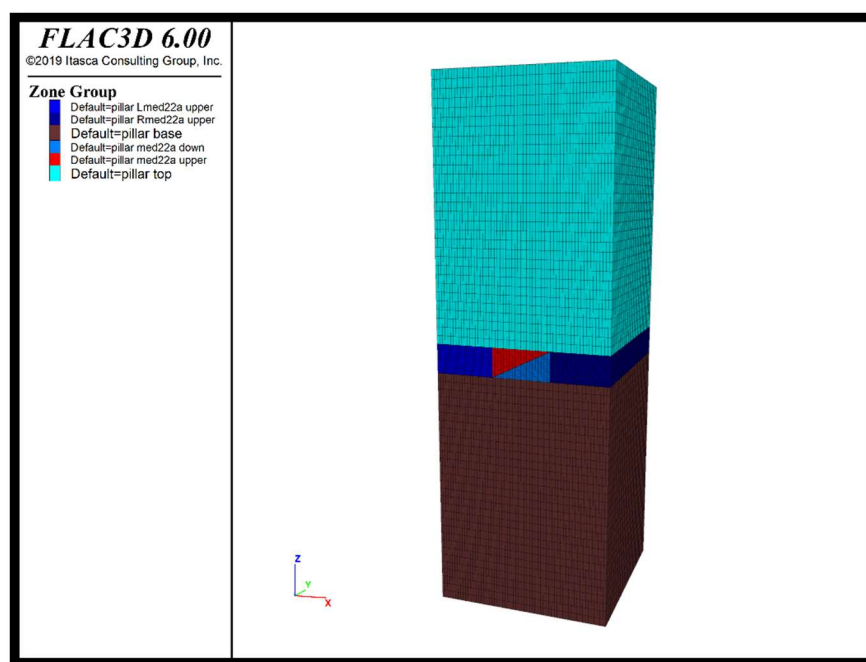
Τέλος εφαρμόστηκαν συνοριακές συνθήκες στήριξης, οι οποίες δεν επιτρέπουν την κίνηση του στερεού σώματος, δηλαδή τις μετακινήσεις και τις περιστροφές. Χωρίς τις σωστές συνοριακές συνθήκες κατά την επίλυση του ελαστικού μοντέλου, τα αποτελέσματα θα ήταν ανακριβής λόγω της κίνησης του φυσικού σώματος και λόγω της μαθηματικής επίλυσης του, όπου δεν θα ήταν σωστή.

Οι συνοριακές συνθήκες της παρούσας διπλωματικής που εφαρμόστηκαν στο αρχικό μοντέλο ήταν μηδενικές σε όλες τις συνιστώσες των τάσεων και των περιστροφών. Εισήχθησαν μόνο οι τιμές των κύριων τάσεων σ_{11} - σ_{22} - σ_{33} όπως υπολογίστηκαν και παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3-1.

5.3 Γεωμετρικό Μοντέλο

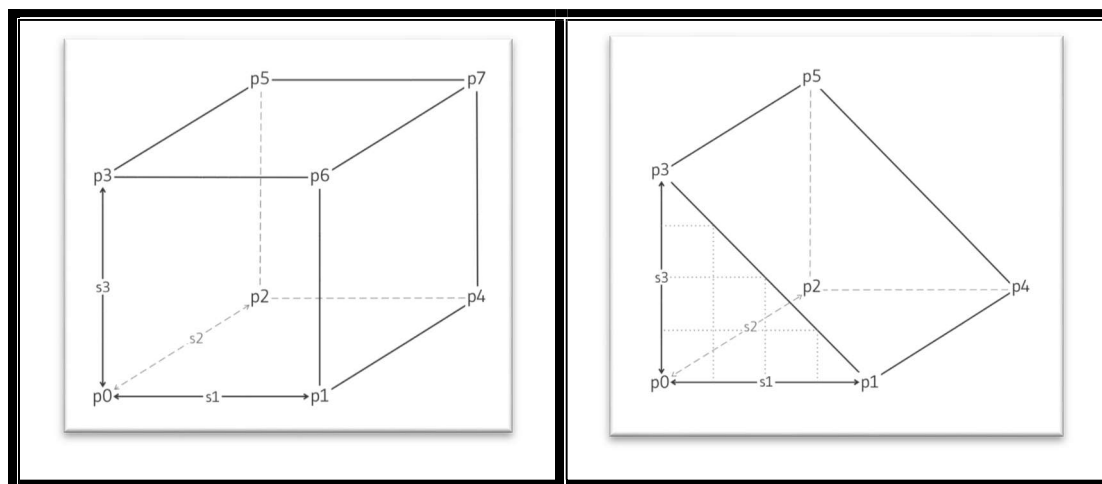
Το γεωμετρικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για να γίνει η μελέτη είναι τετραγωνικής διατομής με διαστάσεις μήκους και πλάτους 30m x 30m και με ύψος 90m όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1 και έχει θεωρηθεί ότι αποτελείται από ισότροπο γεωυλικό. Επιλέχθηκε αυτή η διατομή ώστε να δημιουργηθεί ένας στύλος, τετραγωνικής διατομής. Το μοντέλο αποτελείται από επιμέρους γεωμετρικά στοιχεία τα οποία δημιουργούν το μοντέλο του Σχήματος 5-2.

5.4 Γεωμετρικό Μοντέλο



Σχήμα 5-1 Πρόσωση της προς μελέτης γεωμετρίας

Τα γεωμετρικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή είναι brick και unifrom-wedge.

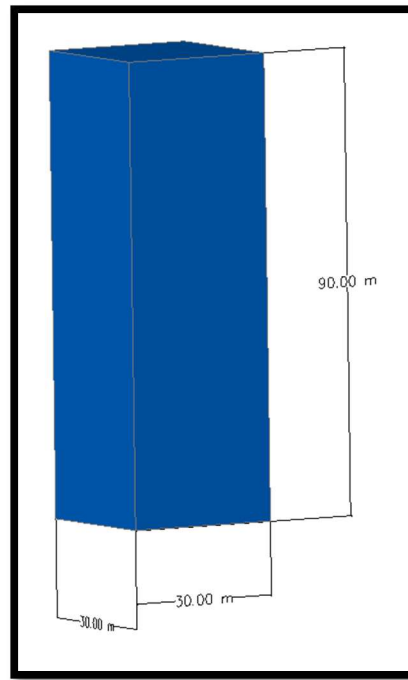


Σχήμα 5-2 Γεωμετρικά στοιχεία μοντέλου αριστερά brick και δεξιά uniform-wedge (πηγή: *FLAC^{3D} manual*)

Ωστόσο ενδιαφέρον έχει η διαδικασία που δημιουργήθηκε το μοντέλο. Καθώς για να μπορέσει να επιλυθεί και να παρακαμφθεί ένα σφάλμα το οποίο δεν επέτρεπε στην ολοκλήρωση της προσομοίωσης, έπρεπε το στοιχείο uniform-wedge να περιστραφεί αλλά να έχει την ίδια μορφή όπως στον Σχήμα 5-2. Έτσι τα point που το ορίζουν άλλαξαν θέσεις στον χώρο ώστε κατά την δημιουργία των ασυνεχειών να συμπίπτουν οι κόμβοι με του σχήματος στο οποίο εδράζεται. Αυτό κατ' επέκταση έγινε σαν διαδικασία και στα υπόλοιπα γεωμετρικά σημεία που έπρεπε να έχουν αντίθετη φορά από αυτή του Σχήματος 5-2.

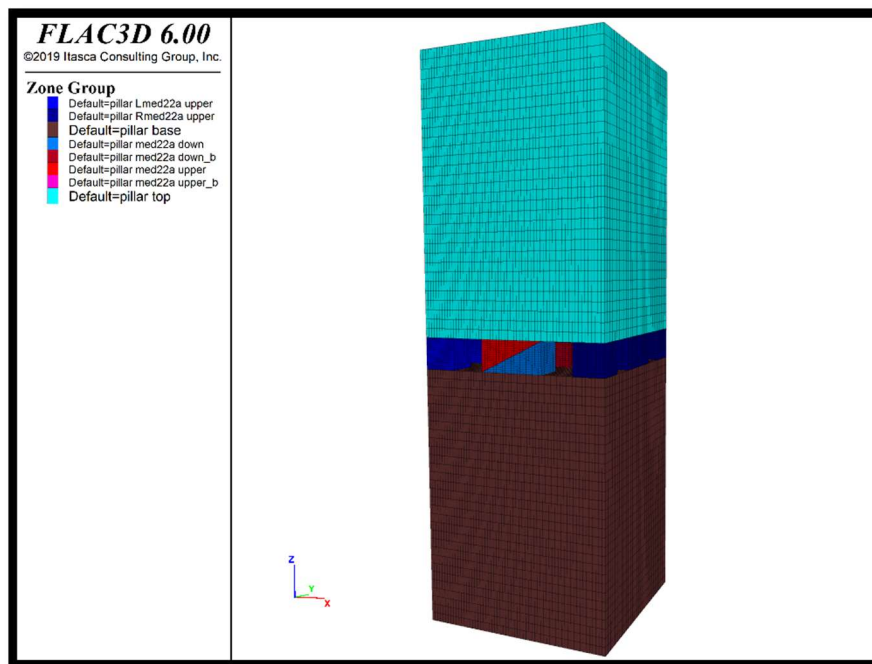
Η βάση (pillar base) του μοντέλου όπως και η κορυφή (pillar top) δημιουργήθηκαν από γεωμετρικό στοιχείο τύπου brick με διακριτοποίηση 60 κόμβων κατά τον άξονα x, 30 κόμβων κατά τον άξονα y και 30 κόμβων κατά τον άξονα z. Οι διαστάσεις των pillar top και του pillar base είναι αντίστοιχα 44 m ύψος, 30 m πλάτος και 30 m μήκος και 41 m ύψος, 30 m πλάτος και 30 m μήκος. Το συνολικό ύψος είναι 90 m, το πλάτος 30 m και το μήκος 30 m όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3.

Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, οι τιμές τάσεων έχουν υπολογιστεί για βάθος 2000 m, υποθέτοντας ότι το case study λάμβανε χώρα σε αυτό το βάθος με σκοπό να επέλθει αστοχία και να μελετηθούν τα αποτελέσματα.



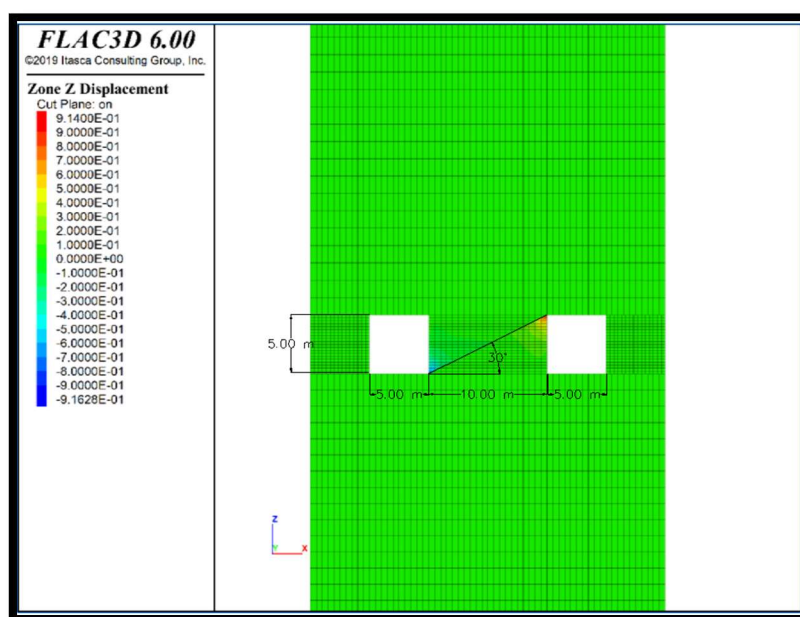
Σχήμα 5-3 Διαστάσεις γεωμετρικού μοντέλου

Το ενδιαμέσο τμήμα αποτελείται από τα ίδια γεωμετρικά στοιχεία. Ωστόσο δημιουργήθηκε πιο πυκνή διακριτοποίηση κατά τον άξονα y, διότι κατά την προσομοίωση να υπάρξει καλύτερη καταγραφή των δεδομένων που προκύπτουν. Εφαρμόστηκε και εδώ ακριβώς η ίδια διαδικασία στροφής των σημείων, ώστε να συμπίπτουν με τα αντίστοιχα των blocks που εφαρμόζουν ακριβώς επάνω.

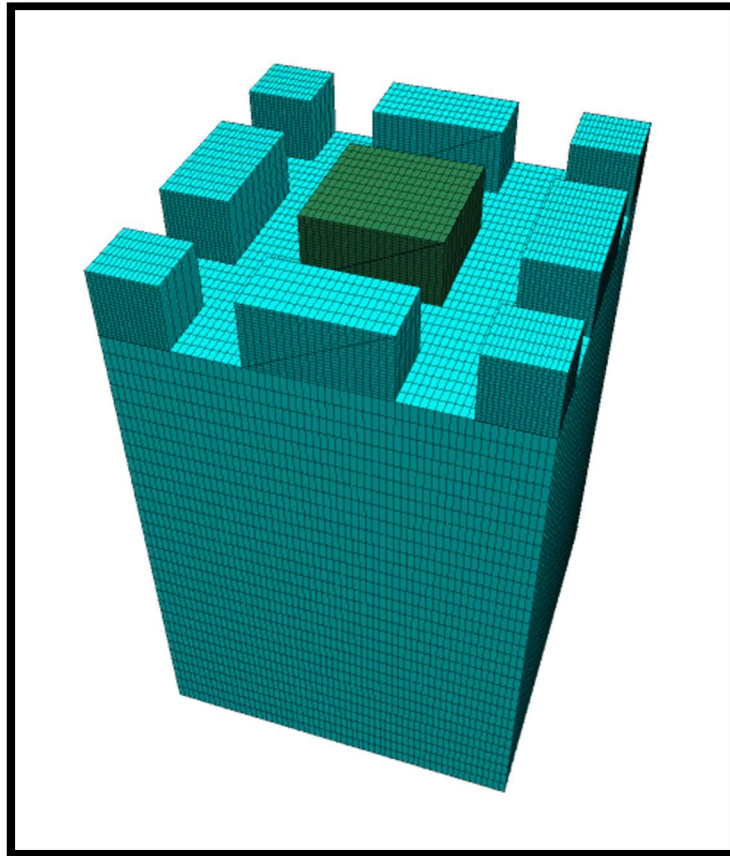


Σχήμα 5-4 Μοντέλο θαλάμων και στύλων

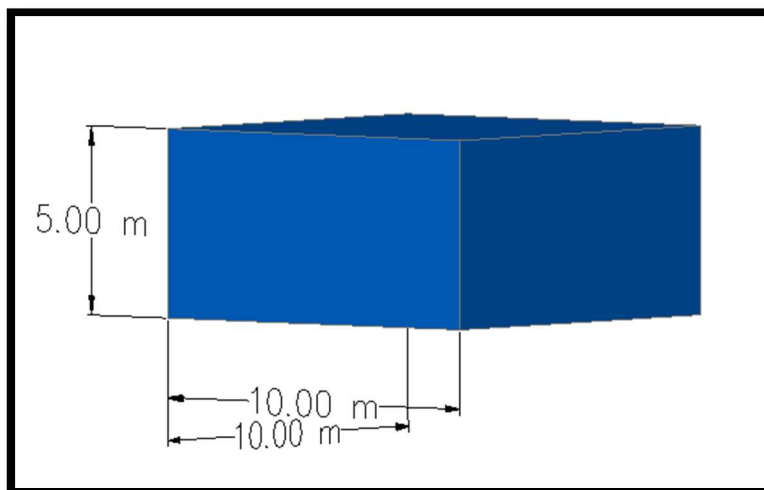
Οι διαστάσεις κατά τον άξονα x από αριστερά προς τα δεξιά όπως φαίνεται και στους άξονες κάτω δεξιά στο Σχήμα 5-5 είναι στύλος μήκους και πλάτους 5 m, θάλαμος μήκους 5 m, στύλος μήκους 10 m και πλάτους 10 m και στο συγκεκριμένο σχήμα και η γωνία που σχηματίζει η ασυνέχεια των 30° . Στο μέσον του γεωμετρικού μοντέλου θα δημιουργηθεί το σύστημα θαλάμων και στύλων που θα μελετηθεί ο κεντρικός στύλος της εκμετάλλευσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-6. Τέλος ο στύλος, έχει διαστάσεις πλάτος 10m, ύψος 5m και μήκος 10m όπως φαίνεται στο σχήμα 5-7. Ο στύλος έχει τις ίδιες διαστάσεις σε όλες τις επιλύσεις και επομένως δεν εισάγεται ξανά στο υπόλοιπο κείμενο.



Σχήμα 5-5 Διαστάσεις θαλάμων και στύλων



Σχήμα 5-6 Μοντέλο θαλάμων και στύλων τομή κατά τον άξονα y με διαφορετικό χρώμα ο στύλος που έχει την ασυνέχεια



Σχήμα 5-7 Διαστάσεις κεντρικού στύλου

5.5 Μηχανικές ιδιότητες μοντέλου

Για να υπάρξουν ρεαλιστικά αποτελέσματα στο $\text{FLAC}^{3\text{D}}$, πρέπει να εισαχθούν τιμές από μηχανικές παραμέτρους. Αυτό συμβαίνει διότι, με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις ώστε το υλικό που θα προσομοιωθεί να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Μερικές από τις μηχανικές ιδιότητες που εισήχθησαν, όπως προαναφέρθηκε, πηγάζουν από την δημοσίευση των (*Wanga, Xibing, & Shanyong, 2018*), ενώ άλλες από διεθνή βιβλιογραφία. Οι μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν ισότροπο ομοιογενές υλικό και είναι οι εξής:

Πίνακας 5-1 Παράμετροι ασυνεχειών που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

Γεωτεχνικοί παράμετροι		Τιμές
Συντελεστής συμπίεστότητας K		$9,9 \cdot 10^{10}$ Pa
Διατμητική τάση τ		$4,8 \cdot 10^{10}$ Pa
Πυκνότητα ρ		$2,7 \cdot 10^3$ t/m ³
Μέτρο ακαμψίας (stiffness normal) n		$10,2 \cdot 10^9$ Pa
Συντελεστής διάτμησης (stiffness shear) G		$3,8 \cdot 10^3$ Pa
Τριβή ϕ	Mohr Coulomb μοντέλο	30°
	Ασυνέχεια	0°- 10° -20°- 30° - 50°
Συνοχή c	Mohr Coulomb μοντέλο	$5 \cdot 10^9$ Pa
	Ασυνέχεια	$5 \cdot 10^4$ Pa
Poisson ν		0,25
Μέτρο του Young E		$1,3 \cdot 10^9$ Pa

1. Bulk modulus ή συντελεστής συμπίεστότητάς είναι ο λόγος της μεταβολής πίεσης που εφαρμόζεται σε ένα σώμα προς την μεταβολή του όγκου του σώματος $K = -V \frac{dP}{dV}$ (Pa)

2. Youngs Ratio ή μέτρο ελαστικότητας του Young εκφράζει την σκληρότητα ενός υλικού όταν συμπιέζεται ή εκτείνεται και είναι παρόμοια με την σκληρότητα του ελατηρίου.
3. Poisson εκφράζει τον λόγο της πλευρικής παραμόρφωσης του υλικού προς την μονοαξονική καταπόνηση. Οι τιμές Poisson που κυμαίνονται στα πετρώματα είναι της τάξεως 0,15-0,25 (Fjaer et al, 2008).
4. Density ή πυκνότητα είναι ο λόγος της συνολικής μάζας του σώματος προς τον συνολικό όγκο του σώματος και εκφράζεται ως g/cm^3 ή t/m^3 .
5. Stiffness – normal ή μέτρο διατμητικής ελαστικότητας ή μέτρο δυσκαμψίας, ονομάζεται ο λόγος της διατμητικής συνιστώσας της τάσης προς την διατμητική παραμόρφωση και ορίζεται από την σχέση $n = \frac{p_{12}}{e_{12}}$.
6. Stiffness – shear ή συντελεστής διάτμησης, ονομάζεται ο λόγος της διατμητικής τάσης προς την διατμητική παραμόρφωση και ορίζεται από την σχέση $G = \frac{F \cdot l}{A \cdot \Delta x}$.
7. Friction angle ή γωνία τριβής είναι η γωνία που σχηματίζουν τα άτομα, ή οι κόκκοι του πετρώματος μεταξύ τους. Συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ϕ .
8. Cohesion ή συνοχή είναι η ιδιότητα του υλικού να ανθίσταται σε διατμητικές δυνάμεις.

