



# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**Σχεδιασμός υποστήριξης στοών παραγωγής του μεταλλείου  
Ολυμπιάδας με βάση γεωμηχανικά συστήματα ταξινόμησης  
βραχομαζών και υπολογιστικού μοντέλου**

### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΜΠΡΟΚΟΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Καθηγητής Γ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ (επιβλέπων)**

**Καθηγητής Μ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ**

**Επικ. Καθηγητής Ε. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ**

**Χανιά**

**Μάιος, 2016**

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου και υπεύθυνο της εργασίας κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο που με τις συμβουλές και την καθοδήγησή του έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ακολούθως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κύριο Γαλετάκη Μιχαήλ και τον κύριο Στειακάκη Εμμανουήλ, μέλη της τριμελούς επιτροπής, για την βοήθεια και την καθοδήγησή τους.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών και στοιχείων, για τη συγγραφή της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μυλωνά Δημήτριο, γεωλόγο, για την βοήθεια που μου προσέφερε, με τις γνώσεις και την εμπειρία του στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και την σύζυγό μου, Ιζδράνη Ειρήνη για την στήριξη και το κουράγιο που μου έδιναν όλο αυτό το διάστημα.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την προσομοίωση εκμετάλλευσης του κοιτάσματος της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής με την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων, με σκοπό την μελέτη απόκρισης της βραχομάζας περίξ αλλά και στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

Η εν λόγω μέθοδος είναι από τις πλέον κοστοβόρες όμως με τον μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους. Ο συντελεστής αυτός αφορά σε θέματα τόσο υγιεινής και ασφάλειας των εργαζομένων λόγω ευαίσθητων γεωλογικών συνθηκών, όσο και σε θέματα περιβαλλοντικά καθώς το μεταλλείο βρίσκεται κοντά σε κατοικημένη περιοχή πλαισιωμένο από ζώνη Natura 2000 όπου δεν θέλουμε να διαταραχθεί από επιφανειακές καθιζήσεις.

Κατά την εκτέλεση της μεθόδου αυτής τα κενά που προκύπτουν πληρούνται από υλικό λιθογόμωσης το οποίο παρασκευάζεται εντός μεταλλευτικού χώρου και αποτελείται από τέλμα κατεργασίας, νερό και τσιμέντο σε κατάλληλες αναλογίες.

Στην παρούσα εργασία αρχικά παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία σχετικά με την μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων γύρω από τις υπόγειες εκσκαφές. Στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφηματική παρουσίαση των μεθόδων εξόρυξης με γομούμενα μέτωπα.

Αμέσως μετά γίνεται λόγος για το μεταλλείο της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής, όπου παραθέτονται τα γεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία της περιοχής και γίνεται αναφορά για την μέθοδο εκμετάλλευσης με λιθογόμωση με ανοδική φορά.

Σκοπός της εργασίας αυτής αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης των προσωρινών μέτρων υποστήριξης αλλά και της αντοχής της λιθογόμωσης στις μετακινήσεις των πετρωμάτων περιφερειακά και στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

Το σύνολο των μοντέλων τα οποία κατασκευάστηκαν είναι τέσσερα με ισάριθμες αριθμητικές αναλύσεις για την πρόβλεψη των μετακινήσεων.

Μετά την δημιουργία και «τρέξιμο» των μοντέλων με τη βοήθεια του λογισμικού Phase 2d της Rocscience, ακολούθησε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με χρήση διαγραμμάτων και πινάκων ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων και να προχωρήσουμε τελικά στα συμπεράσματα. Προέκυψε ότι οι μικρότερες μετακινήσεις σημειώνονται στα μοντέλα στα οποία χρησιμοποιούμε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως προσωρινό μέτρο υποστήριξης των παραγωγικών στοών.

Τέλος οι μεγαλύτερες μετακινήσεις της βραχομάζας όπως προκύπτει από την ανάλυση των μοντέλων μας παρουσιάζεται στα μοντέλα αυτά τα οποία δεν χρησιμοποιούν προσωρινά μέτρα υποστήριξης, δηλαδή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, και τα οποία επίσης χαρακτηρίζονται από μειωμένη μηχανική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της λιθογόμωσης από 4MPa σε 1MPa.

## **Abstract**

The present master thesis pertains to the simulation of mine planning of Olympia's mine with cut and fill stoping method, in order to study the response of the rock mass circumferentially but also within the orebody.

This method, although it is one of the costliest methods is the optimal solution, for safety reasons, because of the geology that exists in the region, such as for environmental reasons because the mine is located around Natura 2000 area.

Initially theoretical data are presented, concerning the mechanical behavior of the rock mass, around underground excavations. Then a more detailed presentation is performed for the backfill mining methods.

Subsequently we present geological and geotechnical data of the studied area and also make a reference to the upward (down-top) backfill mining method that it is employed in Olympias mine in Calkidiki. The scope of work of this thesis is the influence of the backfill on the surrounding rock mass and the ore body itself. Four set of models have been created made with an equal number of numerical analyses for the predicted movements by the model.

The results are presented in the form of charts and tables in order to make the required comparisons between models. It was found that smaller movements both in the ore and in regional rock mass are predicted by the models that use shotcrete for the temporary support of the drifts and stopes before the final installation of the backfilling material. Finally, the largest movements of the rock mass are presented in the models that do not use temporary supporting measures and are characterized by reduced mechanical strength of the backfill from 4MPa to 1MPa.

## Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΝΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ .....	10
1.1	Εντατικό πεδίο.....	10
1.2	Αρχική εντατική κατάσταση βραχομάζας.....	11
1.3	Ανακατανομή τάσεων γύρω από υπόγεια ανοίγματα.....	15
1.4	Εντατική κατάσταση γύρω από υπόγειο άνοιγμα.....	15
1.5	Παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σήραγγας (καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης).....	19
1.6	Μέθοδος της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχομάζας .....	22
1.7	Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχομάζας.....	24
2	Μέθοδοι υπόγειας Εκμετάλλευσης με Γομούμενα Μέτωπα .....	26
2.1	Εισαγωγή.....	26
2.2	Μέθοδος των Ξύλινων Πρισματικών Πλαισίων.....	27
2.2.1	Γενικά .....	27
2.2.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ξύλινης Υποστήριξης .....	27
2.3	Μέθοδος των Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων.....	28
2.3.1	Χαρακτηριστικά Συστήματος και Σφαίρα Εφαρμογής. ....	28
2.3.2	Πεδίο Εφαρμογής .....	31
2.3.3	Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Κατερχόμενη Φορά	33
2.3.4	Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Ανερχόμενη Φορά	35
2.3.5	Διαφορές Μεθόδων .....	36
2.3.6	Σχεδιασμός Εκμετάλλευσης .....	37
2.3.7	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου.....	38
2.4	Μέθοδοι Λιθογόμωσης.....	39
2.4.1	Σχεδιασμός Λιθογόμωσης Μεταλλείου.....	39
2.4.2	Λιθογόμωση με Στείρα.....	41
2.4.3	Πηγές υλικών Λιθογόμωσης .....	42
2.4.4	Πνευματική Γόμωση .....	45
2.4.5	Υδραυλική Γόμωση.....	45
3	Μεταλλείο Ολυμπιάδας.....	48
3.1	Γενικά .....	48

3.2	Γεωλογία περιοχής .....	48
3.3	Λιθογόμωση .....	49
3.4	Προσδιορισμός Γεωτεχνικών Παραμέτρων Σχεδιασμού .....	50
3.5	Κριτήριο αστοχίας.....	54
4	Αριθμητική προσομοίωση και λογισμικό πακέτο Rocscience Phase 2d.....	55
4.1	Εισαγωγή.....	55
4.2	Καθορισμός της γεωμετρίας και εισαγωγή των δεδομένων.....	55
4.2.1	Διαστάσεις του μοντέλου και οριακές συνθήκες.....	55
4.2.2	Διαμόρφωση δικτύου στοιχείων.....	56
4.2.3	Ορισμός αρχικών συνθηκών.....	56
4.2.4	Μοντελοποίηση .....	56
4.3	Αριθμητική προσομοίωση μοντέλου χωρίς υποστήριξη. ....	58
4.3.1	Ρυθμίσεις .....	59
4.3.2	Όρια εκσκαφής (Boundaries) .....	60
4.3.3	Δημιουργία πλέγματος (Meshing).....	61
4.3.4	Συνοριακές συνθήκες (Boundaries conditions).....	62
4.3.5	Εντατικό πεδίο (Field stress) .....	62
4.3.6	Συντελεστής k.....	63
4.3.7	Μέτρο Ελαστικότητας E.....	63
4.3.8	Καθορισμός ιδιοτήτων .....	64
4.3.9	Σχεδιασμός .....	65
4.4	Αριθμητική προσομοίωση μοντέλου με χρήση μέτρων υποστήριξης.....	68
4.5	Παραμετρικά μοντέλα .....	71
4.5.1	Εισαγωγή .....	71
4.5.2	Δείκτης GSI.....	71
4.5.3	Η αντοχή $\sigma_c$ .....	73
5	Αποτελέσματα .....	74
5.1	Εισαγωγή.....	74
5.2	Προσομοίωση μοντέλου εκμετάλλευσης χωρίς χρήση στοιχείων υποστήριξης. ....	74
5.3	Προσομοίωση με μεταβολή στην αντοχή $\sigma_c$ .....	82
5.4	Προσομοίωση μοντέλου εκμετάλλευσης με χρήση στοιχείων υποστήριξης. ....	86
5.5	Προσομοίωση με μεταβολή στο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. ....	91
6	Συμπεράσματα.....	94



6.1	Σύγκριση μοντέλων εκμετάλλευσης με και χωρίς υποστήριξη.....	95
6.2	Σύγκριση μοντέλων εκμετάλλευσης με διαφορετική $\sigma_c$ .....	96
6.3	Σύγκριση μοντέλων εκμετάλλευσης με διαφορετικά πάχη υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	97
7	Βιβλιογραφία.....	100

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Μετρήσεις της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με το βάθος της εκσκαφής (Hoek et al, 1995). .....	10
Εικόνα 2: Ανακατανομή των τάσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα. (Hoek, 2000). .....	16
Εικόνα 3: κατεύθυνση κυρίων τάσεων στο πέτρωμα όπου $\sigma_h = 3\sigma_v$ όπου $\sigma_v$ , κατακόρυφη κύρια τάση (Hoek, 2000). .....	17
Εικόνα 4: Καμπύλες κατανομής συννοριακών εφαπτομενικών τάσεων γύρω από ελλειπτικό άνοιγμα για εντατικό πεδίο όπου $k=0, 1/3, 1$ για διαφόρους λόγους πλάτους προς ύψος έλλειψης (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Obert and Duvall, 1967) .....	18
Εικόνα 5: Καμπύλες ισοτασικών καμπυλών και τροχιών τάσης γύρω από υπόγειο άνοιγμα (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Hoek and Brown, 1992) .....	19
Εικόνα 6: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 1980) .....	20
Εικόνα 7: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχώμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000). .....	20
Εικόνα 8: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα. (Καββαδάς, 2004) .....	21
Εικόνα 9: Προσομείωση μοντέλου εκμετάλλευσης με υποστήριξη (αριστερά) και χωρίς μέτρα υποστήριξη (δεξιά). .....	57
Εικόνα 10: Γεωλογία περιοχής και μορφή κοιτάσματος πριν έναρξη εκμετάλλευσης. ....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Εικόνα 11: Εισαγωγή σταδίων εκσκαφής. ....	59
Εικόνα 12: Γενικές παράμετροι μοντελοποίησης. ....	59
Εικόνα 13: Καθορισμός ιδιοτήτων πλέγματος. ....	61
Εικόνα 14: Εντατικό πεδίο εκσκαφής. ....	62
Εικόνα 15: Καθορισμός ιδιοτήτων των σχηματισμών και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. ....	64
Εικόνα 16: Μοντέλο προσομοίωσης εκσκαφής. ....	65
Εικόνα 17: Αμέσως μετά την εκσκαφή λίνεται η πλήρωση των ανοικτών στοών με υλικό λιθογόμωσης. ....	66
Εικόνα 18: Φάση εκσκαφής αμέσως επόμενων στοών ανα όροφο, μετά την λιθογόμωση των προηγούμενων στοών. ....	66

Εικόνα 19:Προσομοίωση αρχικού σταδίου εκμετάλλευσης μεταλλείου Ολυμπιάδας χωρίς χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. ....	67
Εικόνα 20:Προσομοίωση τελικού σταδίου εκμετάλλευσης μεταλλείου Ολυμπιάδας χωρίς χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. ....	67
Εικόνα 21: Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	68
Εικόνα 22: Προσθήκη εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μοντέλο. ....	69
Εικόνα 23: Εμφάνιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μοντέλο. ....	69
Εικόνα 24:Φάσεις εκμετάλλευσης όπου εμφανίζονται, η ανυποστήρικτη στοά η Λιθογομωμένη στοά, το εκτοξευόμενο σκυροδέμα και η Λιθογόμωση.....	70
Εικόνα 25: Τέλος εκμετάλλευσης με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και λιθογόμωσης. ....	70
Εικόνα 26: Διάγραμμα δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI ( Καββαδάς, 2000). ....	72
Εικόνα 27: 2 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, πρώτες εκσκαφές. ....	75
Εικόνα 28: 3 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, λιθογόμωση αρχικών εκσκαφών. ....	75
Εικόνα 29:8 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την εκσκαφή των στοών του μεταλλείου. ....	76
Εικόνα 30: 9 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την λιθογόμωση των στοών μεταλλείου. ....	76
Εικόνα 31: 16 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την εκσκαφή των στοών του μεταλλείου. ....	77
Εικόνα 32: 17 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την λιθογόμωση των στοών μεταλλείου. ....	77
Εικόνα 33: 22 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την εκσκαφή των στοών του μεταλλείου. ....	78
Εικόνα 34: 23 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την λιθογόμωση των στοών μεταλλείου. ....	78
Εικόνα 35: 27 <sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, τελικές μετακινήσεις των στοών του μεταλλείου, χωρίς την χρήση υποστήριξης (εκτοξευόμενου σκυροδέματος). ....	79
Εικόνα 36:Στάδιο προσομοίωσης 8 <sup>ο</sup> , με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση. ....	82
Εικόνα 37: Στάδιο προσομοίωσης 9 <sup>ο</sup> , με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση. ....	82
Εικόνα 38: Στάδιο προσομοίωσης 16 <sup>ο</sup> , με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση απο 4MPa σε 1MPa. ....	83

Εικόνα 39: Στάδιο προσομοίωσης 17°, με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση απο 4MPa σε 1MPa. ....	83
Εικόνα 40: Μετακινήσεις κατά το στάδιο 22°, για υλικό λιθογόμωσης με μειωμένη θλιπτική αντοχή. ....	84
Εικόνα 41: Μετακινήσεις κατά το στάδιο 23°, για υλικό λιθογόμωσης με μειωμένη θλιπτική αντοχή. ....	84
Εικόνα 42: Μετακινήσεις κατά το τελικό στάδιο 27°, για υλικό λιθογόμωσης με μειωμένη θλιπτική αντοχή. ....	85
Εικόνα 43: 2° στάδιο προσομοίωσης μοντέλου με υποστήριξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	86
Εικόνα 44: 4° στάδιο προσομοίωσης μοντέλου με υποστήριξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	86
Εικόνα 45: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 20, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	87
Εικόνα 46: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 22, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	87
Εικόνα 47: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 26, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	88
Εικόνα 48: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 28, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	88
Εικόνα 49: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 32, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	89
Εικόνα 50: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 35, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	89
Εικόνα 51: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το τελικό στάδιο, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. ....	90
Εικόνα 52: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 3, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm. ....	91
Εικόνα 53: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 4, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm. ....	91
Εικόνα 54: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 20, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm. ....	92
Εικόνα 55: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 22, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm. ....	92

Εικόνα 56: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 32, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.....	93
--	----

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) και του συντελεστή χαλάρωσης ( $E/E_0$ ) (Καββαδάς, 2004). ....	23
Πίνακας 2: Απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού (Καββαδάς, 2004). ....	25
Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων υπολογισμού των γεωτεχνικών τιμών των γεωλογικών σχηματισμών και του υλικού λιθογόμωσης με την εφαρμογή της μεθοδολογίας .....	50
Πίνακας 4: Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 200m. ....	51
Πίνακας 5: Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 300m.....	52

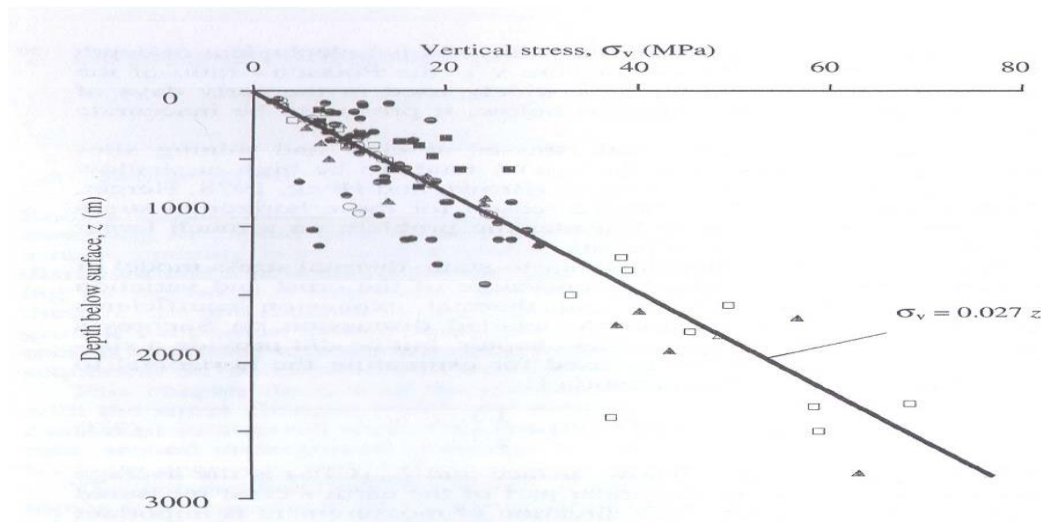
## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Στάδια εκμετάλλευσης και μετακινήσεις που λαμβάνονται στο εσωτερικό του κοιτάσματος.....	80
Διάγραμμα 2: Στάδια εκμετάλλευσης και μετακινήσεις πάνω από το κοιτάσμα. ....	80
Διάγραμμα 3: Στάδια εκμετάλλευσης και μετακινήσεις στην περιοχή κάτω από το κοιτάσμα .....	81
Διάγραμμα 4: Μέγιστες μετακινήσεις ανά στάδιο για μοντέλα με και χωρίς υποστήριξη. ....	95
Διάγραμμα 5: Μέγιστες μετακινήσεις βραχομάζας ανά στάδιο για μοντέλα χωρίς υποστήριξη με μεταβολή στην αντοχή σε.....	96
Διάγραμμα 6: Μέγιστες μετακινήσεις βραχομάζας στην περιφέρεια του κοιτάσματος, για μοντέλα με διαφορετικά πάχη υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	97
Διάγραμμα 7: Μέγιστες μετακινήσεις βραχομάζας στο εσωτερικό του κοιτάσματος, για μοντέλα με διαφορετικά πάχη υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	98

## 1 ΕΝΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

### 1.1 Εντατικό πεδίο

Ονομάζεται αδιατάρακτο το επί τόπου (in situ) εντατικό πεδίο, πριν από τη δημιουργία του υπόγειου ανοίγματος. Το μέγεθος και ο προσανατολισμός του πεδίου αυτού εξαρτάται από το βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών και την γεωλογική ιστορία της περιοχής. Συνήθως ο προσανατολισμός των κυρίων τάσεων εμφανίζεται κατακόρυφος για την μέγιστη κύρια τάση και οριζόντιος για της άλλες δύο κύριες τάσεις, η οποία εξαρτάται από το βάθος της εκσκαφής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 (Hoek et al, 1995).



Εικόνα 1: Σχέση κατακόρυφης τάσης συναρτήσει με το βάθος της εκσκαφής (Hoek et al, 1995).

Ο πραγματικός προσανατολισμός των κυρίων τάσεων στο έδαφος εξαρτάται από της γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Ο καθορισμός τους πραγματοποιείται από την εξέταση της τεκτονικής της περιοχής και από επί τόπου μετρήσεις. Πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν αυτές οι μετρήσεις, οπότε ο ποσοτικός προσδιορισμός τους βασίζεται στη χρήση εμπειρικών σχέσεων και κανόνων (Goodman, 1989).

Η όρυξη ενός ανοίγματος στη μάζα του πετρώματος επιφέρει τη μεταβολή του εντατικού πεδίου του αδιατάρακτου πετρώματος (ground stresses), λόγω της ανακατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, με σκοπό την αποκατάσταση της



στατικής ισορροπίας του συστήματος. Οι μέγιστες τάσεις θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος για τις δεδομένες συνθήκες εξόρυξης ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του ανοίγματος.

Οι επί τόπου τάσεις διακρίνονται σε αρχικές (virgin stresses) και επιφερόμενες (induced stresses) λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου (Αγιουτάντης, 2001).

Οι αρχικές τάσεις διακρίνονται σε (Αγιουτάντης, 2002):

- Βαρυτικές τάσεις (gravitational stresses) που οφείλονται στη δράση του πεδίου βαρύτητας, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από την ισορροπία των δυνάμεων στον κατακόρυφο άξονα.
- Τεκτονικές τάσεις (tectonic stresses) που οφείλονται σε τεκτονικές δυνάμεις
- Παραμένουσες τάσεις (residual stresses) που μπορεί να δημιουργηθούν λόγω φυσικών ή και χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε περιορισμένους όγκους πετρωμάτων.

### 1.2 Αρχική εντατική κατάσταση βραχομάζας.

Η εντατική κατάσταση της βραχομάζας πριν από την κατασκευή υπογείων έργων συνήθως είναι η γεωστατική, δηλαδή περιγράφεται από κατακόρυφες και οριζόντιες κύριες ενεργές τάσεις ( $\sigma'_v$  και  $\sigma'_h$  αντιστοίχως) με τιμές (Καββαδάς, 2000):

$$\sigma' = \gamma \cdot h - u$$

όπου  $h$ = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

$\gamma$ = το ειδικό βάρος της εδαφικής μάζας

$u_0$ = η υδατική πίεση των πόρων

Το ειδικό βάρος της βραχομάζας κυμαίνεται από 23-26 kN/m<sup>3</sup>. Στην περίπτωση υδροστατικής πίεσης πόρων:  $u_0 = \gamma_w d$ , όπου ( $\gamma_w$ ) είναι το ειδικό βάρος του νερού (10 kN/m<sup>3</sup>) και ( $d$ ) είναι το πιεζομετρικό ύψος.

Η σχέσεις αυτές  $\sigma'_v$  και  $\sigma'_h$  συνδέονται με την σχέση  $k = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ , όπου  $k$ , είναι ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης, ο οποίος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.4-1.0 χωρίς να αποκλείονται και μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα, σε υγιείς βραχώμαζες χωρίς επιρροή από τεκτονικές πιέσεις:  $k = 0.6-1.0$ . Σε αποσθρωμένες βραχώμαζες:  $k = 0.4-0.7$ . Στην περίπτωση όπου η βραχώμαζα επηρεάζεται από τεκτονικές πιέσεις ο συντελεστής  $k$ , μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τη μονάδα (έχουν μετρηθεί τιμές έως και 4 στην περίπτωση έντονου θλιπτικού τεκτονικού καθεστώτος) αλλά και να έχει πολύ μικρές τιμές ( $k = 0-0.3$  στην περίπτωση έντονου εφελκυστικού τεκτονικού καθεστώτος). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε μεγάλα βάθη (άνω των 400-500 m) η γεωστατική εντατική κατάσταση είναι πρακτικώς ισότροπη ( $k = 1$ ), ενώ αντίθετα, σε μικρά βάθη (100-400m) συνήθως μετρώνται τιμές του  $k$  αρκετά μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του  $k$  που υπερβαίνουν τη μονάδα έχουν μετρηθεί σε χώρες που τελούν υπό έντονο θλιπτικό τεκτονικό καθεστώς (Νότιος Αφρική, Σκανδιναβικές χώρες, Καναδάς) και δεν είναι βέβαιο ότι μπορούν να εφαρμοσθούν στην Ελλάδα (όπου οι τεκτονικές τάσεις στον παρόντα γεωλογικό χρόνο είναι εφελκυστικές). Σημειώνεται ότι η αξιόπιστη μέτρηση του συντελεστή ( $k$ ) είναι δυσχερής και τα αποτελέσματα δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του  $k$ , είναι (Καββαδάς, 2000):

- Η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης.
- Η μέθοδος της δειγματοληπτικής αποτόνωσης των τάσεων (overcoring).

Σε αρκετές περιπτώσεις, η αρχική εντατική κατάσταση της βραχώμαζας δεν είναι γεωστατική όπως (Καββαδάς, 2000):

- Κοντά στην επιφάνεια εδαφικών πρανών. Στην περίπτωση αυτή οι κύριες τάσεις δεν είναι κατά τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα λόγω των διατμητικών τάσεων που οφείλονται στην κλίση της επιφάνειας του εδάφους.
- Σε μεγάλα βάθη, εφόσον το καθεστώς των τεκτονικών τάσεων δεν ακολουθεί την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση.
- Σε έντονα ανισότροπους σχηματισμούς (π.χ. σχηματισμούς με έντονη στρωσιγένεια) εφόσον οι κύριες διευθύνσεις της ανισοτροπίας δεν συμπίπτουν με την κατακόρυφη ή την οριζόντια.

Το ( $k$ ) είναι παράμετρος που εξαρτάται από τα πετρώματα και την περιοχή όπου πραγματοποιείται η ανάλυση. Το ( $k$ ) είναι διαφορετικό για κάθε μία από τις δύο

οριζόντιες τάσεις. Για ομογενές, αδιατάρακτο πέτρωμα, το (k) μπορεί να θεωρηθεί ως ενιαίο για τις δύο οριζόντιες κύριες τάσεις.

Σε ασθενή πετρώματα, χωρίς την ικανότητα ανάληψης φορτίων με μμεγάλες διαφορές στους αποκλίνοντες τανυστές τάσης, η κάθετη και οι οριζόντιες τάσεις, τείνουν να εξισωθούν κατά την πάροδο του γεωλογικού χρόνου. Αυτός είναι ο κανόνας του Heim, όπου  $\sigma_X = \sigma_Y \approx \sigma_Z$  (Καββαδάς, 2000):

Η κατάσταση αυτή ονομάζεται λιθοστατική πίεση, και εμφανίζεται όταν όλες οι συνιστώσες τάσης, σε κάποιο σημείο είναι ίσες προς όλες τις κατευθύνσεις και το μέγεθος τους οφείλεται στο βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών. Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται αρκετά σε ασθενή αδιατάρακτα ιζήματα, τα οποία επιδεικνύουν πλαστική ή βισκοπλαστική συμπεριφορά. Πετρώματα με αυτή τη συμπεριφορά αποτελούν οι άργιλοι, οι σχιστόλιθοι, οι λιθάνθρακες κ.α. Ο κανόνας αυτός δίνει επίσης λογικά αποτελέσματα για εντατικό πεδίο σε πετρώματα που απαντώνται σε βάθη μεγαλύτερα των 1000m.

Στην περίπτωση υπόθεσης ελαστικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, τα οποία υπόκεινται σε πλευρικό περιορισμό, δηλαδή δεν επιτρέπεται σε αυτά η οριζόντια παραμόρφωση, το ( $K_0$ ) κυμαίνεται σε τιμές χαμηλότερες της μονάδος. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται σε ιζηματογενείς, αδιατάρακτους σχηματισμούς, μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης και σταθερού πάχους. Στις περιπτώσεις αυτές και με δεδομένη γραμμική ελαστική συμπεριφορά, ισχύει:

$$\sigma_x = \sigma_y = \gamma \cdot h \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζει το υπολειπόμενο εντατικό πεδίο (residual stress field). Πολλές φορές κάποιος γεωλογικός σχηματισμός ενδέχεται να έχει φορτιστεί κατά το παρελθόν από μεγαλύτερο εντατικό πεδίο, το οποίο για διάφορους λόγους έχει εξαλειφθεί. Παρόλο ότι το υλικό του σχηματισμού αποφορτίστηκε, δεν έχει επέλθει ανακούφιση των τάσεων στο πέτρωμα. Η ανακούφιση αυτή εμποδίζεται από την αλληλεμπλοκή τεμαχίων του πετρώματος (interlocking). Επομένως, η αρχική ανάλυση του επί τόπου εντατικού πεδίου ενδέχεται να παρουσιάσει χαμηλότερες από τις πραγματικές τιμές τάσεων.

Όταν η υπόγεια πρόσβαση δεν είναι εφικτή η μέτρηση των επιτόπου τάσεων επιτυγχάνεται με την υδρορωγμάτωση (hydrofracturing), στην οποία χρησιμοποιείται η απαιτούμενη υδραυλική πίεση για το άνοιγμα ήδη υπαρχουσών ρωγμών για την

εκτίμηση των επιπέδων των επιτόπου τάσεων. Όταν η πρόσβαση στο υπέδαφος είναι επιτρεπτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές overcoring (overcoring techniques) για επιτόπου μέτρηση και δεδομένου ότι δίνεται η δέουσα προσοχή κατά τη λήψη των μετρήσεων, τα αποτελέσματα είναι συνήθως επαρκή για σχεδιαστικούς σκοπούς (Hoek et al, 1995).

### 1.3 Ανακατανομή τάσεων γύρω από υπόγεια ανοίγματα.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού υπογείων έργων ανάγεται ουσιαστικά στην κατανομή των τάσεων γύρω από το όρυγμα. Οι μέγιστες αυτές τάσεις θα πρέπει να είναι μικρότερες από την αντοχή του πετρώματος για τις δεδομένες συνθήκες όρυξης ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια.

Στην περίπτωση που η θεωρητική ανάλυση αλλά και η εμπειρία δείχνουν ότι το άνοιγμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ευσταθές τότε εξετάζεται το πώς και σε ποιο βαθμό μπορεί να υποστηριχθεί το πέτρωμα με τη βοήθεια υποστηριγμάτων (Αγιουτάντης, 2002).

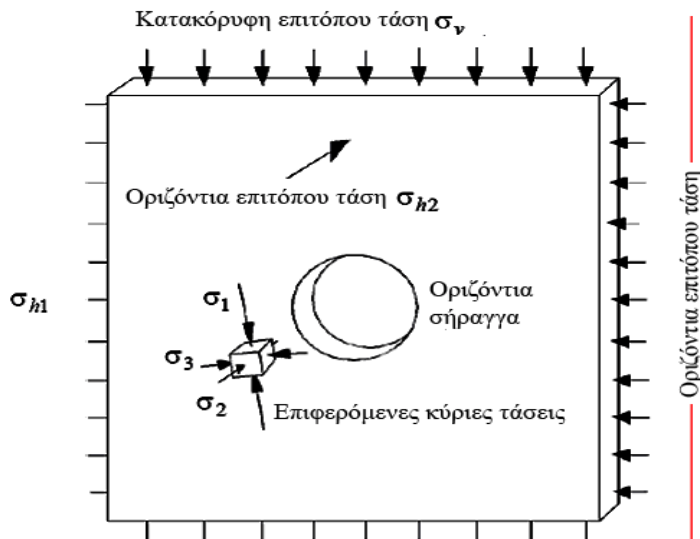
Σε κάθε περίπτωση όμως είναι απαραίτητη η γνώση της αντοχής του πετρώματος και των τάσεων που εξασκούνται στην περιφέρεια του ανοίγματος, καθώς και στον ευρύτερο χώρο, στον οποίο γίνεται η εξόρυξη. Όπως φαίνεται στη συνέχεια, η κατανομή των τάσεων γύρω από μια εκσκαφή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, έτσι λοιπόν για τον αναλυτικό υπολογισμό των τάσεων γύρω από ανοίγματα έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές (Αγιουτάντης, 2002):

- Το πέτρωμα θεωρείται ελαστικό (ακολουθεί το νόμο του Hooke), ομογενές και ισότροπο.
- Το άνοιγμα έχει γίνει σε ένα αδιατάρακτο μέσο. Η συνθήκη αυτή πληρούται, όταν το πλησιέστερο σύνορο του μέσου βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από το τριπλάσιο της μεγαλύτερης διάστασης του ανοίγματος.
- Το άνοιγμα έχει μήκος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της διατομής του και η κατανομή των τάσεων κατά τον επιμήκη άξονα είναι ανεξάρτητη του μήκους.
- Ο επιμήκης άξονας του ανοίγματος είναι οριζόντιος.
- Οι δύο άξονες αναφοράς της διατομής έχουν οριζόντια και κάθετη διεύθυνση αντίστοιχα.