5.6 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

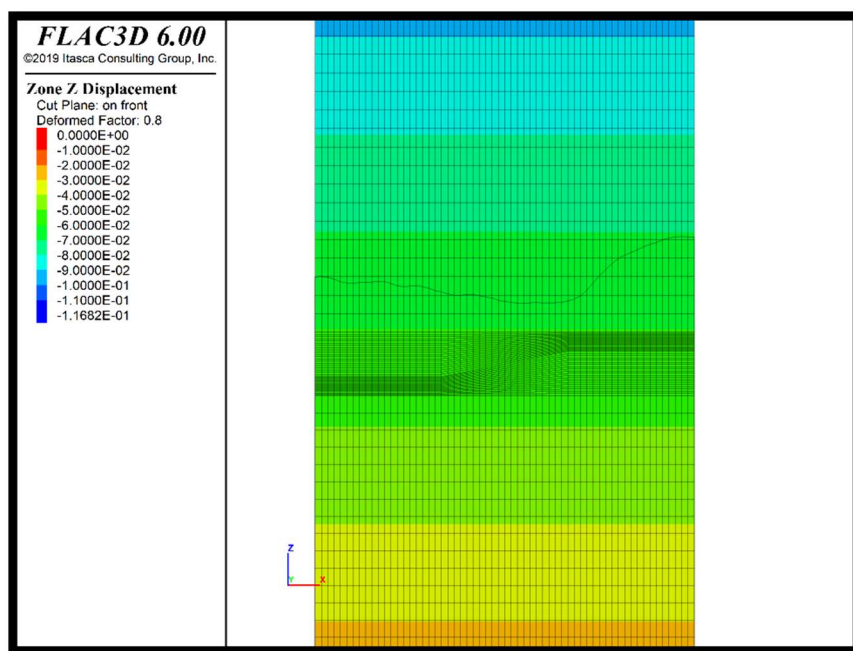
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Θα παρουσιαστούν οι εξής περιπτώσεις: ανάπτυξη της ασυνέχειας σε γωνία 30, 60, 90 μοιρών και ένα σύστημα ασυνεχειών αποτελούμενο από δύο ασυνέχειες, οι οποίες αναπτύσσονται στον κεντρικό στύλο υπό διαφορετικές κατευθύνσεις. Η περίπτωση των 90 μοιρών αφορούν ανάπτυξη της ασυνέχειας στο 1 μέτρο από την αρχή του στύλου και μελετάται η αξονική φόρτιση του.

Τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που προτείνονται θα αναφερθούν εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο. Παρουσιάζονται στην συνέχεια τα αποτελέσματα, με τα οποία προ-

κύπτουν συμπεράσματα για την επίλυση της συγκεκριμένης διπλωματικής. Θα παρουσιαστούν διαγράμματα μετατοπίσεων, διαγράμματα διανυσμάτων μετατοπίσεων και τάσεων.

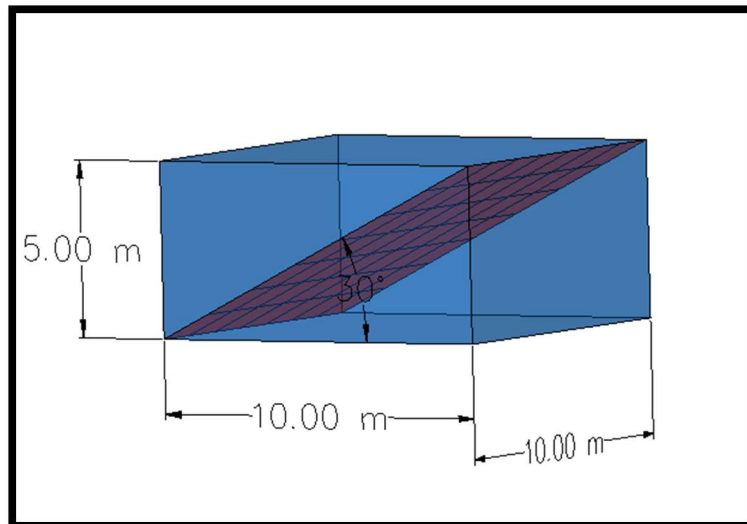
➤ Αποτελέσματα για ανάπτυξη ασυνέχειας 30°

Στο αρχικό μοντέλο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-8, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις δεν δείχνουν τεράστιες παραμορφώσεις όπως και οι κατακόρυφες τάσεις στο Σχήμα 5-9 πλησιάζουν τις τιμές που έχουν δοθεί για αρχικές τάσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι είναι ελαστικό μοντέλο και οι παραμορφώσεις δεν είναι μόνιμες. Επειδή και οι υπόλοιπες επιλύσεις των ελαστικών μοντέλων παρουσιάζουν τα ίδια αποτελέσματα δεν εισάγονται ξανά στο κείμενο.

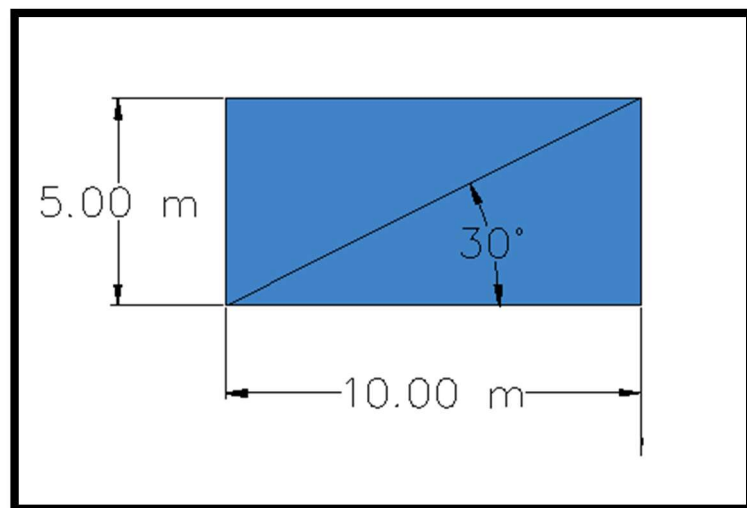


Σχήμα 5-8 Αρχικό μοντέλο 30° μοιρών μετατοπίσεις κατά τον άξονα z

Στο ακόλουθο Σχήμα 5-9 διακρίνεται η θέση ανάπτυξης της ασυνέχειας επί του στύλου. Αναπτύσσεται σε γωνία 30° εντός του στύλου. Τέλος στο Σχήμα 5-10 διακρίνεται σε πρόσοψη της υπό μελέτη περίπτωσης.