### 1.4 Εντατική κατάσταση γύρω από υπόγειο άνοιγμα

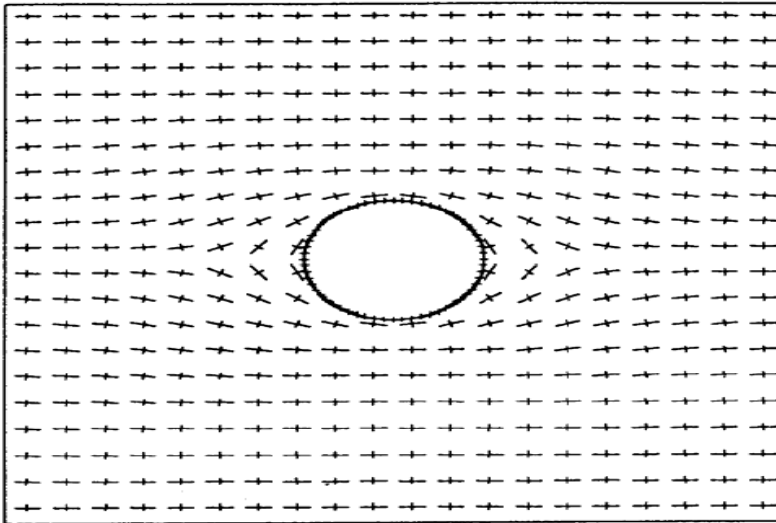
Η συμπεριφορά του πετρώματος γύρω από μία υπόγεια εκσκαφή συσχετίζεται, σε μεγάλο βαθμό, με τις τάσεις που επικρατούν στην περιοχή. Όταν μια υπόγεια εκσκαφή αναπτύσσεται η αρχική εντατική κατάσταση επηρεάζεται σε δεδομένες αποστάσεις γύρω από μια "διάμετρο εκσκαφής" από την περιφέρειά της. Οι κατακόρυφες τάσεις στη βραχομάζα είναι, γενικά, συνάρτηση του ύψους του ανοίγματος, του χρόνου και

της πυκνότητας του πετρώματος. Οι οριζόντιες τάσεις ποικίλλουν αρκετά και στην περίπτωση που αυτές προκαλούνται τεκτονικά ή με κάποιο άλλο τρόπο μπορούν να φθάσουν στην ίδια τάξη μεγέθους με τις αντοχές του πετρώματος. Ανάλογα με τις ιδιότητες της βραχομάζας, μπορεί να εμφανιστεί αστοχία και κατάρρευση του ανοίγματος. Έτσι κατά την εκσκαφή του ανοίγματος δημιουργείται μια ανακατανομή των τάσεων και ένα νέο εντατικό πεδίο εμφανίζεται γύρω από το άνοιγμα.



Εικόνα 2: Ανακατανομή των τάσεων γύρω από υπόγειο άνοιγμα. (Hoek, 2000).

Πριν την εκσκαφή της σήραγγας οι επιτόπου τάσεις  $\sigma_v$  (κατακόρυφη τάση),  $\sigma_{h1}$  (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο κάθετο στον άξονα της σήραγγας) και  $\sigma_{h2}$  (οριζόντια επιτόπου τάση σε επίπεδο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας) κατανέμονται ομοιόμορφα στο τμήμα του πετρώματος που έχει θεωρηθεί (Εικόνα 2). Μετά την απομάκρυνση του πετρώματος για τη δημιουργία του ανοίγματος, οι τάσεις γύρω από τη σήραγγα αλλάζουν και προκύπτουν νέες τάσεις. Στην Εικόνα 3 φαίνονται οι επιφερόμενες κύριες τάσεις στο περιβάλλον πέτρωμα σε μια κατακόρυφη τομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας.



Εικόνα 3: κατεύθυνση τάσεων στο πέτρωμα όπου  $\sigma_h = 3\sigma_v$  όπου  $\sigma_v$ , κατακόρυφη τάση (Hoek, 2000).

Οι τρεις κύριες τάσεις είναι κάθετες μεταξύ τους, αλλά μπορεί να βρίσκονται υπό κλίση κατά τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης επιτόπου τάσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται καλύτερα στην εικόνα 3 που δείχνει τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια οριζόντια σήραγγα που υπόκειται σε οριζόντια επι τόπου τάση  $\sigma_{h1}$  ίση με  $3\sigma_v$ , όπου  $\sigma_v$  η κατακόρυφη επιτόπου τάση. Οι μεγαλύτερες παύλες αναπαριστούν τις διευθύνσεις της μέγιστης κύριας τάσης, ενώ οι μικρότερες αναπαριστούν τις διευθύνσεις της ελάχιστης κύριας τάσης σε κάθε σημείο.

Η μελέτη των μεγίστων τάσεων, καθώς και των συντελεστών συγκεντρώσεων τάσεων που εμφανίζονται γύρω από κάθε άνοιγμα, λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου επιτυγχάνεται εύκολα από διαγράμματα που προκύπτουν από θεωρητική ανάλυση των εξισώσεων ισορροπίας.

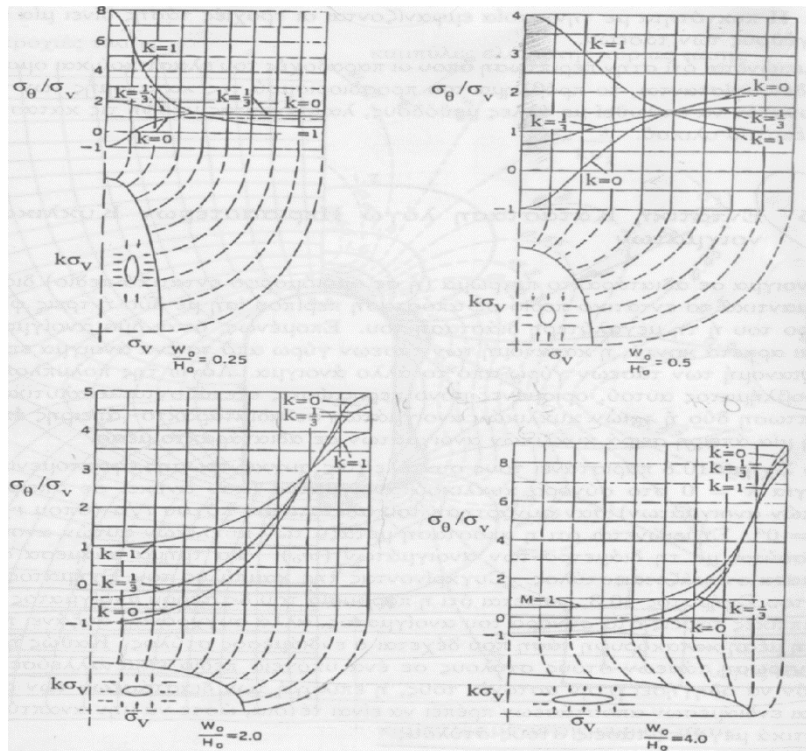
Η εικόνα 4 παρουσιάζει την μεταβολή των εφαπτομενικών τάσεων στο σύνορο ελλειπτικών ανοιγμάτων, για  $k = 0, 1/3, 1$  και για διαφόρους λόγους  $w_0/h_0$  (πλάτος έλλειψης/ ύψος έλλειψης).

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων αυτών προκύπτει ότι τα πλέον επικίνδυνα, σημεία από πλευράς συγκέντρωσης τάσεων, εμφανίζονται στα σημεία αλλαγής της καμπυλότητας της περιμέτρου της εκσκαφής, όπως είναι (Αγιουτάντης, 2002):

- Τα ανώτατα σημεία των ανοιγμάτων, όπου αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις
- Τα πλευρικά σημεία των ανοιγμάτων, όπου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις

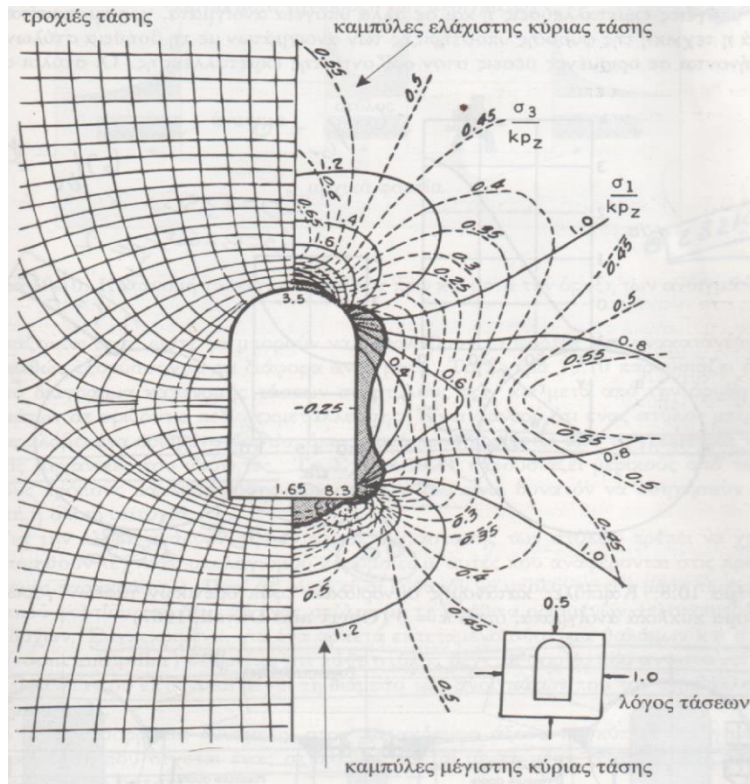
- Οι γωνίες ορθογωνικών ανοιγμάτων ή οι κορυφές ελλειψοειδών, ενώ αντίστοιχα οι τάσεις είναι ελάχιστες στα μέσα ευθυγράμμων συνόρων.

Η εικόνα 5 παρουσιάζεται η κατανομή ισοβαρικών καμπυλών καθώς και η κατανομή των τροχιών τάσης γύρω από ένα ελλειψοειδές άνοιγμα. Οι ισοβαρικές καμπύλες είναι καμπύλες, όπου οι κύριε τάσεις διατηρούν την ίδια τιμή. Υπάρχουν δύο οικογένειες ισοβαρικών καμπυλών, μία για την μέγιστη και μία για την ελάχιστη κύρια τάση. Οι τροχιές τάσεων ή ισοστατικές καμπύλες αποτελούν ένα ορθογώνιο σύστημα καμπυλών, οι διευθύνσεις των οποίων σε κάθε σημείο ταυτίζονται με τις διευθύνσεις των κυρίων αξόνων. Η πυκνότητα με την οποία εμφανίζονται οι τροχιές τάσης δίνει μια ένδειξη του μεγέθους των τάσεων (Αγιουτάντης, 2002).



Εικόνα 4: Καμπύλες κατανομής συνοριακών εφαπτομενικών τάσεων γύρω από ελλειπτικό άνοιγμα για εντατικό πεδίο όπου  $k=0, 1/3, 1$  για διαφόρους λόγους πλάτους προς ύψος έλλειψης (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Obert and Duvall, 1967)



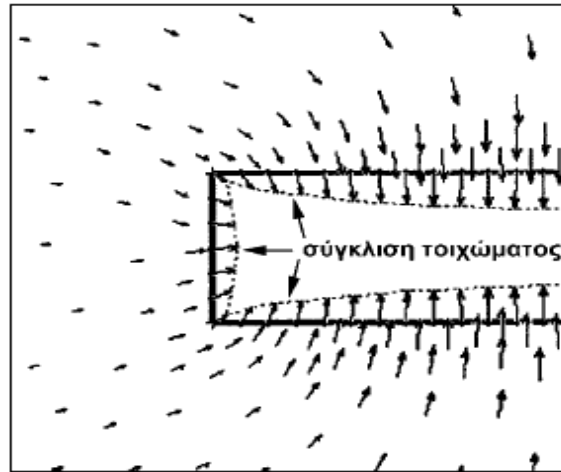


Εικόνα 5: Καμπύλες ισοτασικών καμπυλών και τροχιών τάσης γύρω από υπόγειο άνοιγμα (Αγιουτάντης, 2002 πηγή: Hoek and Brown, 1992)

### 1.5 Παραμορφώσεις κατά την προχώρηση της σήραγγας (καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης)

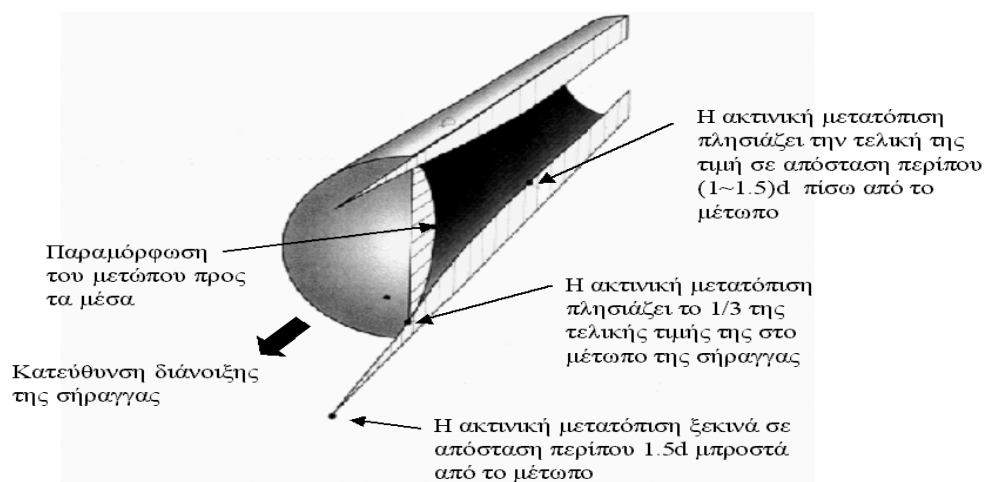
Κατά τη διάνοιξη σήραγγας οι μετατοπίσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, δηλαδή πριν αυτό φτάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση (Καββαδάς, 2000). Στην Εικόνα.6 φαίνεται η παραμόρφωση της βραχώμαζας κατά την προώθηση μιας κυκλικής σήραγγας μέσα σε υδροστατικό τασικό πεδίο ( $K=1$ ) που βρίσκει εφαρμογή σε κατακόρυφο φρέαρ και σε διάνοιξη σε έντονο ανάγλυφο, μέσω μιας τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Το σχήμα δείχνει τα διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα καθώς και τη μορφή της παραμόρφωσης της σήραγγας.

Η παραμόρφωση της βραχώμαζας ξεκινά σε απόσταση περίπου  $1.5d$  μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, όπου  $d$  είναι η διάμετρος της σήραγγας και αποκτά τη μέγιστη τιμή της σε απόσταση περίπου  $(1 \div 1.5)d$  μπροστά από το μέτωπο. Στη θέση του μετώπου το  $1/3$  περίπου της συνολικής σύγκλισης έχει ήδη σημειωθεί και το μέτωπο της σήραγγας μετατοπίζεται προς τα μέσα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7. Κατά πόσο οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν ή όχι προβλήματα ευστάθειας στη σήραग्γα εξαρτάται από τον βαθμό αντοχής της βραχώμαζας στο επίπεδο των επί τόπου τάσεων.



Εικόνα 6: Διανύσματα μετατόπισης μέσα στη βραχώμαζα που περιβάλλει προωθούμενη κυκλική σήραγγα (Hoek, 1980)

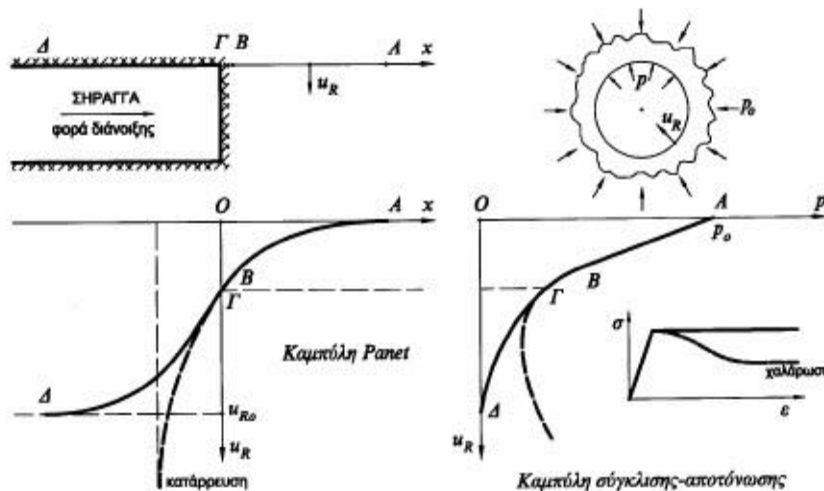
Εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει (Σακελαρίου, 2005).



Εικόνα 7: Μορφή της παραμόρφωσης στη βραχώμαζα που περιβάλλει μια υπό διάνοιξη σήραγγα (Hoek, 2000).

Κατά τη διάνοιξη σιηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Η εικόνα 8, παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραγγα, σε διάγραμμα  $x - uR$  όπου ( $uR$ ) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και ( $x$ ) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό ( $uRO$ ), της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Συνεπώς, σε κάθε θέση ( $x$ ) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας

αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης  $x-uR$  μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος ( $uR$ ). Για τη συγκεκριμένη τιμή ( $uR$ ) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης ( $p$ ), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση ( $p_0$ ). Η πίεση ( $p$ ) ονομάζεται “ισοδύναμη εσωτερική πίεση” επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση ( $x$ ) από το μέτωπο της σήραγγας. Σημειώνεται ότι εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.



Εικόνα 8: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα. (Καββαδάς, 2004)

Η συσχέτιση της σύγκλισης ( $uR$ ) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση ( $x$ ) από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης. Σημειώνεται ότι ακόμη και στην περίπτωση όπου η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόζεται ακριβώς στη θέση του μετώπου της σήραγγας, κάποια σύγκλιση έχει ήδη συμβεί (της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης).

Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωσης της βραχόμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ως άνω σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης. Στη συνέχεια εκτιμάται η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης ( $x$ ) από το μέτωπο εκσκαφής. Η σύγκλιση  $uR(x)$  του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε

απόσταση ( $x < 0$ ) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση  $x = 0$ ) δίνεται από την προσεγγιστική σχέση (Panet, 1995):

$$u_R(x) = u_R(0) + [u_{Ra?z} - u_R(0)] \left\{ 1 - \left[ \frac{m}{m + I? \left( \frac{-x}{R} \right)} \right]^2 \right\}$$

Όπου:

$u_{R\infty}$  = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ( $x = -\infty$ ) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Η σύγκλιση μπορεί να υπολογισθεί με αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας για μηδενική τιμή της εσωτερικής πίεσης.

$R$  = η ακτίνα της σήραγγας

$I? = \frac{u_{Ra?z}^e}{u_{Ra?z}}$  = συντελεστής που ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση.

$u_R(0)$  = σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (θέση  $x = 0$ )

$m$  = συντελεστής

Οι τιμές των δύο τελευταίων συντελεστών εξαρτώνται από το συντελεστή υπερφόρτισης της βραχομάζας  $N_s = 2p_o / \sigma_{cm}$  ( $\sigma_{cm}$  = αντοχή της βραχομάζας σε μονοαξονική θλίψη) (Καββαδάς, 2004).

### 1.6 Μέθοδος της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχομάζας

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας από την αρχική τιμή ( $E_o$ ) σε μια μικρότερη τιμή ( $E$ ) σε μια περιοχή της βραχομάζας (συγκεκριμένα: στην περιοχή όπου προβλέπεται να εκσκαφτεί η σήραγγα) προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή ( $p_o$ ) σε μια μικρότερη τιμή ( $p$ ). Επομένως ισχύει ότι (Κωνσταντάς, 2009) :

(α) Η σύγκλιση του τοιχώματος εντός ελαστικού δίσκου ακτίνας ( $R$ ) λόγω ισότροπης πίεσης

(p) είναι:

$$u_R = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)R}{E} p$$

Η μετακίνηση του τοιχώματος μιας κυκλικής οπής ακτίνας ( $R$ ) εντός ελαστικού χώρου λόγω ισότροπης πίεσης στο εσωτερικό της οπής είναι:

$$u_R = \frac{(1 - \nu)R}{E} p$$

Στη συνέχεια θεωρείται ότι η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή της "οπής" από ( $E_o$ ) σε ( $E$ ) προκαλεί μείωση της πίεσης στο τοίχωμα της οπής από ( $p_o$ ) σε ( $p$ ). Είναι προφανές ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της οπής υπολογιζόμενη είτε μέσω του δίσκου είτε μέσω του χώρου που περιβάλλει την οπή θα πρέπει να είναι η ίδια. Συνεπώς:

(α) Σύγκλιση του τοιχώματος του δίσκου:

$$u_{R1} = - \left[ \frac{(1 - \nu)(1 - 2\nu)R}{E_o} p_o - \frac{(1 - \nu)(1 - 2\nu)R}{E} p \right]$$

Σύγκλιση του χώρου που περιβάλλει την οπή:

$$u_{R2} = \frac{(1 + \nu)R}{E_o} p_o - \frac{(1 + \nu)R}{E} p$$

Εξίσωση των δυο συγκλίσεων δίνει:

$$\frac{E}{E_o} = \frac{(1 - 2\nu)\left(\frac{p}{p_o}\right)}{2(1 - \nu) - \left(\frac{p}{p_o}\right)} = \frac{(1 - 2\nu)(1 - \lambda)}{(1 - 2\nu) + \lambda}$$

Τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής της τελευταίας σχέσης φαίνονται στον πίνακα ( $\lambda = 1 - p/p_o$ ) (Καββαδάς, 2004):

Πίνακας 1: Αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) και του συντελεστή χαλάρωσης ( $E/E_o$ ) (Καββαδάς, 2004).

$\lambda$	$p/p_o$	Τιμές του $E/E_o$ για		
		$\nu = 0.25$	$\nu = 0.30$	$\nu = 0.35$
0.20	0.80	0.571	0.533	0.480
0.30	0.70	0.438	0.400	0.350
0.40	0.60	0.333	0.300	0.257
0.50	0.50	0.250	0.222	0.187
0.60	0.40	0.182	0.160	0.133
0.70	0.30	0.125	0.109	0.090
0.80	0.20	0.077	0.067	0.054
0.90	0.10	0.036	0.031	0.025

Ο πίνακας 1 δίνει την αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) και του συντελεστή χαλάρωσης ( $E/E_o$ ) στο εσωτερικό της σήραγγας και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του συντελεστή χαλάρωσης που ισοδυναμεί με κάποια τιμή του συντελεστή αποτόνωσης.

### 1.7 Μακροχρόνια συμπεριφορά της βραχομάζας.

Με την πάροδο του χρόνου, η βραχώμαζα που περιβάλλει ένα υπόγειο έργο υπόκειται σε ερπυστικές παραμορφώσεις με συνέπεια την αύξηση των παραμορφώσεων της βραχώμαζας (π.χ. σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας) εφόσον οι παραμορφώσεις δεν παρεμποδίζονται από έργα υποστήριξης (Καββαδάς, 2004).

Ο βαθμός ερπυσμού της βραχώμαζας ποικίλει μεταξύ πρακτικώς μηδέν (για βραχώμαζες με μεγάλες τιμές του δείκτη RMR) και αρκετά υψηλών τιμών (για βραχώμαζες με πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και εδαφικούς σχηματισμούς). Τυπικά, ο βαθμός ερπυσμού μπορεί να περιγραφεί μέσω του ερπυστικού συντελεστή ( $k$ ) ο οποίος εκφράζει τον ρυθμό της ερπυστικής παραμόρφωσης της βραχώμαζας υπό μονοαξονική θλίψη. Μια σχετικώς υψηλή τιμή του ερπυστικού συντελεστή (που αφορά κυρίως στιφρές-σκληρές αργίλους) είναι  $k = 0.10$ , δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο του χρόνου είναι ίση με το 10% της ελαστικής (αρχικής) παραμόρφωσης. Έτσι, για παράδειγμα, εάν η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση είναι 2%, η παραμόρφωση θα γίνει 2.2% σε ένα έτος, 2.4% εντός δέκα ετών και 2.6% εντός εκατό ετών. Στην περίπτωση παρεμπόδισης ανάπτυξης της ανωτέρω παραμόρφωσης, είναι προφανές ότι θα αυξηθεί η φόρτιση στην επένδυση της σήραγγας (Καββαδάς, 2004).

Το παραπάνω μοντέλο ερπυσμού της βραχώμαζας μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\varepsilon^t = k\varepsilon^e \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \Rightarrow \varepsilon \equiv \varepsilon^e + \varepsilon^t = \varepsilon^e \left[1 + k \log\left(\frac{t}{t_0}\right)\right]$$

όπου  $k$  είναι ο ερπυστικός συντελεστής,  $\varepsilon^t$  είναι η ερπυστική παραμόρφωση τη χρονική στιγμή ( $t$ ),  $\varepsilon^e$  είναι η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση,  $\varepsilon$  είναι η συνολική παραμόρφωση και ( $t_0$ ) είναι ο χρόνος έναρξης των ερπυστικών παραμορφώσεων.

Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι εάν  $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  είναι οι παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_2$  όπου  $t_2 = 10t_1$ , τότε:  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = k\varepsilon^e$ , δηλαδή η αύξηση της παραμόρφωσης ανά λογαριθμικό κύκλο χρόνου είναι ένα ποσοστό ( $k$ ) της ελαστικής παραμόρφωσης.

Εναλλακτικά, η ανάπτυξη ερπυστικών παραμορφώσεων μπορεί να προσομοιωθεί μέσω απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας της βραχώμαζας σε σχέση με τη βραχυχρόνια τιμή του. Στην περίπτωση αυτή, εάν  $E_0 \equiv \frac{\sigma}{\varepsilon^e}$  είναι η βραχυχρόνια



## Υπόγειο εντατικό πεδίο

τιμή του μέτρου ελαστικότητας (τη χρονική στιγμή  $t^0$ ) και  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$  είναι η μειωμένη τιμή

$$E = E_0 \frac{1}{1 + k \log \left( \frac{t}{t_0} \right)}$$

του μέτρου ελαστικότητας τη χρονική στιγμή (t), τότε:

Ειδικότερα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας μετά από n-χρονικούς κύκλους ( $t = 10^n \cdot t_0$ ), θεωρώντας ότι  $t_0 = 1.2$  μήνες (n = 1 για 1 έτος, n = 2 για 10 έτη και n = 3 για 100 έτη) θα είναι:

$$E = E_0 \frac{1}{1 + nk}$$

Τυπικές τιμές εφαρμογής της ανωτέρω σχέσης φαίνονται στον πίνακα 2.2:

Πίνακας 2: Απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού (Καββαδάς, 2004).

Ερπυστικός συντελεστής k	Χρονική περίοδος		
	1 Έτος	10 Έτη	100 Έτη
0.02	0.980	0.961	0.943
0.05	0.952	0.909	0.870
0.10	0.909	0.833	0.769
0.15	0.870	0.769	0.690

Από τον πίνακα 2 φαίνεται ότι η απομείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας λόγω ερπυσμού μπορεί να φθάσει και το 30% στην περίπτωση εδαφών με έντονα ερπυστική συμπεριφορά.

### 2 Μέθοδοι υπόγειας Εκμετάλλευσης με Γομούμενα Μέτωπα

#### 2.1 Εισαγωγή

Το χαρακτηριστικό των μεθόδων εκμετάλλευσης με γομούμενα μέτωπα είναι ο χώρος που μένει κενός έπειτα από την απόληψη μεταλλεύματος και στην συνέχεια πληρώνεται κυρίως με άγονα υλικά. Στην περίπτωση του συμπτυσσόμενου μετώπου, η γόμωση γίνεται από το εξορυσσόμενο μέταλλευμα και χαρακτηρίζεται ως προσωρινή. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η διεργασία της γόμωσης αποτελεί ανεξάρτητη φάση και είναι μόνιμη. Για να γεμίσει το κενό πίσω από τον ελεύθερο χώρο του μετώπου γίνεται απόληψη και τοποθέτηση του άγονου υλικού. Από όλα τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης με γομούμενα έχουν υψηλό κόστος, οπότε η εφαρμογή τους γίνεται μόνο όταν τα μεταλλεύματα θεωρούνται πλούσια ή σε περιπτώσεις που οι επιφανειακές εγκαταστάσεις δεν επιτρέπουν τη δημιουργία καθιζήσεων (εξαιτίας της ύπαρξης οικισμών). Σε κάποιες περιπτώσεις, η εκσκαφή είναι περιορισμένη λόγω της σαθρότητας των πετρωμάτων. Επομένως η λιθογόμωση ακολουθεί το κοίτασμα από κοντά οπότε ανεβαίνει και το κόστος. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν τα πετρώματα χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα, μπορούν να υπάρξουν κενά για λίγο καιρό. Επομένως γίνονται συνδυασμοί και το κόστος μειώνεται. Η τιμή του κόστους μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο όταν η εξόρυξη μας δίνει μεγάλες ποσότητες άγονων. Η στοά που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των άγονων υλικών που χρησιμοποιούνται στη γόμωση, είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η επάνω στοά προσπέλασης. Η βαρύτητα ή η χειρωνακτική εργασία είναι οι τρόποι που γίνεται η τοποθέτησή τους μέσα στο κενό. Στις περιπτώσεις που πρέπει η γόμωση να είναι γρήγορη και εκτεταμένη ταυτόχρονα, το υλικό πλήρωσης μεταφέρεται και αποτίθεται υδραυλικά ή πνευματικά.



### 2.2 Μέθοδος των Ξύλινων Πρισματικών Πλαισίων

#### 2.2.1 Γενικά

Ένα από τα πιο αποτελεσματικά συστήματα υποστήριξης είναι η ξύλινη, εξαιτίας της προσαρμογής τους σε οποιοδήποτε τύπου άνοιγμα και επειδή η εγκατάστασή της γίνεται εύκολα. Αρχικά, η ξύλινη υποστήριξη αποτελούσε τον βασικό τρόπο υποστήριξης, όμως με το πέρασμα του χρόνου αντικαταστάθηκε από την ήλωση και λιθογόμωση. Η ξύλινη υποστήριξη και οι παραλλαγές της απέδειξαν την αξιοπιστία τους εδώ και αρκετά χρόνια, καθώς προσαρμόζονται σε όλες τις μεθόδους εκμετάλλευσης. Η ξύλινη υποστήριξη συνεχίζει να είναι σημαντική και αποτελεσματική στις σύγχρονες εκμεταλλεύσεις. Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των μεταλλικών πλαισίων που χρησιμοποιούνται ως μέσο υποστήριξης. Η ξυλοδεσμία είναι ένας σημαντικός παράγοντας αυτής της μεθόδου, αφού δημιουργεί συνθήκες καλύτερης επαφής μεταξύ του πετρώματος της οροφής, των τοιχωμάτων και των πλαισίων.

#### 2.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ξύλινης Υποστήριξης

Όταν στο σύστημα υποστήριξης χρησιμοποιούμε ξυλεία, τότε διαπιστώνουμε ότι χαρακτηρίζεται από κάποιες ιδιότητες, όπως η προστασία από τις καταπτώσεις πετρωμάτων και κατά συνέπεια η διάθεση ασφαλούς περιβάλλοντος εργασίας στα διάφορα μέτωπα εκμετάλλευσης του κοιτάσματος.

Η διάθεση αρχικού κεφαλαίου για την αγορά εξοπλισμού για την κατεργασία της ξυλείας δεν είναι απαραίτητη. Παρόλα τα πλεονεκτήματα, η χρήση της ξύλινης υποστήριξης έχει και κάποια μειονεκτήματα. Αρχικά, αναφέρουμε το υψηλό κόστος της ξυλείας. Επίσης, το εργατικό προσωπικό που θα αναλάβει την τοποθέτηση θα πρέπει να είναι εξειδικευμένο λόγω των αυξημένων απαιτήσεων. Τέλος, προσοχή πρέπει να δοθεί στην ιδιότητα του εύφλεκτου χαρακτήρα της που μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά.

### 2.3 Μέθοδος των Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων

#### 2.3.1 Χαρακτηριστικά Συστήματος και Σφαίρα Εφαρμογής.

Η πλήρωση του εξορυσσόμενου χώρου με πληρωτικό υλικό αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό των συστημάτων κοπής και λιθογόμωσης. Τα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης θα πρέπει να διαχωρίζονται και να αποτελούν κάτι διαφορετικό από τα συστήματα πλήρωσης των θαλάμων. Τα συστήματα της μετέπειτα πλήρωσης χρησιμοποιούνται σε ανοιχτά μέτωπα, σε συστολικά και σε συνδυαστικά συστήματα εξόρυξης. Ο λόγος της χρήσης της είναι για να μην υπάρξουν μετακινήσεις της βραχομάζας μετά την εξόρυξη και για την δημιουργία ευνοϊκότερων συνθηκών για την απόληψη των στηλών που χρησιμοποιούνται ως μέτρο ως μέτρο υποστήριξης. Στην περίπτωση αυτή το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται είναι σκληρό. Με αυτό τον τρόπο οι απώλειες του κοιτάσματος κατά την διάρρηξη ελαχιστοποιούνται. Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων κοπής και λιθογόμωσης είναι η εξασφάλιση υψηλού βαθμού απόληψης, η ασφαλής εργασία ακόμα και κάτω από δύσκολες γεωλογικές συνθήκες, ο αποκλεισμός της αυτοανάφλεξης του μεταλλεύματος και κατά τη διάρκεια της εξόρυξης του κοιτάσματος σε μεγάλα βάθη, αποτελούν ένα αποτελεσματικό μέσο για την υποστήριξη του πετρώματος. Η αποτελεσματικότητα των παραπάνω συστημάτων αυξάνεται σημαντικά με την χρήση αυτοκινούμενου εξοπλισμού, φθηνών υλικών πλήρωσης και υδραυλικών σωληνώσεων.