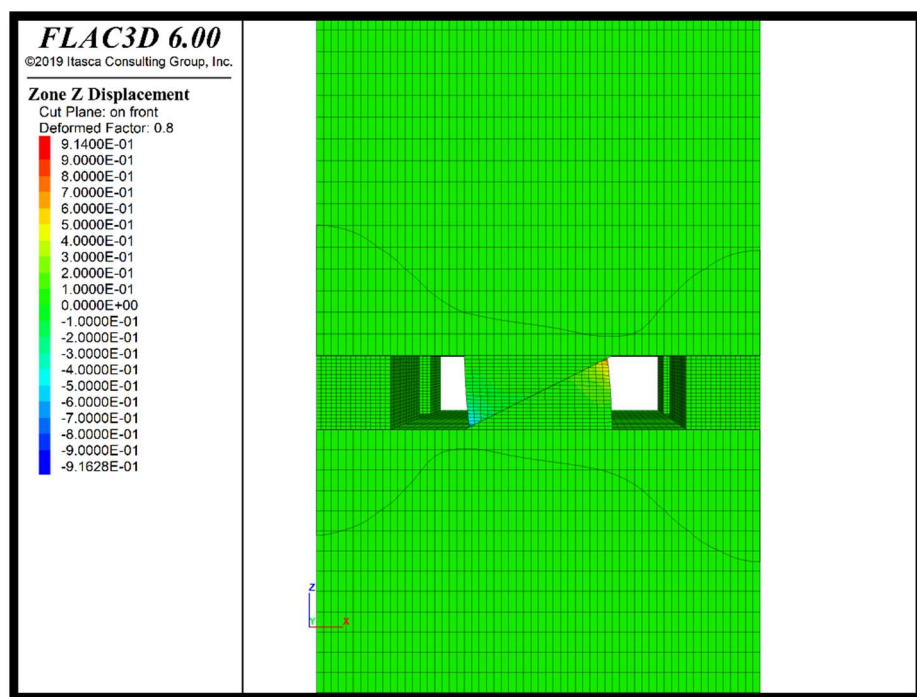


Σχήμα 5-9 Ανάπτυξη ασυνέχειας 30 μοιρών



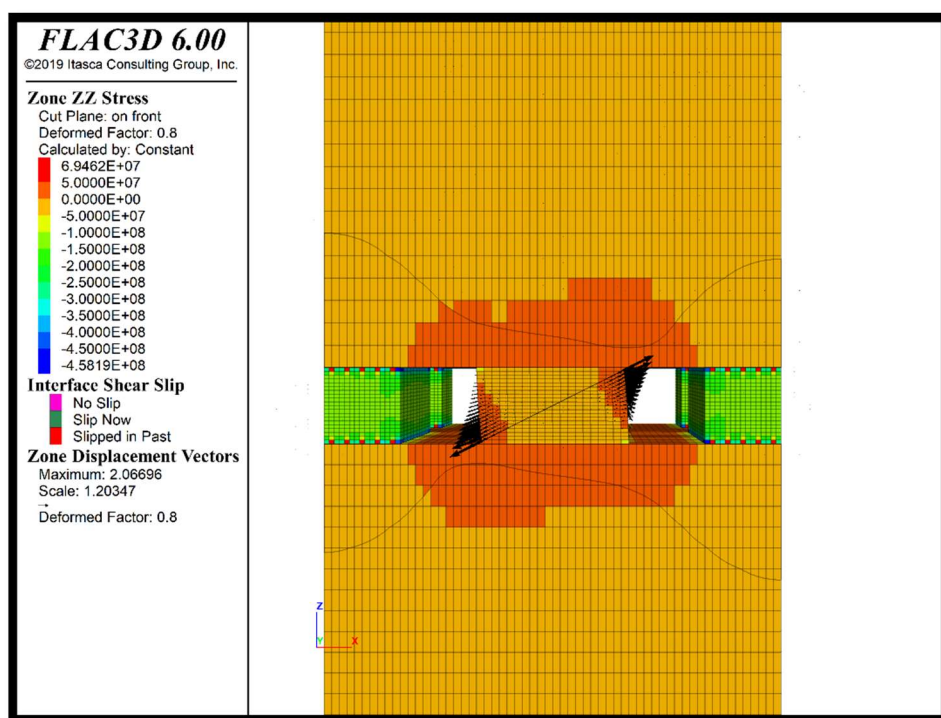
Σχήμα 5-10 Πρόσωση ανάπτυξη ασυνέχειας

Στο ακόλουθο Σχήμα 5-11 παρατηρούνται οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα z όπου φαίνεται πως ο κεντρικός στύλος αστοχεί και ολισθαίνει προς την επιφάνεια που έχει δημιουργήσει η ασυνέχεια.



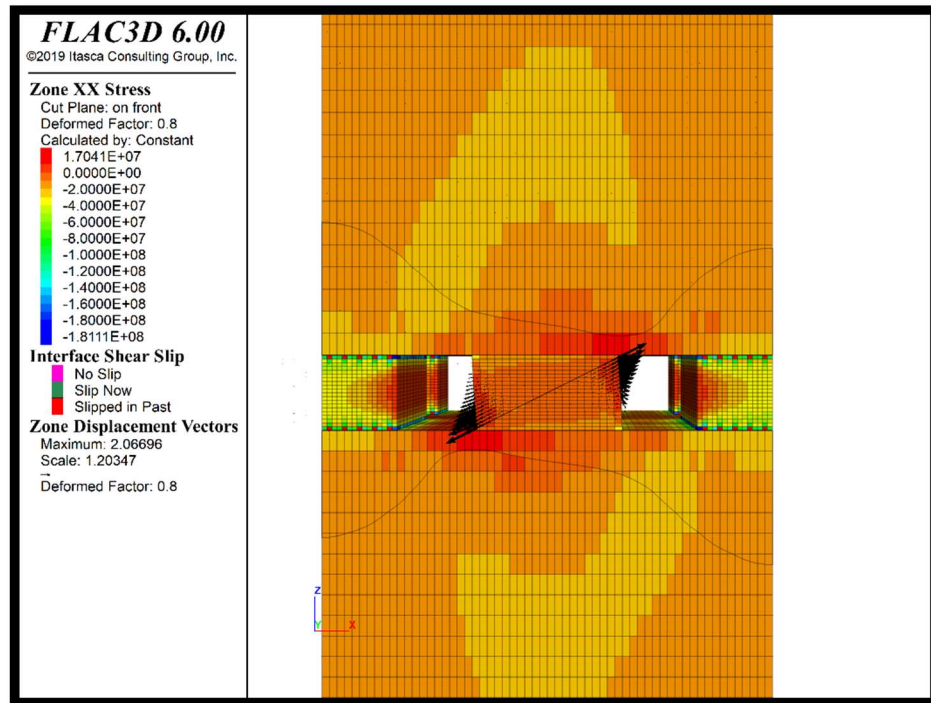
Σχήμα 5-11 Κατακόρυφες μετατοπίσεις μοντέλου 30 μοιρών.

Στο σχήμα 5-12 παρατηρούνται οι κατακόρυφες τάσεις όπως επίσης και τα διανύσματα των μετατοπίσεων. Στο συγκεκριμένο σχήμα αποδεικνύεται η αστοχία του κεντρικού στύλου με την μορφή ολίσθησης όπως επίσης και οι εφελκυστικές δυνάμεις που τον οδηγούν σε αστοχία. Οι μηδενικές τιμές του χρωματικού κώδικα, παρουσιάζονται διότι ο στύλος έχει αστοχήσει και τα φορτία έχουν αναδιανεμηθεί στους υπόλοιπους.



Σχήμα 5-12 Κατακόρυφες τάσεις μοντέλου 30 μοιρών

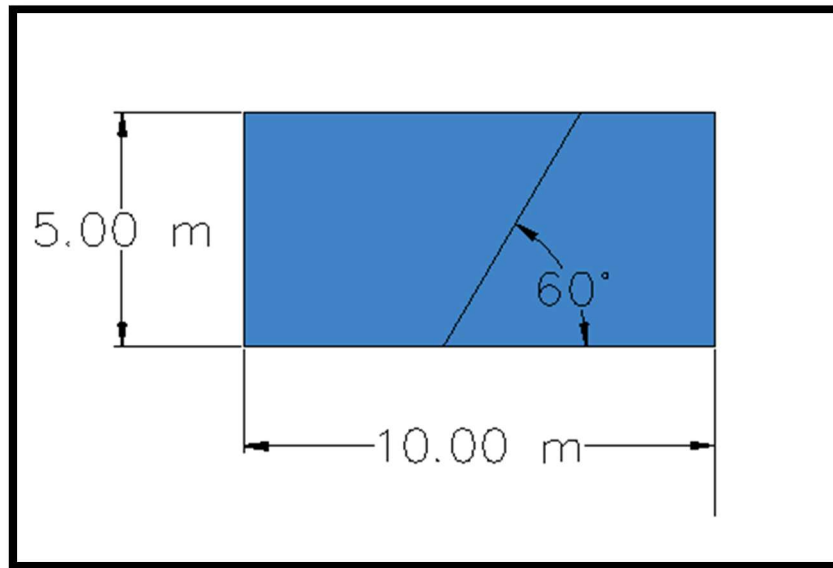
Στο Σχήμα 5-13 διακρίνεται η αστοχία του στύλου όπως δείχνουν τα διανύσματα των μετατοπίσεων και οι τάσεις που εφαρμόζονται στις περιοχές αστοχίας, ειδικά στις γωνίες τις ασυνέχειας είναι υψηλές.



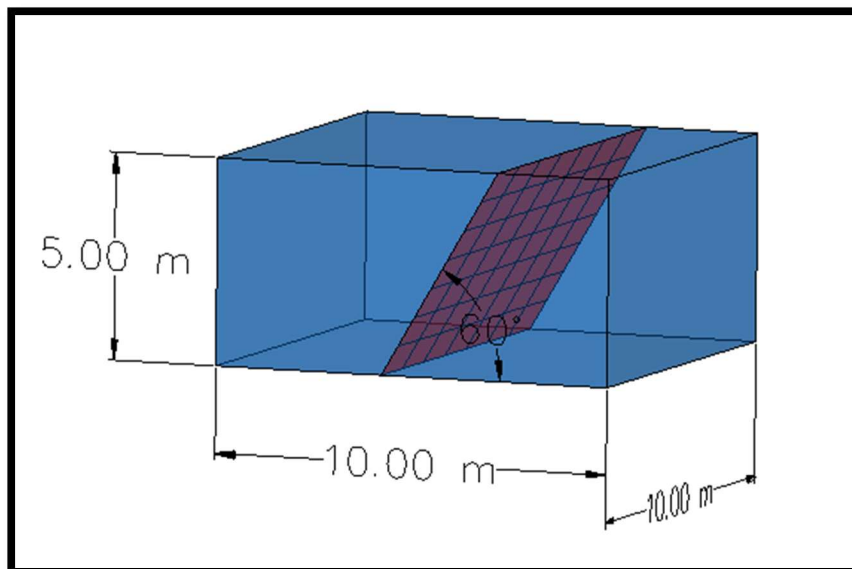
Σχήμα 5-13 Οριζόντιες τάσεις και διανύσματα μετατοπίσεων μοντέλου 30 μοιρών

➤ Αποτελέσματα για ανάπτυξη ασυνέχεια 60 °

Στο Σχήμα 5-14 φαίνεται η ασυνέχεια που αναπτύσσεται όπως επίσης και οι μοίρες όπου έχει αναπτυχθεί. Στο Σχήμα 5-15 διακρίνεται η ανάπτυξη ασυνέχειας εντός του στύλου.

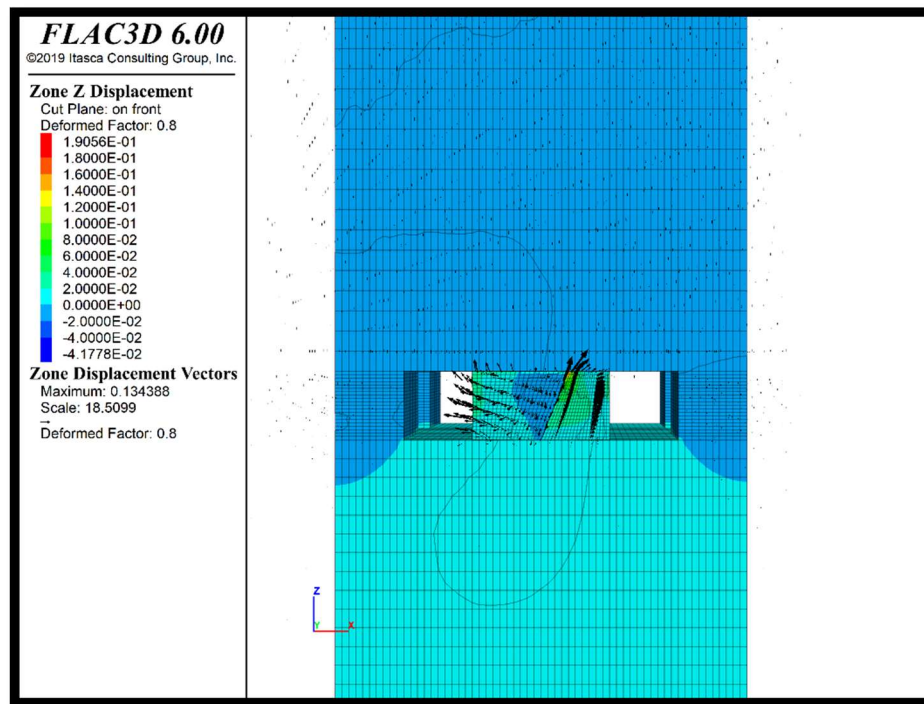


Σχήμα 5-14 Πρόσωση ανάπτυξης ασυνέχειας 60 μοιρών



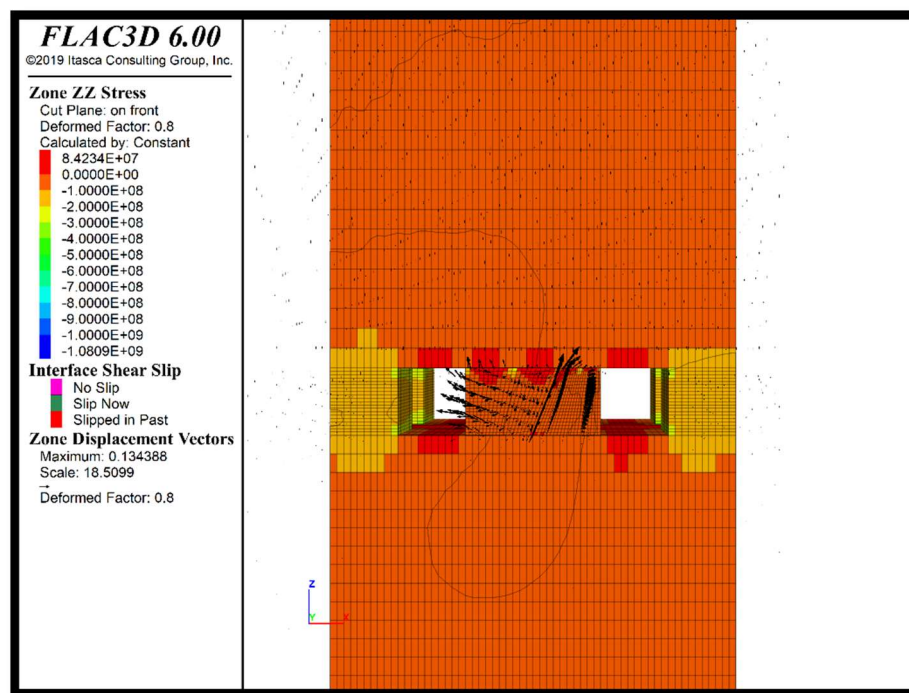
Σχήμα 5-15 Ανάπτυξη ασυνέχειας 60 μοιρών

Στο ακόλουθο Σχήμα 5-16 παρατηρούνται οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα z όπου φαίνεται πως ο κεντρικός στύλος αστοχεί και το αριστερό κομμάτι ολισθαίνει προς την ελεύθερη επιφάνεια ενώ το δεξιό κομμάτι να συμπιέζεται προς τα επάνω. Ακόμη παρατηρούνται πως οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι εφελκυστικές.



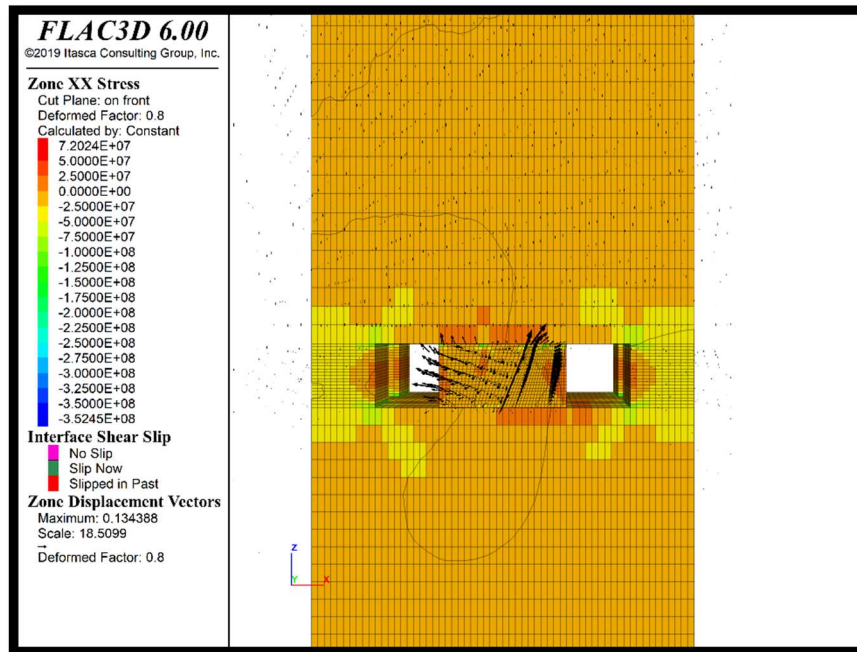
Σχήμα 5-16 Κατακόρυφες μετατοπίσεις μοντέλου 60 μοιρών

Στο Σχήμα 5-17 διακρίνονται υψηλές τάσεις πάνω από τον κεντρικό στύλο όπως επίσης και τα διανύσματα των μετατοπίσεων. Επιβεβαιώνεται η αστοχία του κεντρικού στύλου και στο συγκεκριμένο μοντέλο. Οι αρνητικές τιμές του χρωματικού κώδικα αποδεικνύουν την αστοχία του στύλου όπως επίσης και την ανακατανομή των τάσεων στους γύρω στύλους.



Σχήμα 5-17 Κατακόρυφες τάσεις μοντέλου 60 μοιρών.

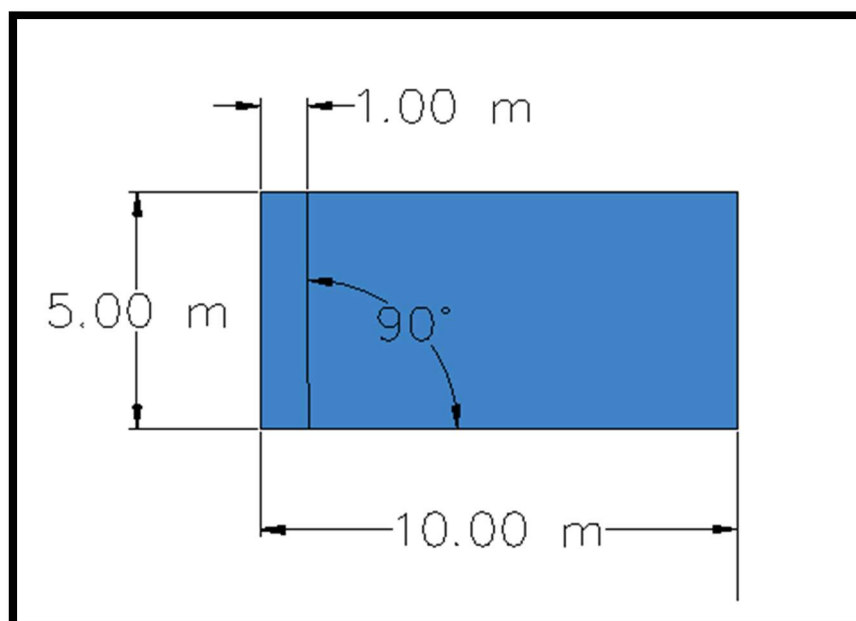
Στο σχήμα 5-18 διακρίνονται τα διανύσματα των μετατοπίσεων, όπου δείχνουν τη κατεύθυνση του τεμαχίου που έχει αστοχήσει. Παρατηρούνται μεγάλες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες οδηγούν στην αστοχία του στύλου.