Τα διάφορα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης διαφέρουν ως προς την κατεύθυνση και το σχήμα της στοάς και ως προς τη μέθοδο απόληψης του λιθογομωτικού υλικού. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω διακρίνουμε τα παρακάτω συστήματα:

- Συστήματα οριζόντιας κοπής με λιθογόμωση
- Συστήματα κεκλιμένης κοπής με λιθογόμωση
- Συστήματα για εξόρυξη λεπτών κοιτασμάτων με ξεχωριστά μέτωπα και λιθογόμωση
- Συστήματα κοπής με κατερχόμενη φορά με λιθογόμωση
- Συστήματα επιμήκους ευθύγραμμου μετώπου με λιθογόμωση.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι κοπής και λιθογόμωσης πρέπει να υπάρχουν οι ακόλουθες συνθήκες:

1. Τα σώματα του μεταλλεύματος να έχουν μικρό πάχος (αρκετά cm έως 6m). Η απαιτούμενη ποσότητα υλικού πλήρωσης για ένα μικρό μέτωπο μπορεί να αποκτηθεί με τη δημιουργία μόνιμων και λειτουργία ανάπτυξης, όπως και με παράλληλη κοπή των τοιχωμάτων στην περιοχή του μετώπου. Η μέθοδος της κοπής και λιθογόμωσης χρησιμοποιείται σε λεπτά κοιτάσματα που τα περιβάλλοντα πετρώματα είναι ασταθή. Τα κοιτάσματα μεγάλου πάχους επίσης με ασταθή περιβάλλοντα πετρώματα εξορύσσονται με συστήματα κατακρήμνισης (κοπή και κατακρήμνιση). Τα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης χρησιμοποιούνται σε κοιτάσματα με μεγάλο πάχος, για να αποφευχθούν οι μετακινήσεις των υπερκείμενων και οι μετακινήσεις στην επιφάνεια της γης.
2. Τα μεταλλευτικά σώματα βυθίζονται απότομα. Όταν η βύθιση είναι επίπεδη δυσκολεύει η διευθέτηση της πλήρωσης του μετώπου. Γι' αυτό το λόγο, στα μεταλλεύματα που βυθίζονται επίπεδα δεν χρησιμοποιούνται συχνά τα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης.
3. Ευσταθή μεταλλεύματα. Όταν η ξυλεία που χρησιμοποιείται είναι κανονική, η μέθοδος έχει να κάνει με τη μέθοδο υποστήριξης και λιθογόμωσης.
4. Κατά κανόνα ασταθή περιβάλλοντα πετρώματα. Για τα μεταλλεύματα που χαρακτηρίζονται ως ανθεκτικά σε περιβάλλον πέτρωμα που είναι σταθερό, χρησιμοποιούνται οι παραγωγικές μέθοδοι εξόρυξης, όπως είναι για παράδειγμα η κενού και συμπτυσσόμενου μετώπου. Στην περίπτωση που κριθεί αναγκαία η χρήση των συστημάτων κοπής και λιθογόμωσης η ευστάθεια των τοιχωμάτων δεν επηρεάζει. Οι παράγοντες που κρίνουν αναγκαία τη χρήση της μεθόδου αυτής είναι η ανάγκη να υπονομευτούν τα τοιχώματα, η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων εγκλεισμάτων ή άγονων πετρωμάτων στο μεταλλευτικό σώμα και τέλος η αποφυγή μετακινήσεων στο περιβάλλον πέτρωμα.
5. Υψηλή οικονομική αξία του μεταλλεύματος ώστε να μπορεί να καλυφθεί και με το παραπάνω το μεγάλο κόστος παραγωγής.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Για τις διαφορετικές εμφανίσεις και τα διαφορετικά σχήματα του μεταλλεύματος χρησιμοποιούνται και διάφορες παραλλαγές της μεθόδου. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους, όπως πχ τα συστήματα των κεκλιμένων κοπών, δεν είναι εφαρμόσιμες αν το πάχος του μεταλλευτικού σώματος διαφέρει απότομα, υπάρχουν επιπεδοποιήσεις τοπικά, τεκτονικές διαταραχές, μεγάλα εγκλείσματα και συγκροτήματα από άγονο πέτρωμα. Στις περισσότερες παραλλαγές του συστήματος κοπής και λιθογόμωσης γίνεται διαχωρισμός του άγονου πετρώματος σπασμένο από κοινού με το μέταλλευμα, ώστε να παραμείνει το προηγούμενο στην περιοχή του μετώπου. Το μέταλλευμα δύναται να σπαστεί ξεχωριστά από το άγονο πέτρωμα. Αυτά τα συστήματα κάποιες φορές χρησιμοποιούνται στα κοιτάσματα σιδηροπυρίτη, καθώς οι μέθοδοι κατακρήμνισης μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές.

Στην περίπτωση των υπόγειων μεταλλείων συνήθως χρησιμοποιούνταν η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων. Για ένα χρονικό διάστημα δεν χρησιμοποιούνταν όσο η μέθοδος των κενών μετώπων. Όταν σε διάφορα μεταλλεία έφτασαν σε μεγάλα βάθη, όπου ήταν ανάγκη να υπάρχουν και να μένουν ανοιχτά κενά για μεγάλες χρονικές περιόδους, τότε άρχισε να χρησιμοποιείται και πάλι αυτή η μέθοδος. Η μέθοδος των κενών μετώπων κρίθηκε ακατάλληλη, γιατί έπρεπε να υπάρχουν υψηλές περιεκτικότητες μεταλλεύματος και αυτή δεν τις παρείχε λόγω της μεγάλης πρόσμιξης μεταλλεύματος και στείρων.

Είναι μια μέθοδος που είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε οποιοδήποτε κοιτάσμα και ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

- Αφαίρεση μιας στρώσης(2,4-3m) από την κορυφή
- Καθώς πέφτει το μέταλλευμα στο δάπεδο, επένδυση και κοχλίωση.
- Το σπασμένο μέταλλευμα μεταφέρεται μέσω δίοδων προς το κατώτερο επίπεδο (αφού έχει ασφαλιστεί η οροφή)
- Επεκτείνονται προς τα επάνω οι δίοδοι μεταφοράς μετά την απομάκρυνση του μεταλλεύματος
- Το μέτωπο γεμίζει με λιθογομωτικό υλικό.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Αυτή η μέθοδος έχει καλύτερη εφαρμογή όταν τα κοιτάσματα όταν τα κοιτάσματα βυθίζονται έντονα με σημαντική κατακόρυφη έκταση ή σε κάποιες περιοχές μεταλλεύματος που η εκμετάλλευση πρέπει να είναι εκλεκτική. Επίσης εφαρμόζεται σε περιοχές μεταλλεύματος όπου οι συνθήκες αντοχής των περιβαλλόντων πετρωμάτων που επικρατούν είναι χαμηλές ή σε κάποια κοιτάσματα που η αξία του μεταλλεύματος είναι τέτοιο ώστε να εξισορροπηθεί το υψηλό κόστος που έχει η συγκεκριμένη μέθοδος εκμετάλλευσης.

### 2.3.2 Πεδίο Εφαρμογής

Σε όλα τα κοιτάσματα με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη δύναται να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος. Το κοίτασμα θα πρέπει να επιτρέπει την ταυτόχρονη προσπέλαση από το δάπεδο και την οροφή καθώς επίσης και από κανονικά ενδιάμεσα διαστήματα κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση. Αν και όπως είπαμε παραπάνω αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα κοιτάσματα, εφαρμόζεται καλύτερα σε κοιτάσματα όπου το μέταλλευμα έχει συνέχεια και εκεί όπου οι περισσότεροι τύποι μαζικής εξόρυξης θα προκαλούσαν μεγάλη πρόσμιξη στείρων. Στις περιοχές όπου η μεταλλοφορία διακόπτεται συχνά, η δυνατότητα συνεχούς και εκτεταμένης δειγματοληψίας κατά την εξόρυξη καθιστά τη μέθοδο πολύ αποτελεσματική. Αυτή η δυνατότητα κάνει προαιρετική την απαίτηση δειγματοληψίας πριν από την έναρξη της παραγωγής. Το μοναδικό χαρακτηριστικό που θα πρέπει να έχει το μέταλλευμα είναι η επαρκής αντοχή, ώστε να μπορεί να γίνει κοχλίωση κατά την υποστήριξή τους στους διάφορους κύκλους εξόρυξης και λιθογόμωσης.

Αν θέλουμε να προκύψει προϊόν με ελάχιστη πρόσμιξη σε σχέση με τις άλλες μεθόδους ανοιχτού μετώπου, θα πρέπει να δίνεται σημασία στον καλό σχεδιασμό, τη συχνή δειγματοληψία καθώς και στην προσεκτική επίβλεψη.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Αν συνοψίσουμε όλα τα παραπάνω, οι προϋποθέσεις πλεονεκτικής εφαρμογής είναι:

1. Μεγάλη έως μέτρια ανθεκτικότητα του μεταλλεύματος. Στα μεταλλεύματα που είναι σαθρά απαιτείται πυκνή υποστύλωση της οροφής του μετώπου, η οποία όμως δυσκολεύει την εργασία.
2. Οποιαδήποτε σύσταση του μεταλλεύματος. Ο διαχωρισμός των στείρων γίνεται εύκολα, με τη διαλογή των άγονων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη λιθογόμωση. Οι διάφορες ποιότητες του μεταλλεύματος διακρίνονται εύκολα.
3. Μετάλλευμα υψηλής αξίας. Οι απώλειες είναι ασήμαντες γιατί η απόληψη είναι σχεδόν πλήρης.
4. Κάθε ανθεκτικότητα των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Όταν το περιβάλλον πέτρωμα είναι ασθενές τότε έχουμε πρόσμιξη στείρων, επομένως θα χρειαστεί και διαλογή.
5. Όταν το περιβάλλον πέτρωμα είναι κανονικό ή ανώμαλο. Όταν υπάρχει ασάφεια μεταξύ του περιβάλλοντος πετρώματος και του μεταλλεύματος μπορούμε να την αντιμετωπίσουμε εύκολα.
6. Το πάχος του κοιτάσματος να είναι από 0,8 έως 10m (ή κ παραπάνω).
7. Ελάχιστη κλίση  $45^\circ$ . Όταν η κλίση είναι μικρότερη των  $45^\circ$ , δεν πραγματοποιείται κάθοδος του μεταλλεύματος μέσα από τα φρέατα απαγωγής.

Όταν επικρατούν οι παραπάνω συνθήκες το κύριο πεδίο εφαρμογής της μεθόδου είναι τα φλεβοειδή ή στρωματοειδή κοιτάσματα που έχουν μεγάλη κλίση και το μετάλλευμα είναι ανθεκτικό, ώστε η υποστήριξη που θα χρειαστεί για την οροφή του μετώπου να είναι ένας σχετικά μικρός αριθμός στύλων από στρογγυλή ξυλεία που στηρίζονται πάνω στη λιθογόμωση.

### 2.3.3 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Κατερχόμενη Φορά

Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρεία Inco Ltd τη δεκαετία του 1950, για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων νικελίου στον Καναδά και συγκεκριμένα στην περιοχή Sudbury. Στη συνέχεια μεγάλες μεταλλευτικές εταιρείες την χρησιμοποίησαν, αφού πρώτα έγιναν βελτιώσεις.

Αυτή η μέθοδος αποτελεί μια από τις πιο δαπανηρές αλλά ασφαλείς μεθόδους εκμετάλλευσης. Εφαρμόζεται σπάνια σε εκμεταλλεύσεις που είναι υπόγειες, εκτός αν οι γεωλογικές συνθήκες ή άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ευαισθησία λόγω κατοίκησης της περιοχής, η εκμετάλλευση από υφιστάμενες λίμνες, θάλασσες κλπ, κάνουν αναγκαία την εφαρμογή της ώστε να αποφευχθούν διαταράξεις των πετρωμάτων που υπέρκεινται του κοιτάσματος, επιφανειακές καθιζήσεις κλπ. Όταν γίνεται εξόρυξη του μεταλλεύματος δημιουργούνται κάποια κενά, τα οποία συμπληρώνονται με υλικά που αποτελούνται από τσιμέντο, νερό και τέλμα από τον εμπλουτισμό. Όταν αναμιχθεί επαρκώς τα υλικά που προαναφέραμε, μεταφέρονται υδραυλικά στα μέτωπα που είναι έτοιμα προς λιθογόμωση (και στα εξορυσσόμενα). Χρησιμοποιείται ένα μεταλλικό δίκτυο αγωγών προκειμένου να γίνει υδραυλικά η γόμωση των στοών.

Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών με λιθογόμωση είναι μια ευέλικτη μέθοδος και εύκολα προσαρμόσιμη στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος. Η μέθοδος αυτή παρέχει ασφάλεια για περιοχές όπου το μέταλλευμα και τα πετρώματα που το περιβάλλουν έχουν αντοχή μέτρια έως χαμηλή ή όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη διατάραξη της βραχομάζας που περιβάλλει το κοίτασμα. Με την χρήση αυτής της μεθόδου διασφαλίζονται συνθήκες εργασίας στις υπόγειες εγκαταστάσεις που είναι ασφαλείς και ταυτόχρονα προστατεύεται και το περιβάλλον όσο το δυνατόν περισσότερο γίνεται.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Συγκεκριμένα, με τη χρήση της λιθογομωτικής μεθόδου μπορούμε να εξασφαλίσουμε τα εξής:

- Διατηρούνται σταθερά τα πετρώματα που βρίσκονται πάνω από την μεταλλοφορία. Επομένως, αποφεύγεται η καθίζηση ή οι ρωγματώσεις τους.
- Περιορίζονται στον ελάχιστο βαθμό οι ανακατανομές των τάσεων των περιβαλλόντων πετρωμάτων.
- Ελαχιστοποιείται ο αέρας που κυκλοφορεί στις περιοχές του μεταλλείου που έχουν εξοφληθεί.
- Αποφεύγεται η κατείσδυση νερών της επιφάνειας στο χώρο που γίνεται η εκμετάλλευση, επομένως αποφεύγεται και η επαφή τους με το μετάλλευμα που δεν έχει αποληφθεί.
- Οι κινήσεις των υπόγειων υδάτων περιορίζονται όσο το δυνατόν παραπάνω και έπειτα αποστραγγίζονται.
- Αποφυγή δημιουργίας οξειδωτικών συνθηκών του μεταλλεύματος που δεν έχει αποληφθεί ακόμη. Επομένως, διατηρείται η ποιότητα των υπόγειων νερών του μεταλλείου εξαιτίας της όξινης απορροής.
- Ανακτήσεις σε εξορυσσόμενο μέταλλευμα από 90 έως 95% με ποσοστό στείρων στο 10%.
- Λόγω της χαμηλής αραίωσης του μεταλλεύματος, η ποσότητα των στερεών καταλοίπων υπό την μορφή τελμάτων, που παράγονται κατά την επεξεργασία και τον εμπλουτισμό είναι περιορισμένη.
- Τα κενά που δημιουργούνται κατά την εξόρυξη πληρώνονται με ένα μίγμα τσιμέντου, νερού και τελμάτων εμπλουτισμού. Έτσι, το μεγαλύτερο ποσοστό των αδρομερών τελμάτων που δημιουργήθηκαν από τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος ανακυκλώνεται στα έργα ως συστατικό του λιθογομωτικού υλικού. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η απόθεση των τελμάτων εμπλουτισμού.



## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Σημαντικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου αποτελεί το υψηλό κόστος, σε σχέση με άλλες μεθόδους εκμετάλλευσης, ανά τόνο εξορυσσόμενου μεταλλεύματος, σε σχέση με τις τιμές των προϊόντων που παράγονται. Η πλήρης μηχανοποίηση των επί μέρους φάσεων της εκμετάλλευσης αποτελεί έναν τρόπο για να περιοριστεί το υψηλό κόστος της παραπάνω μεθόδου.