Σχήμα 5-18 Οριζόντιες τάσεις και διανύσματα μετατοπίσεων μοντέλου 60 μοιρών

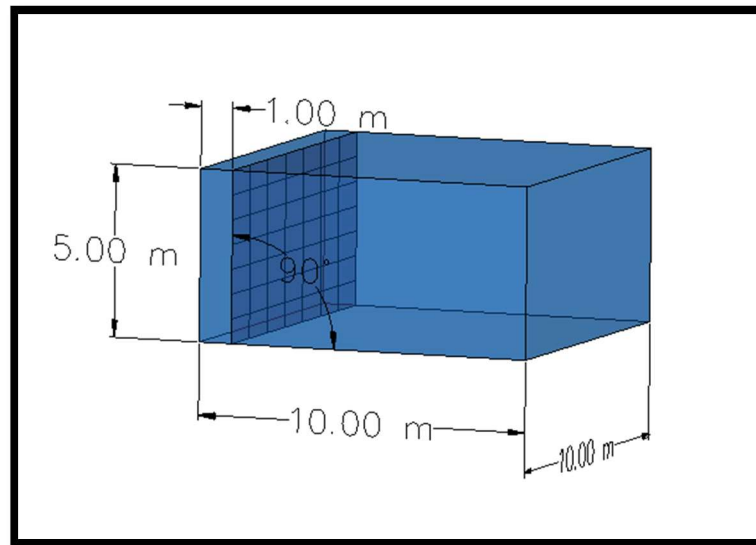
- Αποτελέσματα για ανάπτυξη ασυνέχειας 90° και 1m από την αριστερή πλευρά του στύλου.

Στο ακόλουθο Σχήμα 5-19 διακρίνεται η θέση ανάπτυξης της ασυνέχειας επί του στύλου. Βρίσκεται 1m από την αριστερή πλευρά του κατά τον άξονα x προς τα δεξιά.



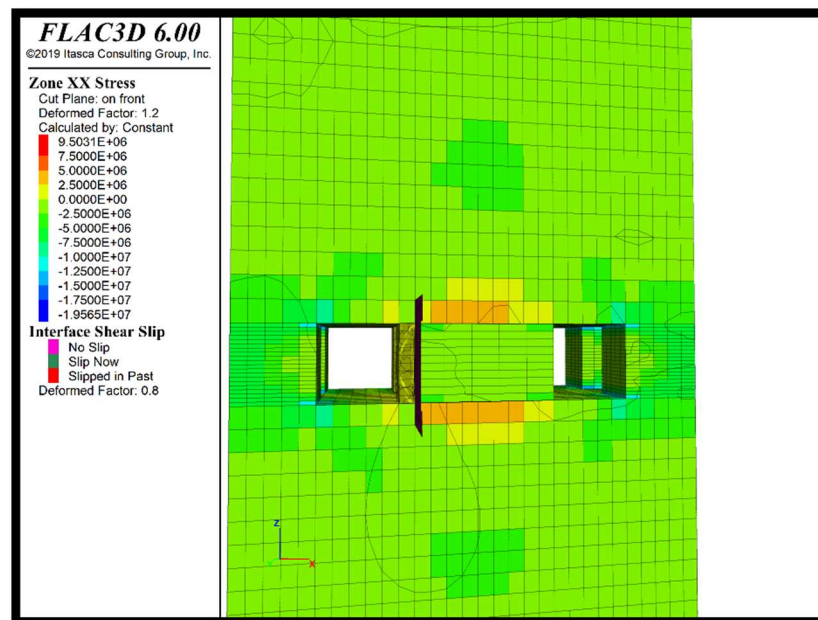
Σχήμα 5-19 Πρόσωση κεντρικού στύλου - ύπαρξη ασυνέχειας στο 1m.

Στο Σχήμα 5-20 διακρίνεται η ανάπτυξη της ασυνέχειας, όπως διακρίνεται αναπτύσσεται διεύθυνση κατακόρυφη και με κλίση κατακόρυφη δηλαδή με 90/090.



Σχήμα 5-20 Τρισδιάστατη απεικόνιση στύλου με την ασυνέχεια εντός του.

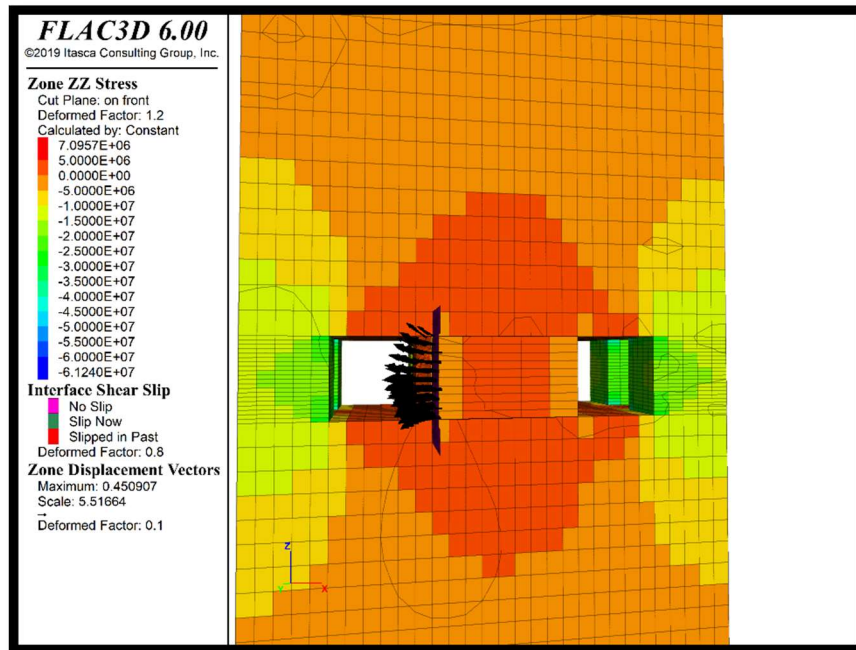
Στο Σχήμα 5-21 διακρίνεται η αποκόλληση του τμήματος πλάτους 1m. Αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών τάσεων που εφαρμόζονται στο σώμα, έτσι δημιουργείται το φαινόμενο της αξονικής ρωγμάτωσης το οποίο είναι υπεύθυνο για την αστοχία.



Σχήμα 5-21 Άποψη του κεντρικού στύλου με την ασυνέχεια

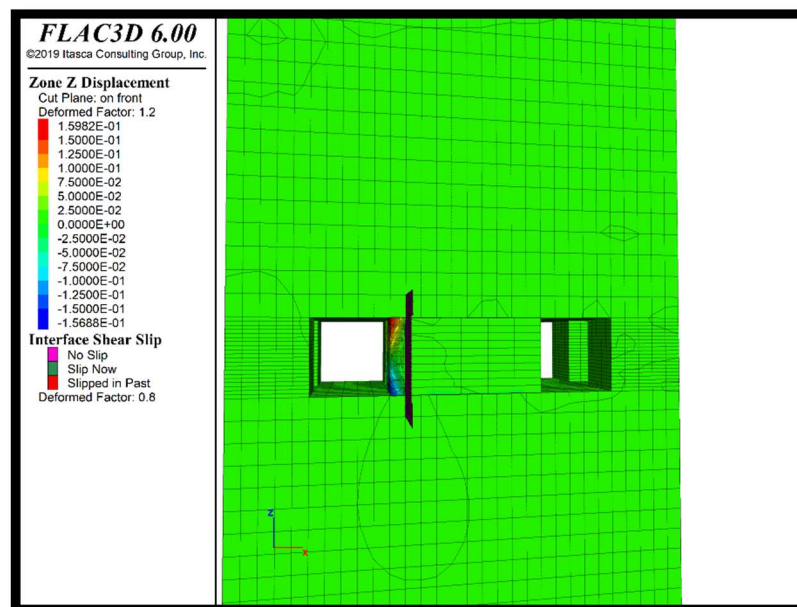
Κατά την εφαρμογή τόσο υψηλών τάσεων το μοντέλο αστοχεί, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 5-22 τα διανύσματα των μετατοπίσεων έχουν φορά προς τον θάλαμο. Όπως γίνεται αντιληπτό ο στύλος εκτονώνεται προς την ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αστοχία του στο σημείο αυτό λόγω των εφελκυστικών τάσεων που

αναπτύσσονται όπως δείχνουν και τα διανύσματα των μετατοπίσεων. Εδώ ξανά ο χρωματικός κώδικας επιβεβαιώνει την γενική αστοχία του στύλου, καθώς επίσης και ότι οι μηδενικές τιμές αποδεικνύουν την ανακατανομή των τάσεων στους γύρω στύλους



Σχήμα 5-22 Αξονική ρωγμάτωση του στύλου λόγω επίδρασης των κατακόρυφων τάσεων.

Στο Σχήμα 5-23 από τις κατακόρυφες μετατοπίσεις και το φαινόμενο axial splitting διακρίνεται η αποκόλληση του τμήματος 1m.

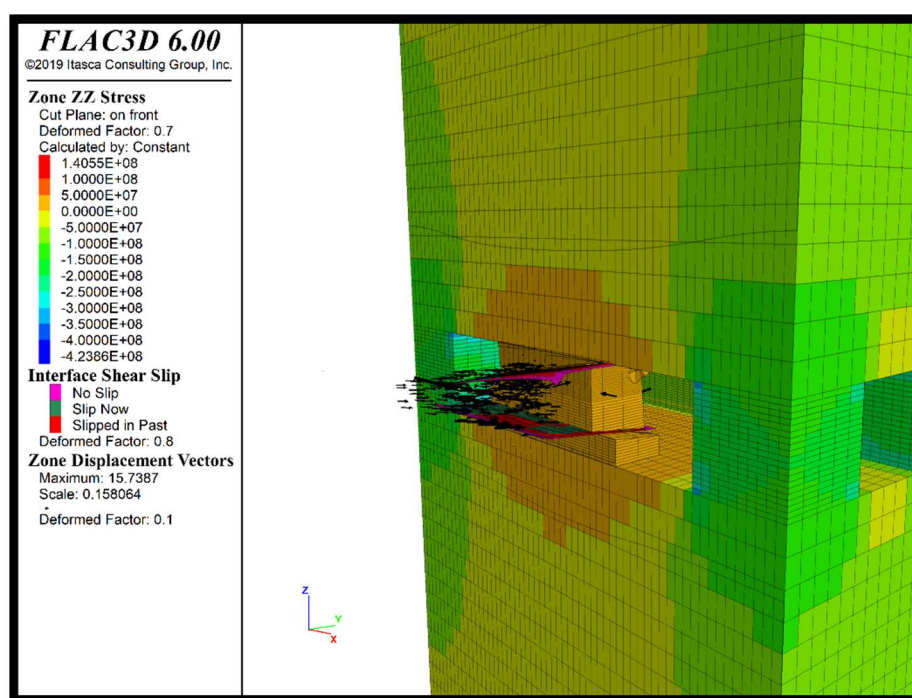


Σχήμα 5-23 Κατακόρυφες μετατοπίσεις

➤ Αποτελέσματα του συστήματος ασυνεχειών.

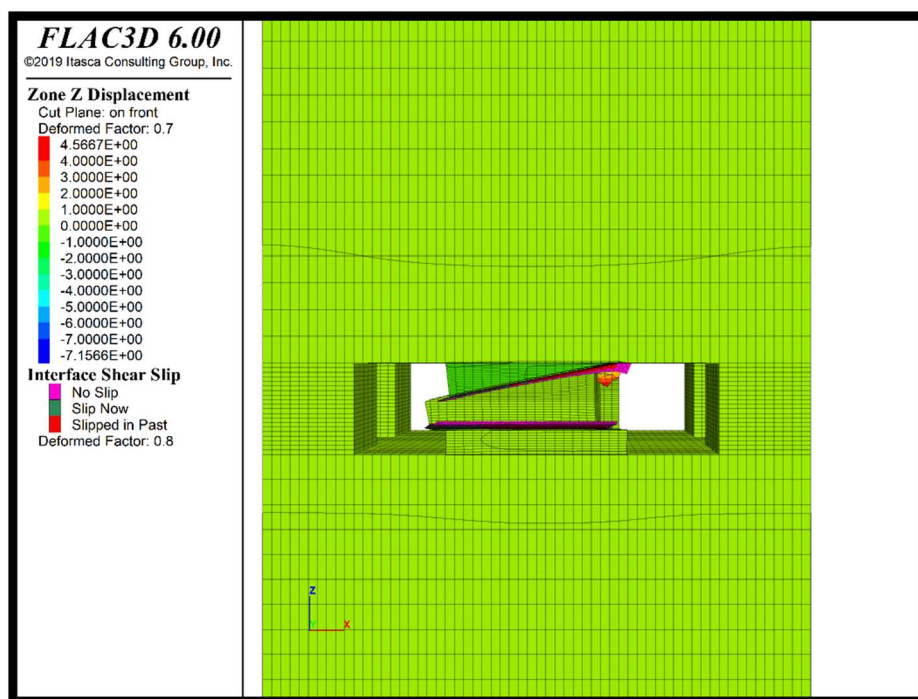
Στο συγκεκριμένο μοντέλο δημιουργήθηκαν δύο ασυνέχειες εντός του κεντρικού στύλου σε τυχαίες γωνίες, ώστε να προσομοιαστεί όπως ακριβώς συμβαίνει και στην φύση η τυχαία δημιουργία των ασυνέχειων λόγω τεκτονικών και γεωλογικών διεργασιών.

Στο Σχήμα 5-24 διακρίνεται το σύστημα ασυνεχειών και η αστοχία του κεντρικού στύλου, καθώς και τα διανύσματα των μετατοπίσεων όπου επιβεβαιώνουν την αστοχία του. Παρατηρείται η δημιουργία σφηνών



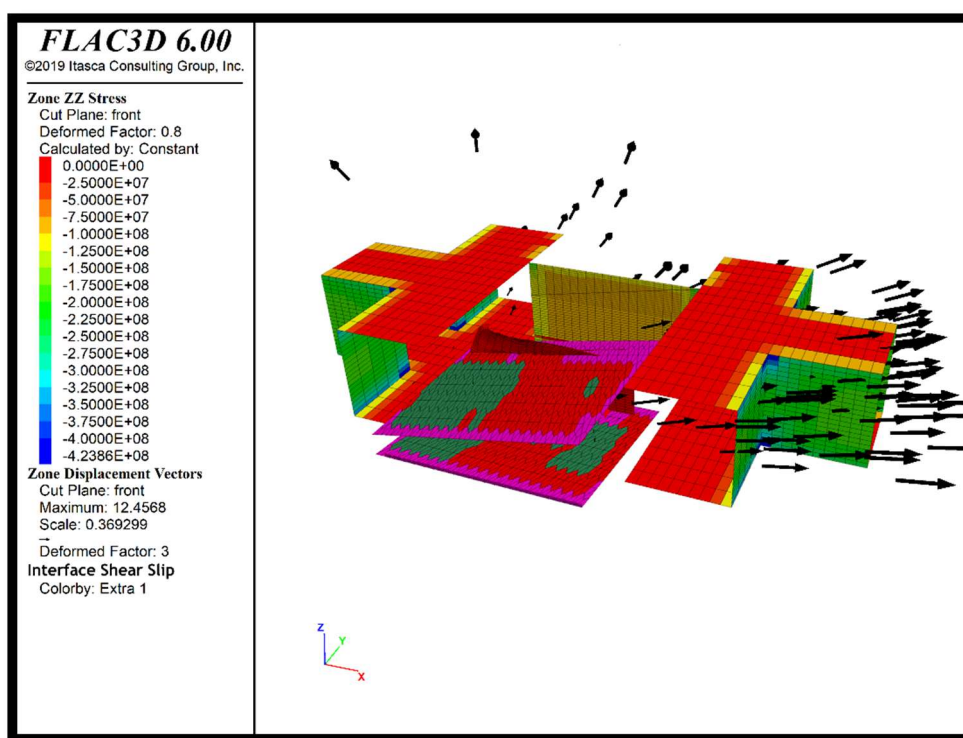
Σχήμα 5-24 Άποψη του κεντρικού στύλου με την ύπαρξη συστήματος ασυνεχειών.

Στο Σχήμα 5-25 διαπιστώνεται με τον καλύτερο τρόπο η αστοχία του κεντρικού στύλου. Διακρίνονται κάποιες σφήνες που έχουν δημιουργηθεί, όπως επίσης και ότι οι ασυνέχειες στα σημεία διεπαφής με τον στύλο έχουν ολισθήσει.



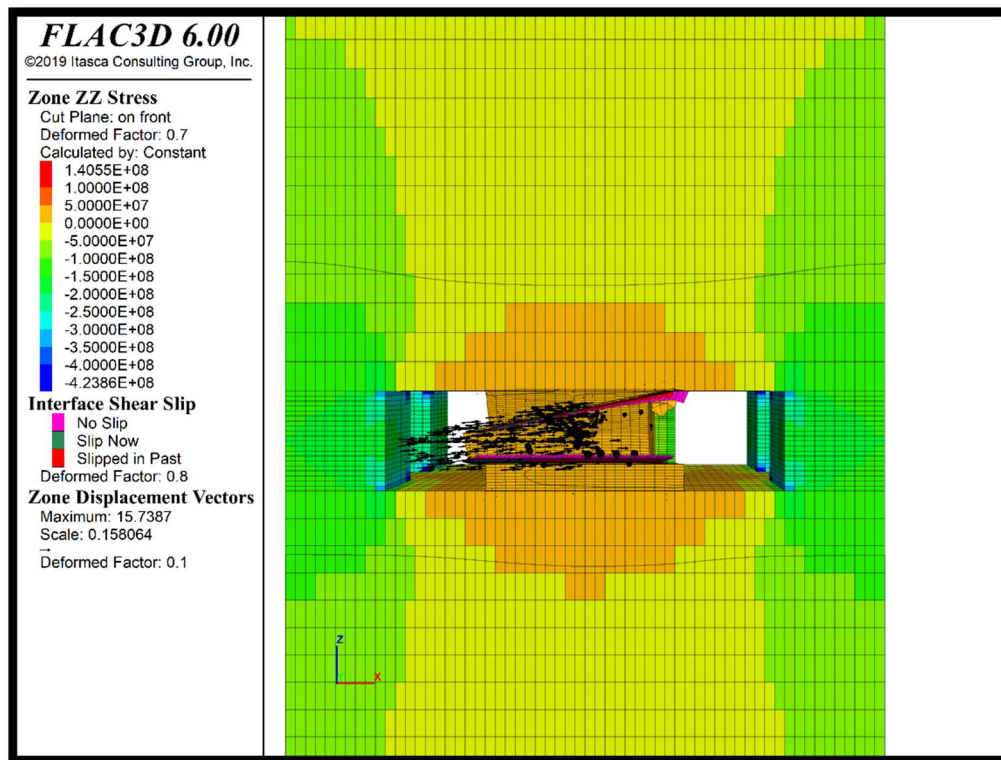
Σχήμα 5-25 Κατακόρυφες μετατοπίσεις του στύλου και του συστήματος ασυνεχειών.

Στο Σχήμα 5-26 έχει δημιουργηθεί εμφάνιση μόνο του κεντρικού στύλου και των θαλάμων γύρω από αυτόν. Έτσι υπάρχει καλύτερη άποψη για την επικρατούσα κατάσταση. Φαίνεται η αστοχία στο εμπρόσθιο τμήμα του στύλου. Διακρίνονται και οι δύο ασυνέχειες που έχουν δημιουργηθεί τυχαία, όπως επίσης και οι εφελκυστικές τάσεις που έχουν φορά όπως τα διανύσματα των μετατοπίσεων.