### 2.3.4 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Ανερχόμενη Φορά

Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών. Αν συγκρίνουμε αυτή τη μέθοδο με τις υπόλοιπες μεθόδους εκμετάλλευσης με λιθογόμωση, διαπιστώνουμε ότι υπερτερεί ως προς την προστασία του περιβάλλοντος, εκτός από τα πλεονεκτήματα των γενικών αρχών των μεθόδων λιθογόμωσης που περιλαμβάνουν:

1. Διατηρείται η σταθερότητα των υπερκείμενων του μεταλλεύματος πετρωμάτων. Επίσης, αποφεύγεται ο κίνδυνος καθιζήσεων και ρωγματώσεων.
2. Περιορίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι ανακατανομές των τάσεων των περιβαλλόντων πετρωμάτων.
3. Ελαχιστοποίηση του αέρα που κυκλοφορεί στις περιοχές του μεταλλείου που έχουν εξοφληθεί.
4. Αποφεύγεται η κατείσδυση επιφανειακού νερού στο χώρο της εκμετάλλευσης του μεταλλεύματος. Αποφυγή επίσης της επαφής τους με το μέταλλευμα που δεν έχει αποληφθεί ακόμα.
5. Περιορίζονται οι κινήσεις των υπόγειων υδάτων και αποστραγγίζονται.
6. Αποφυγή της δημιουργίας οξειδωτικών συνθηκών του μεταλλεύματος που δεν έχει αποληφθεί ακόμα. Έτσι δεν υποβαθμίζεται η ποιότητα των υπόγειων νερών του μεταλλείου εξαιτίας της όξινης απορροής.
7. Περιορίζεται η ποσότητα των στείρων καταλοίπων που δημιουργούνται κατά τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος.
8. Αξιοποιούνται τα τέλματα που δημιουργήθηκαν από την διεργασία του εμπλουτισμού του μεταλλεύματος καθώς χρησιμοποιούνται ως συστατικό του υλικού λιθογόμωσης στα υπόγεια έργα.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Υπάρχουν και άλλα θετικά χαρακτηριστικά. Κάποια είναι τα παρακάτω:

- Η πλήρωση των κενών με λιθογομωτικό υλικό πρέπει να είναι άμεση , γιατί υπάρχει αλληλουχία εκτέλεσης των εργασιών όρυξης των στοών εκμετάλλευσης, για να δημιουργηθεί το δάπεδο εργασίας για τον εξοπλισμό των μηχανημάτων εξόρυξης του μεταλλεύματος από τον αμέσως ανώτερο όροφο. Επομένως, λόγω της διαδικασίας παραγωγής δεν είναι δυνατό να παραμένουν ανοιχτά τα ανοίγματα της εκμετάλλευσης για μεγάλες χρονικές περιόδους, γιατί αλλιώς δεν γίνεται να περάσουμε στην εκμετάλλευση του επόμενου υπερκείμενου ορόφου.
- Εξαιτίας του σχεδιασμού της μεθόδου, η πλήρωση των κενών φτάνει το 100%, τα οποία στη συνέχεια αποτελούν το δάπεδο εργασίας για την απόληψη μεταλλεύματος από τον όροφο που βρίσκεται υψομετρικά πιο ψηλά.
- Η πιθανότητα κατάρρευσης του κενού εξαιτίας της εξόρυξης μειώνεται σημαντικά λόγω της μείωσης των διαστάσεων των θαλάμων που βρίσκονται υπό εκμετάλλευση. Επομένως, εξαιτίας της μείωσης των διαστάσεων των θαλάμων υπάρχει βελτίωση των συνθηκών φυσικής ευστάθειάς τους, οπότε μειώνεται και η ανάπτυξη της «άτονης» ζώνης πάνω από τα ανοίγματα και οι συγκλίσεις αυτών. Παράλληλα μειώνονται σημαντικά τα φαινόμενα υπερφόρτισης της βραχομάζας εξαιτίας των τάσεων αφού εξασφαλίζεται τασική ανακατανομή γύρω από την υπόγεια εκσκαφή.

### 2.3.5 Διαφορές Μεθόδων

Αυτή η μέθοδος είναι αντίστοιχη της κατερχόμενης. Παρουσιάζουν, όμως, τις παρακάτω διαφορές:

1. Γενικά η φορά απόληψης των οροφών που εκμεταλλεύονται γίνεται από τους ορόφους που βρίσκονται χαμηλότερα προς αυτούς που βρίσκονται ψηλότερα.
2. Στους ψηλότερους ορόφους το μέταλλευμα εξορύσσεται κάτω από συνθήκες που είναι πιο ευνοϊκές, γιατί υπάρχει μια επιπλέον ελεύθερη επιφάνεια.
3. Εξαιτίας της αλληλουχίας των εργασιών που εκτελούνται, το λιθογομωτικό υλικό πληρώνει το 100% των κενών που δημιουργούνται έπειτα από την

εξόρυξη του μεταλλεύματος. Στην ανερχόμενη φορά μέθοδο πληρείται το 82,5% των κενών.

4. Χρησιμοποιείται το κατάλληλο υλικό λιθογόμωσης για την πλήρη λιθογόμωση του ορόφου που έχει εξοφληθεί από την στοά περιχάραξης του υπερκείμενου ορόφου. Αφού περάσει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να στερεοποιηθεί το λιθογομωτικό υλικό, το δάπεδο που προκύπτει από το υλικό αυτό είναι το δάπεδο πάνω στο οποίο θα κινηθεί ο μηχανικός εξοπλισμός για την εκμετάλλευση του υπερκείμενου ορόφου.

### 2.3.6 Σχεδιασμός Εκμετάλλευσης

Η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών είναι η πιο αποτελεσματική για την εκμετάλλευση συγκεκριμένου κοιτάσματος. Θα πρέπει όμως να υπολογιστεί το ποσοστό του χαμηλής τιμής υλικού λιθογόμωσης που μπορεί να εξασφαλιστεί καθώς επίσης και η εύρεση ενός τρόπου μεταφοράς που θα είναι αποτελεσματικός. Το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το υδραυλικά μεταφερόμενο απόρριμα από τις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού. Αυτό βέβαια δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση εξαιτίας της θέσης που βρίσκονται οι εγκαταστάσεις και της ποιότητας αυτού. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να γίνει χρήση της λιθογόμωσης σε ξηρή μορφή. Ο παράγοντας που θα καθορίσει το υλικό της λιθογόμωσης και τον μηχανικό εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί για να γίνει απόθεσή του είναι το αν θα χρειαστεί ένα δάπεδο ή ένα κάλυμμα ώστε να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η πρόσμιξη στείρου υλικού στην απόληψη του μεταλλεύματος.

Ο μηχανικός εξοπλισμός πρέπει να επιλέγεται έγκαιρα, αν θέλουμε να γνωρίζουμε το ύψος του έργου ανάπτυξης που απαιτείται ώστε να φτάσει ένα μέτωπο σε παραγωγή και το μέγεθος των ανοιγμάτων που αυτό απαιτεί. Ο εξοπλισμός φόρτωσης καθορίζεται από τις διαστάσεις και τη συνέχεια της μεταλλοφορίας. Όταν χρησιμοποιείται δεσμευμένος εξοπλισμός, τα απαιτούμενα έργα ανάπτυξης γίνονται λιγότερα. Αν η συνέχεια του κοιτάσματος μας επιτρέπει τη χρήση συστήματος ράμπας για την κυκλοφορία του εξοπλισμού. Τότε θα επιτευχθεί συνεχής εξόρυξη. Αυτό σημαίνει ότι παρόλη την αύξηση του κόστους θα υπάρξει ελαχιστοποίηση της κυκλικής φύσης της παραγωγής.

Ανάλογα με την αντοχή του τοιχώματος του κοιτάσματος και από τον αριθμό των απαιτούμενων κοχλιώσεων εξαρτάται το ύψος του τμήματος εκμετάλλευσης. Αφού καθοριστούν αυτά, σειρά έχει η επιλογή του διατρητικού εξοπλισμού. Ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του εξοπλισμού παραγωγής και τον τύπο του λιθογομωτικού υλικού καθορίζεται ο αριθμός και το μέγεθος των διόδων του μεταλλεύματος. Όλες οι εργασίες εκτελούνται από τους εργαζομένους μέσα στο μέτωπο και πρέπει να γίνεται πρόβλεψη ώστε ο αερισμός να είναι αποτελεσματικός.

### 2.3.7 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου

Ακολουθούν παρακάτω τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων:

1. Ο βαθμός απόληψης του μεταλλεύματος συνήθως ξεπερνάει το 95%.
2. Η δειγματοληψία του όγκου του μεταλλεύματος που λαμβάνει χώρα κατά την εξόρυξη του είναι συνεχής και εκτεταμένη.
3. Πριν από την έναρξη της εκμετάλλευσης η ανάπτυξη είναι ελάχιστη.
4. Για την μείωση της πρόσμιξης στείρου υλικού μπορεί να εφαρμοστεί εκλεκτική εκμετάλλευση.
5. Η προσαρμοστικότητα της μεθόδου κάνει εφικτή την εκμετάλλευση έντονα βυθιζόμενων κοιτασμάτων.
6. Η πρόσμιξη και τα τοιχώματα ελαχιστοποιούνται από μικρά ανοίγματα.
7. Σε περίπτωση που χρειαστεί μπορεί να γίνει άμεση μετάβαση σε άλλη μέθοδο.
8. Το κόστος επένδυσης του μηχανικού εξοπλισμού είναι σχετικά μικρό.
9. Η διατάραξη της ισορροπίας του πετρώματος της οροφής είναι πολύ μικρή, οπότε έχουμε και περιορισμό των καθιζήσεων.
10. Η παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του κοιτάσματος είναι υψηλή.

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που αντισταθμίζουν όλα τα παραπάνω:

1. Η παραγωγή του μεταλλεύματος είναι κυκλική.
2. Το προσωπικό πρέπει να είναι καλά εκπαιδευμένο και η εργασία να είναι μεγάλης έντασης.
3. Σε σχέση με κάποιες άλλες μεθόδους οι εκτάσεις μηχανοποίησης είναι μικρές.
4. Υπάρχουν κάποια προβλήματα ασφάλειας, γιατί οι εργασίες θα πρέπει να γίνονται σε διαταραγμένο πέτρωμα λόγω της πρόσφατης ανατίναξης.
5. Το κόστος παραγωγής είναι υψηλό και η χρήση της μεθόδου συμφέρει μόνο όταν το μέταλλευμα εκμετάλλευσης είναι υψηλής αξίας.
6. Ο βαθμός ελέγχου της οροφής πρέπει να είναι υψηλός.
7. Ο αερισμός εκτός από δύσκολος είναι και δαπανηρός.

### 2.4 Μέθοδοι Λιθογόμωσης

#### 2.4.1 Σχεδιασμός Λιθογόμωσης Μεταλλείου

Οι προϋποθέσεις που πρέπει να εξετάζονται από τον σχεδιασμό του υλικού λιθογόμωσης για τις διάφορες εργασίες στο μέτωπο είναι δύο. Η πρώτη προϋπόθεση είναι τα διάφορα κριτήρια για αυτό-υποστήριξη (κάθετα ή οριζόντια ανοίγματα) που πρέπει να πληρεί η επί τόπου πληρωτική μάζα ώστε να είναι δυνατή η εκσκαφή παρακείμενων πετρωμάτων. Η δεύτερη προϋπόθεση είναι η λήψη του λιθογομωτικού υλικού ως ένα δομικό στοιχείο που είναι λειτουργικό μέσο μέσα στο μεταλλείο. Ο πλευρικός περιορισμός των στύλων ώστε να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης, η πρόβλεψη της στήριξης στα όρια της στοάς και άλλες λειτουργίες εξυπηρετούνται από τον σχεδιασμό της λιθογόμωσης. Για να μπορέσουμε να έχουμε ευσταθή απόδοση, ο σχεδιασμός της λιθογόμωσης περιλαμβάνει ανάλυση των τάσεων και των μετακινήσεων στη μάζα πλήρωσης. Σύμφωνα με τη μελέτη των Barrett et al. (1978) για τα λιθογομωτικά υλικά που περιέχουν στοιχεία τσιμέντου ίσως χρειαστεί να προσομοιωθεί η αλληλουχία της πλήρωσης του εκάστοτε μετώπου. Επίσης ίσως φανεί αναγκαίο να προσομοιωθεί η αλληλουχία της εξαγωγής του παρακείμενου πετρώματος

ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζώνες αστοχίας στο υλικό που θα πληρώσει τα κενά που προκύπτουν από την εξόρυξη.

Ο Jager et al. (1987) κατέγραψε τα πλεονεκτήματα της λιθογόμωσης για έλεγχο στο έδαφος σε μεγάλου βάθους μεταλλεία. Στη θέση των τοπικών στύλων ευστάθειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί λιθογόμωση χωρίς να σημαίνει αυτό ότι θα έχουμε αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης της ενέργειας. Η λιθογόμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για τοπική στήριξη κοντά στο εκάστοτε μέτωπο και τις στοές προσπέλασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση μαλακού υλικού πλήρωσης μας δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα. Όλα τα παραπάνω μας δείχνουν πως η δομική αξία της λιθογόμωσης έχει γίνει κατανοητή στα μεγάλου βάθους μεταλλεία. Στα μικρότεροι βάθους μεταλλεία, όπου οι μετακινήσεις είναι μικρότερες δεν είναι ξεκάθαρο αν παρουσιάζονται τα ίδια οφέλη. Οι Swan και Board (1989) ήταν αυτοί που εκπόνησαν τις έρευνες για την αλληλεπίδραση μεταξύ στύλων και λιθογόμωσης και παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό τους σε συμβατικές μεθόδους μετώπου και στύλων. Μελετήθηκε η επίδοση στύλων πετρώματος που είναι εύθραυστο και υποστηρίζονται από μαλακή λιθογόμωση κάτω από συνθήκες χαμηλού περιορισμού. Έγιναν πειράματα στο εργαστήριο προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι συνθήκες φόρτισης που υπόκειται επί τόπου ένας στύλος και πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για στύλους περιορισμένους από μαλακό υλικό πλήρωσης και καταγράφηκε η παραμορφωτική συμπεριφορά.

Οι συγκλίσεις περιορίζονται και παρέχεται τοπική και περιφερειακή υποστήριξη όταν τα κενά που προέκυψαν από την εξόρυξη γομώνονται με απορρίμματα του εμπλουτισμού, άγονα πετρώματα ή άμμο. Η λιθογόμωση μειώνει τις επιτρεπόμενες συγκλίσεις, περιορίζει τον τελικό τους όγκο και τις μετατοπίσεις που είναι αποτέλεσμα της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Επίσης η βραχομάζα πρέπει να επιδράσει πάνω στη λιθογόμωση για να επέλθει η παραμόρφωσή της και κατά τη διαδικασία αυτή μπορούν να απορροφηθούν μεγάλα ποσά ενέργειας (Salamon, 1983). Το υψηλό κόστος της μεθόδου και κάποια λειτουργικά προβλήματα απέτρεψαν την εφαρμογή της μεθόδου παρόλα τα πλεονεκτήματα που πιθανώς να έχουν σχέση με τη χρήση λιθογόμωσης (Cook, N.G.W. et al., 1966). Συγκεκριμένα, πίστευαν πως θα ήταν πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η απαιτούμενη δυσκαμψία στο υλικό έτσι ώστε η λιθογόμωση να περιορίσει τις συγκλίσεις και να μειώσει επαρκώς τον βαθμό απελευθέρωσης της ενέργειας (Heunis, 1980).

## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Σύμφωνα με προσομοιώσεις σε Η/Υ που έγιναν από τον jogger et al. (1987), όταν το βάθος είναι <3km, τότε η λιθογόμωση παρέχει τοπική υποστήριξη που είναι απαραίτητη. Ο ρυθμός της εξόρυξης αυξάνεται όταν κάτω από τα 3 km η λιθογόμωση μειώνει τις τάσεις που δρουν στη σταθεροποίηση των στύλων και ενεργοποιεί τα κενά τους. Σε κάποια μεταλλεία της Ν. Αφρικής έχουν καταγραφεί βελτιωτικά μέτρα από τη χρήση της λιθογομωτικής μεθόδου. Ακολουθούν κάποια από αυτά:

- Βελτιωμένη πρόσβαση και συνθήκες τοιχωμάτων
- Μειώνεται το πλάτος του μετώπου
- Μειώνονται τα εκρηκτικά όταν η λιθογόμωση είναι κοντά στο μέτωπο
- Μειώνονται τα ατυχήματα που οφείλονται σε πτώσεις πετρωμάτων
- Η παραγωγή είναι βελτιωμένη

Από όλα τα παραπάνω προέκυψε το συμπέρασμα πως η λιθογόμωση θα πρέπει να τοποθετείται με χαμηλό πορώδες και όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέτωπο. Ένα καλό, προσωρινό σύστημα υποστήριξης μαζί με τη διαδικασία πλήρωσης πρέπει να ενσωματωθεί στις εξορυκτικές εργασίες (Jager et al., 1987).

Ακολουθούν οι σημαντικότεροι λόγοι χρήσης της λιθογόμωσης:

1. Υποστήριξη των τοιχωμάτων
2. Δημιουργία δαπέδου εργασίας
3. Διάθεση των απορριμμάτων εμπλουτισμού.

Η λιθογόμωση είναι απαραίτητη για την υποστήριξη των τοιχωμάτων στα μέτωπα που γίνονται εργασίες καθώς επίσης και των στύλων μεταλλεύματος, που αφήνονται ενδιάμεσα στα μέτωπα για να στηρίζεται η οροφή.

### 2.4.2 Λιθογόμωση με Στείρα

Κατά τη χρήση της λιθογόμωσης με στείρα είναι πιο εύκολη η απόθεση αυτών από την ανάπτυξη σε εξορυγμένα μέτωπα ώστε να αποφευχθεί η απομάκρυνσή τους από το μεταλλείο. Γι' αυτό το λόγο η λιθογόμωση με στείρα χρησιμοποιείται από πολύ παλιά. Ο κύριος λόγος που θέλουμε να γίνει πλήρωση των κενών με στείρο υλικό είναι η υποστήριξη των χώρων αυτών από εξορυγμένο μέταλλευμα ώστε να αποφευχθεί η

καθίζηση της επιφάνειας, οι καταπτώσεις, η πίεση στις θέσεις εργασίας ή η ακαριαία διάρρηξη του στείρου πετρώματος.

### 2.4.3 Πηγές υλικών Λιθογόμωσης

Κάθε πληρωτικό υλικό πρέπει να τηρεί ορισμένες προϋποθέσεις. Αρχικά πρέπει να έχει χαμηλό κόστος και να μεταφέρεται εύκολα. Επίσης θα πρέπει να είναι πυρασφαλές και η συρρίκνωση να περιορίζεται σε μικρό βαθμό. Κάποιες φορές είναι απαραίτητες επιπλέον απαιτήσεις. Παράδειγμα αποτελεί το λιθογομωτικό υλικό που μεταφέρεται από το ένα επίπεδο προς το άλλο (όσο το μέτωπο βαθαίνει) και δεν πρέπει να είναι συμπαγές. Για να μπορέσουμε να έχουμε αυτό το αποτέλεσμα μπορούν να προστεθούν υλικά τσιμεντοποίησης. Όταν συμβαίνει υδραυλική πλήρωση, δηλαδή το υλικό μεταφέρεται μέσω του νερού, αμέσως μετά την τοποθέτηση το νερό απομακρύνεται.

Το λιθογομωτικό υλικό αποτελείται από άμμο, πέτρωμα από το μεταλλείο ή την επιφάνεια, πετρώματα από σωρούς της επιφάνειας, απορρίμματα εμπλουτισμού και σκωρίες μεταλλουργίας. Αν το υλικό πλήρωσης είναι σκληρό τότε οι απώλειες στην εξόρυξη γίνονται μικρότερες. Ακόμη, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό επιφανειακών, υπόγειων εξορύξεων, στην ανάκτηση πολύτιμων μεταλλευμάτων διατηρώντας πιο απλά μεταλλεύματα για μελλοντική επί τόπου εξόρυξη, σε κοιτάσματα που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος με μεγάλο κίνδυνο χτυπημάτων δόνησης, σε κοιτάσματα που υπάρχουν κίνδυνοι ανάφλεξης και τέλος σε κοιτάσματα που βρίσκονται κάτω από εγκαταστάσεις, έργα και δεξαμενές νερού. Το κόστος και η σύνθεση του σκληρού λιθογομωτικού υλικού εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υλικών με επαρκή αντοχή, ο τρόπος παρασκευής και ο τρόπος μεταφοράς του υλικού προκειμένου να πληρωθεί ο κενός χώρος.



## Μέθοδοι εκμετάλλευσης με λιθογόμωση

---

Τα στείρα υλικά λιθογόμωσης τα προμηθευόμαστε από:

- Επιφανειακά ορυχεία κοντά στο μεταλλείο
- Στείρο πέτρωμα από ανάπτυξη υπόγειων έργων
- Χαλίκια από ποτάμια
- Αποθέσεις παγετώνων
- Αποσαθρωμένα πετρώματα
- Άμμος από θίνες
- Απορρίμματα-άγωνα μεταλλείου
- Απορρίμματα εγκαταστάσεων επίπλευσης
- Απορρίμματα εγκαταστάσεων προπαρασκευής άνθρακα
- Σκωρίες μεταλλουργικών εργοστασίων ή ιπτάμενη τέφρα.

Τα παρακάτω χαρακτηριστικά υλικών και κατηγορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη λιθογόμωση:

1. Το στείρο πέτρωμα πρέπει να είναι αυστηρά διαβαθμισμένο και να περιέχει ελάχιστο ή καθόλου λεπτόκοκκο υλικό.
2. Το υλικό είναι διαβαθμισμένο και περιέχει τσιμέντο και τη σωστή αναλογία νερού για να έχει μεγαλύτερη αντοχή.
3. Τα αδρανή υλικά περιέχουν ενώσεις του θείου, όπως είναι ο πυρίτης, ή διάφορα άλλα μεταλλεύματα, τα οποία συντελούν στη σταθεροποίηση της λιθογόμωσης.
4. Για να πληρωθεί το μεγαλύτερο μέρος του κενού στο μίγμα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μίγματα στείρου πετρώματος ή χαλικιών και λεπτόκοκκα απορρίμματα, ώστε να έχουμε καλή διαβάθμιση. Για να έχουμε καλύτερη μεταφορά και πλήρωση, μέρος του λεπτομερούς υλικού αφαιρείται μέσω κυκλώνων.
5. Η λιθογόμωση σταθεροποιείται όταν τα μίγματα σκωρίας χαλυβουργείων ή ιπτάμενης τέφρας έχουν ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες.

### 2.4.3.1 Πλεονεκτήματα Στείρων ως Υλικό Λιθογόμωσης

Το οικονομικό μέγεθος της εκμετάλλευσης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά αν σε κοντινή απόσταση από το μεταλλείο υπάρχει μια πηγή στείρου υλικού με χαμηλό κόστος. Λόγω της απλής εγκατάστασης, η προπαρασκευή του πληρωτικού υλικού είναι πιο οικονομική από άλλους τύπους λιθογόμωσης.

Η χρήση των πετρωμάτων που προκύπτουν από τις υπόγειες εργασίες έχει δύο πλεονεκτήματα:

- Μειώνεται το κόστος της απόθεσης με τη μετακίνησή του από το μεταλλείο και περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην επιφάνεια.
- Για να γίνει πιο σταθερή η γόμωση γίνεται προσθήκη τσιμέντου ή οποιοδήποτε άλλου συνδετικού υλικού.

### 2.4.3.2 Μειονεκτήματα στείρων ως Υλικό Λιθογόμωσης

Η γόμωση με στείρο υλικό είναι σχετικά χαλαρή και δεν είναι ικανή να αποτρέψει τις καταπτώσεις αν το υλικό δεν είναι διαβαθμισμένο. Όταν το υλικό λιθογόμωσης δεν είναι σταθερό μπορούν να ακολουθήσουν καταπτώσεις και κατακρημνίσεις αν υπάρχει μεγάλη επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη. Τέλος, μπορούμε να έχουμε σημαντικά προβλήματα διαρροών όταν το υλικό πλήρωσης είναι υγρό και μπορεί να δράσει μέσα στα φρέατα ως υδραυλικό.

### 2.4.4 Πνευματική Γόμωση

Στα υπόγεια ανθρακωρυχεία χρησιμοποιείται η μέθοδος της πνευματικής μεταφοράς και εφαρμόζεται η διακίνηση του στείρου πετρώματος που προέκυψε από την εξόρυξη.

Η πνευματική μεταφορά μπορεί να λύσει προβλήματα που έχει η υδραυλική λιθογόμωση σε επίπεδα μέτωπα, αφού τα κενά μπορούν να πληρωθούν στο 100% με συμπίεση υψηλού βαθμού. Τα στείρα υλικά μπορούν να προστεθούν στην πνευματική μέθοδο και με αυτόν τον τρόπο να μειωθεί το κόστος της μεταφοράς τους στην επιφάνεια. Τέλος, μπορεί να γίνει χρήση τσιμέντου σε υλικό με υγρασία και με αυτό τον τρόπο να δημιουργηθεί σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

Τα μειονεκτήματα της πνευματικής γόμωσης είναι τα εξής:

1. Στις μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις απαιτείται υπερβολική ισχύς.
2. Εξαιτίας της υψηλής ταχύτητας του αέρα κατά μήκος των αγωγών προκαλείται φθορά και γίνεται αναγκαία η περιστροφή των αγωγών και η αντικατάστασή τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

### 2.4.5 Υδραυλική Γόμωση

Η αποκατάσταση της φυσικής υποστήριξης των υπόγειων ανοιγμάτων με πλήρωση των κενών από άλλο υλικό αποτελεί την αρχή της υδραυλικής μεθόδου γόμωσης τσιμεντοπολφού.

Οι αντοχές αυξάνονται όταν προσθέτονται μικρές ποσότητες τσιμέντου.

Επομένως, απ' όλα τα παραπάνω προκύπτουν τα βασικά γνωρίσματα του γομωτικού υλικού, τα οποία είναι:

1. Η χημική σύσταση του υλικού πρέπει να είναι όσο περισσότερο αδρανής γίνεται ώστε να μην καταστρέφεται η συνένωσή του με το τσιμέντο.
2. Η κοκκομετρική σύσταση πρέπει να είναι σύμφωνη με τους κανόνες της υδραυλικής μεταφοράς.
3. Μεγάλες ποσότητες του υλικού, εύκολη εξασφάλισή του και ιδιαίτερα μικρό κόστος.

Κάποια ενεργά ορυκτά έχουν δυσμενείς επιδράσεις στις ενώσεις που σχηματίζει το τσιμέντο κατά την ανάπτυξη των αντοχών. Παράδειγμα αποτελεί η ύπαρξη άμορφου  $\text{SiO}_2$  που προσβάλλει τις ενώσεις του τσιμέντου και καταστρέφει τη δομή του. Κάποια ορυκτά που παραμένουν για πολύ καιρό σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπως είναι δηλαδή και οι συνθήκες στα μεταλλεία, εξαλλοιώνονται και στο τέλος καταρρέουν μηχανικώς. Αυτού του είδους τα υλικά θα πρέπει να αποφεύγονται.

Η υδραυλική μεταφορά θα πρέπει να παραμένει ανεπηρέαστη από τα υλικά γόμωσης. Τα υλικά που περιέχουν φθοροποιούς κρυστάλλους σε σύντομο χρονικό διάστημα καταστρέφουν τις σωληνώσεις. Η κοκκομετρία δεν πρέπει να έχει μεγάλες διακυμάνσεις μεγέθους.

### 2.4.5.1 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της υδραυλικής γόμωσης είναι τα ακόλουθα:

- Επειδή η υδραυλική γόμωση μπορεί να καλύψει ανωμαλίες στα τοιχώματα και την οροφή έχουμε καλύτερη υποστήριξη των τοιχωμάτων.
- Όταν οι καταπτώσεις των τοιχωμάτων μειώνονται λόγω της βελτιωμένης υποστήριξης, η πίεση μειώνεται στην περιοχή εργασίας. Όταν το γομωτικό υλικό είναι καλά διαβαθμισμένο βελτιώνεται το αποτέλεσμα και τα λεπτομερή τεμαχίδια συμπληρώνουν τα κενά. Όταν προστεθεί τσιμέντο ή κάποιο άλλο συνδετικό υλικό η αντοχή αυξάνεται.
- Η στεγανότητα που δημιουργείται είναι καλύτερη, οπότε ο έλεγχος του αερισμού είναι καλύτερος.
- Δημιουργείται σταθερή και καθαρή επιφάνεια εργασίας, όταν η υδραυλική λιθογόμωση χρησιμοποιείται με τσιμέντο ως κάλυμμα δαπέδου σε εκμετάλλευση με τη μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων. Με αυτό τον τρόπο κατά την φόρτωση του μεταλλεύματος αποφεύγεται η πρόσμιξή του με το γομωτικό υλικό.
- Η επιφάνεια εργασίας που δημιουργείται είναι κατάλληλη για τον μηχανικό εξοπλισμό της εκμετάλλευσης.
- Το περιβαλλοντικό ζήτημα ελέγχεται καλύτερα αφού οι επιφανειακές αποθέσεις μειώνονται.

### 2.4.5.2 Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα των μεθόδων υδραυλικής λιθογόμωσης είναι τα παρακάτω:

- Η ύπαρξη επιπλέον νερού όταν η πυκνότητα του πολφού δεν διατηρείται μεταξύ 65-70% προκαλεί διαρροή των λεπτόκοκκων υλικών από τη γόμωση. Επίσης δημιουργείται θέμα καθαρότητας, τα έγκοιλα γεμίζουν με λάσπη και προκαλείται φθορά στις αντλίες. Τέλος, οι οδοί μεταφοράς γεμίζουν με λάσπη, ο εξοπλισμός φθείρεται και γενικά προκύπτουν προβλήματα διαχείρισης της λάσπης κατά τη διάρκεια των υπόγειων εργασιών.
- Όταν υπάρχει περίσσεια ύδατος, το αποτέλεσμα είναι ασθενής, στρωματοποιημένη λιθογόμωση με τσιμέντο και απώλεια αυτού όταν ξεπλένεται από τον χώρο απόθεσης της λιθογόμωσης. Αν υπάρχει διαρροή νερού με διαλυμένο τσιμέντο μέσα σε φρέαρ που περιέχει μετάλλευμα δημιουργούνται συσσωματώσεις και εμφράξεις.
- Όταν η αποστράγγιση δεν είναι σωστή τότε υπάρχει κίνδυνος πλημμελούς γόμωσης.
- Η απομάκρυνση της λάσπης από τον πυθμένα των φρεάτων ή των εγκοίλων είναι δύσκολη.
- Οι αγωγοί μπορούν να φράξουν αν το γομωτικό υλικό είναι πολύ πυκνό.

## 3 Μεταλλείο Ολυμπιάδας

### 3.1 Γενικά

Το μεταλλείο της Ολυμπιάδας βρίσκεται στο ποιο βορειοανατολικό σημείο της Χαλκιδικής ανάμεσα στα χωριά Στρατώνι και Σταυρό. Οι εργασίες που λαμβάνουν μέρος αφορούν στην εκμετάλλευση και κατεργασία κοιτάσματος μεικτών θειούχων μεταλλευμάτων.

Οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν συνολικά το μεταλλείο της Ολυμπιάδας, το εργοστάσιο εμπλουτισμού της Ολυμπιάδας, την μονάδα κατεργασίας νερών, την μονάδα λιθογόμωσης, το παρασκευαστήριο εκτοξευόμενου σκυροδέματος και το εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου.

### 3.2 Γεωλογία περιοχής

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην περιοχή είναι οι ακόλουθοι:

- Τεκτονικός Αμφιβολίτης, ο οποίος υπέρκειται της μεταλλοφορίας. Ο εν λόγω γεωλογικός σχηματισμός παρουσιάζεται έντονα εξαλλοιωμένος (καολίνης) στην επαφή του με τη μεταλλοφορία, λόγω υδροθερμικής εξαλλοίωσης των απλιτών, πηγματιτών, αμφιβολιτών και των τμημάτων των γειτονικών γνευσίων.
- Στρώμα Μαρμάρου, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το κοίτασμα. Ο εν λόγω σχηματισμός είναι παχυστρωματώδης, χονδρόκοκκος, τοπικά δολομιτωμένος και κατακερματισμένος, ενίοτε καρστικοποιημένος.
- Βιοτιτικός - Αμφιβολιτικός Γνεύσιος με απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες ή αμφιβολιτικός γνεύσιος με πηγματιτικές και απλιτικές φλέβες.

Εντός του στρώματος των μαρμάρων αναπτύσσεται η μεταλλοφορία, η οποία συνίσταται κυρίως από σιδηροπυρίτη, γαληνίτη και σφαλερίτη, ενώ όπως προαναφέρθηκε, βάσει της ακολουθούμενης μεθόδου εκμετάλλευσης μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εκμετάλλευσης κατά μήκος εκάστης στοάς, θα διοχετεύεται, με υδραυλικό σύστημα μεταφοράς, το υλικό λιθογόμωσης προς πλήρωση του δημιουργούμενου υπόγειου ανοίγματος.

## 3.3 Λιθογόμωση

Προς το παρόν το μεταλλείο της Ολυμπιάδας βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης με αποτέλεσμα να μην λειτουργεί προς το παρόν ακόμα η μονάδα λιθογόμωσης.

Η μονάδα θα ξεκινήσει να λειτουργεί εντός του 2018 με σκοπό το κλείσιμο των παλαιών στοών εκμετάλλευσης των προγενέστερων δραστηριοτήτων.

Στόχος του σχεδιασμού της μεθόδου εκμετάλλευσης εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων με ανερχόμενη φορά, επίσης θα αποτελεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό η πλήρωση των στοών, σε συνδυασμό με την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών ασφαλείας. Με την ανωτέρω μέθοδο εκμετάλλευσης θα διασφαλίζεται η καθολική πλήρωση των κενών που δημιουργούνται από την απόληψη του μεταλλεύματος. Κατά συνέπεια, ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες χαλάρωσης της υπερκείμενης βραχώμαζας μετά το πέρας της εκμετάλλευσης και την ολοκλήρωση των εργασιών λιθογόμωσης. Τα κενά, διευρυνόμενα μέτωπα που θα δημιουργούνται με τη μέθοδο της ανερχόμενης λιθογόμωσης από την εξόρυξη του μεταλλεύματος θα γομώνονται υδραυλικά με υλικό που θα αποτελείται από αδρομερές τέλμα εμπλουτισμού (70%), τσιμέντο (10%) και νερό (20%). Το υλικό αυτό, μετά από επαρκή ανάμιξη θα μεταφέρεται υδραυλικά στα προς λιθογόμωση μέτωπα με παροχή έως 40m<sup>3</sup>/h. Ουσιαστικά θα αποτελεί μέρος του αδρομερούς και θα χρησιμοποιείται μετά την ανάμιξη με τσιμέντο ως υλικό λιθογόμωσης των στοών μεταλλείων για πρόληψη δημιουργίας όξινης απορροής και ταυτόχρονα σταθεροποίησης του εδάφους

### 3.4 Προσδιορισμός Γεωτεχνικών Παραμέτρων Σχεδιασμού

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων προκύπτουν από την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά την ανάπτυξη των στοών εκμετάλλευσης του μεταλλείου της Ολυμπιάδας.