Σχήμα 5-26 Κατακόρυφες τάσεις και επικρατούσα κατάσταση.

Τέλος στο Σχήμα 5-27 φαίνονται οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται λόγω της αστοχίας του κεντρικού στύλου όπως επίσης και η δημιουργία σφηνών που έχουν προέλθει από τα επίπεδα αστοχίας του. Οι μηδενικές του χρωματικού κώδικα, όπως επίσης και ο θόλος που δημιουργείται επιβεβαιώνουν την αστοχία του στύλου και την ανακατανομή των τάσεων στους γύρω στύλους όπως δείχνουν και οι αρνητικές τιμές του χρωματικού κώδικα σε αυτούς.



Σχήμα 5-27 Κατακόρυφες τάσεις

6 Συμπεράσματα- Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε, όπως έχει προαναφερθεί, η επίδραση των ασυνεχειών στην αντοχή στύλου σε υπόγεια έργα. Είναι ευρέως γνωστό ότι, οι ασυνέχειες αναλόγως την ανάπτυξή τους μπορούν να αποβούν μοιραίες για την εξέλιξη του έργου. Συνήθως οι ασυνέχειες αστοχούν, είτε με την μορφή σφηνών στην οροφή ή στις παρειές του θαλάμου, είτε κατά την ανάπτυξή τους εντός του πετρώματος όπου δημιουργούν επίπεδα αστοχίας. Όμως σημαντικό ρόλο γενικά στην αντοχή των πετρωμάτων έχουν και οι γεωτεχνικοί παράγοντες διότι, όπως είναι λογικό, η γωνία τριβής, οι πιέσεις των υπερκείμενων, η γωνία ανάπτυξης της ασυνέχειας και άλλοι γεωτεχνικοί παράμετροι επηρεάζουν εξίσου την αντοχή του στύλου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω εμφανίζουν μια ομοιογένεια όπως επίσης και μια επαναληψιμότητα στις τιμές των μετατοπίσεων. Αυτό θα επεξηγηθεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο των συμπερασμάτων, όπως επίσης θα δοθούν προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση των συνθηκών που οδηγούν ή όχι σε αστοχία.

Όπως αποτυπώνεται στα σχήματα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Αποτελέσματα από τις επιλύσεις όπου οι ασυνέχειες αναπτύσσονται επί κλίση.
- Αποτελέσματα από τις επιλύσεις των κατακόρυφων ασυνεχειών που αφορούν στις περιπτώσεις όπου η γωνία ανάπτυξης της ασυνέχειας είναι της ακόλουθης τιμής των 90° .

Ξεκινώντας, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως το μοντέλο του συστήματος που αποτελείται από δύο ασυνέχειες αναπτυγμένες σε τυχαίες θέσεις στο κατακόρυφο και στο επίπεδο άξονα ώστε να μπορέσει να προσομοιωθεί η δημιουργία τους όπως συμβαίνει και στην φύση κατά την κρυστάλλωση του μάγματος ή των γεωλογικών- τεκτονικών επιδράσεων που συμβαίνουν στα πετρώματα.

Στα αρχικά μοντέλα οι μετατοπίσεις είναι πολύ μικρές, όπου θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν μηδενικές. Είναι λογικό διότι, πριν την εκσκαφή το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι το ελαστικό.

Επιβεβαιώνεται ότι, στις γωνίες του στύλου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων. Παρατηρείται ότι, στις γωνίες του κεντρικού στύλου οι τιμές των μετατοπίσεων είναι πιο αυξημένες σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του.

Η γωνία ανάπτυξης της ασυνέχειας επίσης επιδρά σημαντικά στην υποβάθμιση της αντοχής του στύλου. Έτσι προκύπτουν τα εξής:

1. Οι ασυνέχειες που αναπτύσσονται επι κλίση είναι δυνητικά πιο επικίνδυνες στο να ολισθήσουν ειδικά εφόσον έχουν μικρές γωνίες εσωτερικής τριβής.
2. Όσον αφορά στις ασυνέχειες που αναπτύσσονται κατακόρυφα, σε αυτές δημιουργείται το φαινόμενο της αξονικής ρωγμάτωσης (axial splitting). Είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο στις παρειές του στύλου αποκολλάται υλικό το οποίο τείνει να αποκτήσει ημικυκλική μορφή και να δημιουργήσει πρόβλημα ευστάθειας στον στύλο.

Τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνται πάρα πολύ επειδή, ουσιαστικά, έχουν εισαχθεί παράμετροι από διαφορετικές πηγές που πιθανά δεν καλύπτουν ικανοποιητικά την περιγραφή του πετρώματος. Εδώ το επιλεγμένο γεωυλικό είναι ένα ομοιογενές ισότροπο με τις τυπικές τιμές που έχουν δοθεί.

Το μοντέλο με το σύστημα των ασυνεχειών, δημιουργεί το δυσμενέστερο σενάριο. Αστοχεί σε οποιαδήποτε τιμή γωνίας εσωτερικής τριβής, καθώς τα επίπεδα ασυνέχειας δημιουργούν σφήνες όπως ελεύθερες επιφάνειες προς τους θαλάμους όπου και θα ολισθήσει το πέτρωμα που έχει αστοχήσει.

Οι προτάσεις για βελτίωση και διερεύνηση του παρόντος σεναρίου είναι οι εξής:

1. Να διερευνηθούν σε νέες διπλωματικές εργασίες ποιες γεωτεχνικές παράμετροι μπορούν επίσης να επηρεάσουν την αντοχή του στύλου.
2. Να δημιουργηθούν δεδομένα από δοκίμια πετρωμάτων που θα αντιπροσωπεύουν το κεντρικό στύλο. Να είναι τετραγωνικής διατομής όπου θα γίνονται οπές που θα προσομοιώνουν τις ασυνέχειες, και στην περίπτωση γωνίας τριβής 0° να είναι κενές οι οπές. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση να πληρώνονται με υλικό που να έχει τις ιδιότητες αυτές με την αντίστοιχη γωνία τριβής, π.χ. λειο-

τριβημένο χαλίκι και κοσκινισμένο. Να πραγματοποιείται επίλυση στον λογισμικό FLAC^{3D} και να γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και καταγραφή των τελικών δεδομένων.

3. Να γίνει μια στατιστική ανάλυση ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων σχετικά π.χ. με την τιμή γωνίας ανάπτυξης της ασυνέχειας και την τιμή της γωνίας τριβής, ώστε να υπάρχει ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων και να εντοπιστούν ποιες παράμετροι επηρεάζουν στα μέγιστα την αντοχή των πετρωμάτων .
4. Να πραγματοποιηθεί επίλυση με διαφορετικό γεωυλικό και όχι ισότροπο όπως στην παρούσα διπλωματική και σε μικρότερο βάθος.

Βιβλιογραφία

- Atlas Copco. (2000). *Room-and-pillar methods, Stockholm, Sweden*. Retrieved from www.atlascopco.com
- Deliveris, A. V., & Benardos, A. (2017). Evaluating performance of lignite pillars with 2D approximation techniques and 3D numerical analyses. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(6). Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.014>
- Frith, R., & Reed, G. (2019). Limitations and potential design risks when applying empirically derived coal pillar strength equations to real-life mine stability problems. 29(1). *International Journal of Mining Science and Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.11.024>
- Grosser, H., & Bormann, P. (2011). Theoretical source representation. *Researchgate*. doi:10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.1
- Heiniö, M. (1999). *Rock excavation handbook for civil engineering*. Sandvik, Tamrock.
- Hudson, J., & Harrison, J. (1997). *Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles*. Oxford: Pergamon.
- Jessu, K. V., & Spearing, A. S. (2018). Effect of dip on pillar strength. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 118(7). Retrieved from <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n7a10>
- Latham, J. P., Van Meulen, J., & Dupray, S. (2006). Prediction of in-situ block size distributions with reference to armourstone for breakwaters. *Engineering Geology*, 86(1), σσ. 18-36.
- Li, Y., & Bahrani, N. (2021). Strength and failure mechanism of highly interlocked jointed pillars: insights from upscaled continuum grain-based models of a jointed rock mass analogue. *Computers and Geotechnics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104278>
- Mallı, T., Yetkin, M. E., & Kahraman, B. (2017). Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine. *Journal of African Earth Sciences journal* 134; 365-372.
- Sarfarazi, V., Babanouri, N., Fattahi, S., & Asgari, K. (2023). Study on failure mechanism of room and pillar with different shapes and configurations under uniaxial compression using experimental test and numerical simulation. *Underground Space (China)*, 9. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.07.002>
- Skrzypkowski, K. (2020). Decreasing Mining Losses for the Room and Pillar Method by Replacing the Inter-Room Pillars by the Construction of Wooden Cribs Filled with Waste Rocks. *Energies*.

- Vlachogiannis, I., & Benardos, A. (2023). *Pillar stress estimation: 3D & 2D numerical analysis vs. Tributary Area Theory*. Taylor & Francis Group.
- Wanga, S., Xibing, L., & Shanyong, W. (2018). Three-dimensional mineral grade distribution modelling and longwall. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, pp. 123-136. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.035>
- Zhang, C., Zhao, Y., Han, P., & Bai, Q. (2022). Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect. *Engineering Failure Analysis*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106344>
- Αβδελάς, Γ., & Σίμος, Θ. (2004). *Αριθμητική Ανάλυση*. Συμμεών.
- Αγιουτάντης, Ζ. (2019). *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανικής Πετρωμάτων*. ΙΩΝ.
- Μπενάρδος, Α. (2014). *Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης – Ελληνικές Εκμεταλλεύσεις*. Αθήνα: Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