Αυτά τα γεωτεχνικά στοιχεία που αφορούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς εντός και εκτός εκμετάλλευσης στην συνέχεια θα εισαχθούν στο λογισμικό πρόγραμμα Phase 2d και θα αποτελέσουν τα βασικά στοιχεία για τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν.

Συγκεντρωτικά οι τιμές του δείκτη GSI, του συντελεστή  $m_i$  και της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και οι διάφορες τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης δίδονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 3: Τιμές παραμέτρων αντοχής των γεωλογικών σχηματισμών και του υλικού λιθογόμωσης με την εφαρμογή της μεθοδολογίας

Γεωλογικός Σχηματισμός	GSI	$m_i$	$\sigma_{ci}$ (MPa)
Τεκτονικός Αμφιβολίτης	40	26	100
Στρώμα μαρμάρου	35	12	50
Μετάλλευμα	35	22	50
Βιοτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος	45	20	100
Καολίνης	15	6	1
Λιθογόμωση	6	2	4



Πίνακας 4: Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 200m.

Γεωλογικός Σχηματισμός	GSI	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$c$ (MPa)	$\phi$ (°)	E (GPa)	Λόγος Poisson $\nu$
Τεκτονικός αμφιβολίτης	40	100	26	28	1,01	47	4,21	0,25
Η Στρώμα μαρμάρου	35	50	12	28	0,55	33	2,25	0,35
Μετάλλευμα	35	50	22	28	0,67	38	2,25	0,35
Βιοτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος	45	100	20	28	1,05	47	5,60	0,25
Καολίνης	15	1	6	28	0,04	5	0,10	0,35
Λιθογόμωση		4	10	18	0,25	26	2,5	0,35

Πίνακας 5: Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 300m.

Γεωλογικός Σχηματισμός	GSI	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$c$ (MPa)	$\phi$ (°)	E (GPa)	Λόγος Poisson $\nu$
Τεκτονικός αμφιβολίτης	40	100	26	28	1,30	44	4,21	0,25
Στρώμα μαρμάρου	35	50	12	28	0,70	30	2,25	0,35
Μετάλλευμα	35	50	22	28	0,85	35	2,25	0,35
Βιοτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος	45	100	20	28	1,35	44	5,60	0,25
Καολίνης	15	1	6	28	0,05	5	0,10	0,35
Λιθογόμωση		4	10	18	0,32	23	2,5	0,35

## Αριθμητική προσομοίωση μοντέλων

---

Οι παράμετροι που παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες είναι:

- Το μέτρο Ελαστικότητας  $E$ ,
- Το ειδικό βάρος  $\gamma$ ,
- Ο λόγος Poisson  $\nu$ ,
- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_{ci}$
- Η παράμετρος  $m_b$  η οποία είναι η τιμή της σταθεράς  $m$  (του υλικού) για την βραχομάζα ( $m_i$ , η αντίστοιχη για υγιές πέτρωμα),
- Η γωνιά εσωτερική τριβής  $\phi$ ,
- Και τέλος η συνοχή,  $c$ .

### 3.5 Κριτήριο αστοχίας

Στα μοντέλα που ακολουθούν, για την ανάλυση της συμπεριφοράς τόσο της βραχομάζας όσο και της λιθογόμωσης γίνεται χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek & Brown (1980, 1988, 1997).

Όπου κατά το κριτήριο αυτό η μέγιστη κύρια τάση σε τριαξονική καταπόνηση δίνεται από την σχέση :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \left[ m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right]^{0.5},$$

Όπου,  $\sigma_c$  είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραιου πετρώματος και η παράμετρος  $m$  εξαρτάται από τον τύπο πετρώματος σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα,

Πίνακας 6: Συντελεστές κριτηρίου Hoek και Brown για ακέραιο πέτρωμα.

Παράμετρος $m$	Είδος πετρωμάτων
7	Ανθρακικά
10	Μεταμορφωμένα αργιλικά
15	Με ισχυρούς κρυστάλλους και χωρίς σχιστότητα
17	Λεπτόκοκκα πυριγενή
25	Χονδρόκοκκα πυριγενή

Το γενικευμένο κριτήριο Hoek και Brown για βραχομάζες ορίζεται ως (Hoek, 2000):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[ m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right]^a, \text{ όπου:}$$

$m_b$  = η τιμή της σταθεράς  $m$ (του υλικού) για τη βραχομάζα ( $m_i$  η αντίστοιχη για υγιές πέτρωμα),

$s, a$  = σταθερές των χαρακτηριστικών της βραχομάζας,

$\sigma_{ci}$  = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υγιούς πετρώματος,

$\sigma_1', \sigma_3'$  = οι αξονική και η πλευρική ενεργή τάση αντίστοιχα.

### 4 Αριθμητική προσομοίωση και λογισμικό πακέτο Rocscience Phase 2d

#### 4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά την συμπεριφορά της βραχομάζας στο μεταλλείο της Ολυμπιάδας Χαλκιδικής, της εταιρείας Ελληνικός Χρυσός ΑΕ στην βορειοανατολική Χαλκιδική.

Η κινητικότητα που εμφανίσθηκε στο κοίτασμα και περιφερειακά αυτού διερευνήθηκε με προσομοίωση των εκσκαφών χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο Phase 2d της Rocscience.

Σε πρώτο στάδιο σχεδιάσθηκε η γεωμετρία, ορίσθηκαν οι ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών (σύμφωνα με το κεφάλαιο 3) και δημιουργήθηκε το δικτύωμα των στοιχείων. Στη συνέχεια ορίσθηκαν οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος και ακολούθησε η υπολογιστική φάση.

#### 4.2 Καθορισμός της γεωμετρίας και εισαγωγή των δεδομένων

##### 4.2.1 Διαστάσεις του μοντέλου και οριακές συνθήκες

Το μεταλλείο θεωρήθηκε ότι αναπτύσσεται σε ισότροπους, ελαστοπλαστικούς σχηματισμούς. Το μήκος της εκσκαφής ορίσθηκε πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος της, γεγονός που ικανοποιεί τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

Σε τέτοιες αποστάσεις, οι περιορισμοί που τίθενται στα όρια του μοντέλου θεωρείται ότι δεν επηρεάζουν τις τάσεις και τις μετακινήσεις των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή.

Μετά τη γεωμετρία, προσδιορίσθηκαν οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος επιτρέποντας κύλιση του μοντέλου ως προς το κατακόρυφο άξονα για το αριστερό και δεξιό όριο και ορίζοντας πάκτωση για το κατώτερο όριο.

### 4.2.2 Διαμόρφωση δικτύου στοιχείων

Επελέγησαν τα τριγωνικά (τριών σημείων) στοιχεία και πραγματοποιήθηκε η διακριτοποίηση μέσω του λογισμικού. Τέλος, πύκνωση του δικτύου πραγματοποιήθηκε επιλεκτικά σε συγκεκριμένες περιοχές, στις οποίες αναμενόταν αξιόλογη διαφοροποίηση των τάσεων (π.χ. διεπιφάνειες σχηματισμών). Το δίκτυο που προέκυψε, θεωρήθηκε ικανό για μια αξιόπιστη ανάλυση.

### 4.2.3 Ορισμός αρχικών συνθηκών

Η αρχική πίεση του νερού των πόρων καθορίστηκε με βάση τις γεωτρήσεις αποστράγγισης και τα πιεζόμετρα. Η πίεση του νερού των πόρων θεωρήθηκε ανάλογη της υδροστατικής. Η παραπάνω υπόθεση, θεωρήθηκε ότι θα είχε μικρή σχετικά επίδραση στη κινητική συμπεριφορά της εκσκαφής.

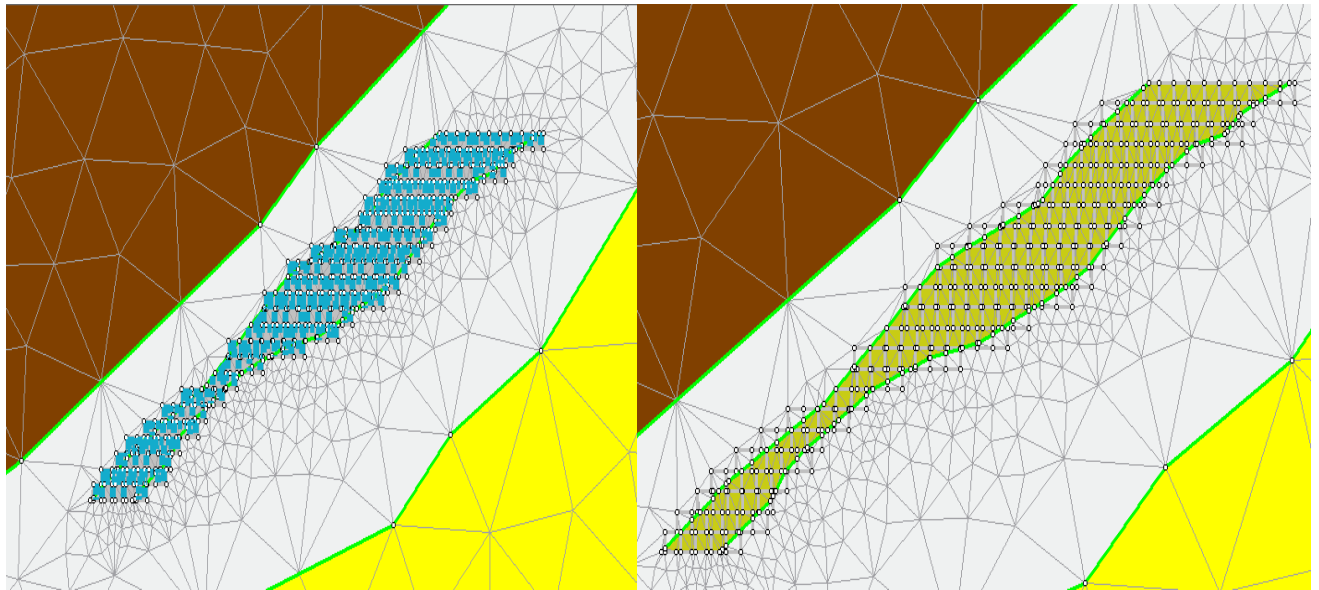
### 4.2.4 Μοντελοποίηση

Η μέθοδος εξόρυξης που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων, με φορά ανοδική.

Η μοντελοποίηση αφορά στις μετακινήσεις των σχηματισμών γύρω από το κοίτασμα, όσο και στο εσωτερικό της βραχομάζας του κοιτάσματος λόγω της εκμετάλλευσης.

Η μοντελοποίηση της κάθε φάσης εκσκαφής είτε στις συνολικές μετακινήσεις που προκαλεί η εκμετάλλευση είτε στις μετακινήσεις στο εσωτερικό της αφορά σε δυο ξεχωριστές καταστάσεις.

Η πρώτη είναι αυτή όπου μετά την εκσκαφή γίνεται λιθογόμωση χωρίς χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και η δεύτερη είναι εκείνη όπου μετά την εκσκαφή γίνεται υποστήριξη και μετά λιθογόμωση.



Εικόνα 9: Προσομείωση μοντέλου εκμετάλλευσης με υποστήριξη (αριστερά) και χωρίς μέτρα υποστήριξη (δεξιά).

Η μοντελοποίηση διεξήχθη με σαράντα εννέα στάδια για την προσομοίωση της εκμετάλλευσης, χωρίς καθόλου μέτρα υποστήριξης και με μέτρα υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) συνολικά.

Το κοιτάσμα χωρίστηκε σε είκοσι τρεις ορόφους, όπου κάθε όροφος αποτελείται από στοές ύψους τέσσερα μέτρα και πλάτους τέσσερα μέτρα κατά μήκος του κοιτάσματος.

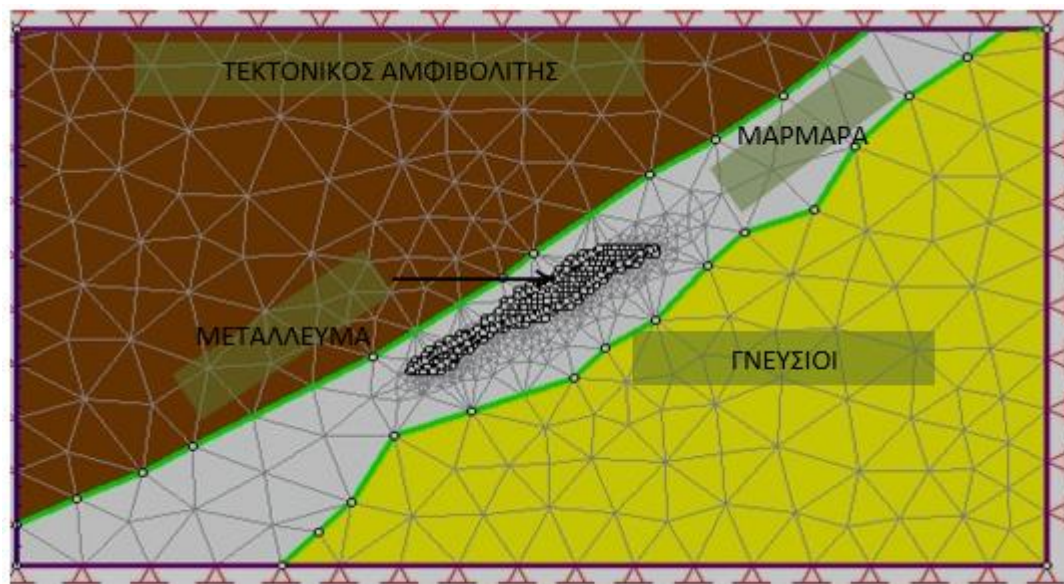
Η φορά εκμετάλλευσης του κοιτάσματος είναι ανερχόμενη δηλαδή από κάτω προς τα πάνω, όπου σε κάθε όροφο αφού τελειώσει η εκμετάλλευση και πληρωθεί πλήρως με λιθογόμωση αποτελεί πλέον το καινούριο δάπεδο έως της εξόφληση του κοιτάσματος στην οροφή του.

Οι διευθυντικές στοές αναπτύσσονται παράλληλα με αξονική απόσταση μεταξύ τους περίπου δώδεκα μέτρα περισσότερο για λόγους ευστάθειας. Η εξόρυξη σε κάθε επόμενη στοά γίνεται κατόπιν λιθογόμωσης της προηγούμενης, η υψομετρική διαφορά των ορόφων είναι περίπου οκτώ μέτρα, όπου οι εκσκαφές δεν θα πρέπει να ευθυγραμμίζονται κατά την κατακόρυφο για ομαλοποίηση του εντατικού πεδίου.

### 4.3 Αριθμητική προσομοίωση μοντέλου χωρίς υποστήριξη.

Η προσομοίωση του κοιτάσματος έγινε τομή που αντιστοιχεί σε τυχαία θέση με σκοπό τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων των σχηματισμών που περιβάλλουν το κοιτάσμα. Τα στάδια του συγκεκριμένου μοντέλου έχουν γίνει έτσι ώστε να προσομοιώνουν το δυνατόν καλύτερα οι συνθήκες που θα επικρατούν στην περιοχή κατά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Κάθε όροφος θα αποτελείται από διευθυντικές και από κατά παράταξη στοές με κλίση γύρω στις δέκα μοίρες περίπου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο πραγματοποιείται εκμετάλλευση των ορόφων του κοιτάσματος με ταυτόχρονη πλήρωση του με υλικό λιθογόμωσης χωρίς την χρήση υποστήριξης. Ο συνολικός αριθμός των σταδίων που διεξήχθησαν είναι σαράντα εννέα

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν το κοιτάσμα καθώς και τα όρια του κοιτάσματος. Το άνω μέρος αποτελείται από Τεκτονικό Αμφιβολίτη (χρώμα καφέ), ενώ το κοιτάσμα αναπτύσσεται μέσα σε σχηματισμό Μαρμάρου (χρώμα ανοικτό γκρι), κάτω από το στρώμα μαρμάρου αναπτύσσονται Βιοτιτικοί – Αμφιβολιτικοί Γνεύσιοι (χρώμα κίτρινο).



Εικόνα 10: Γεωλογία περιοχής και μορφή κοιτάσματος πριν έναρξη εκμετάλλευσης.

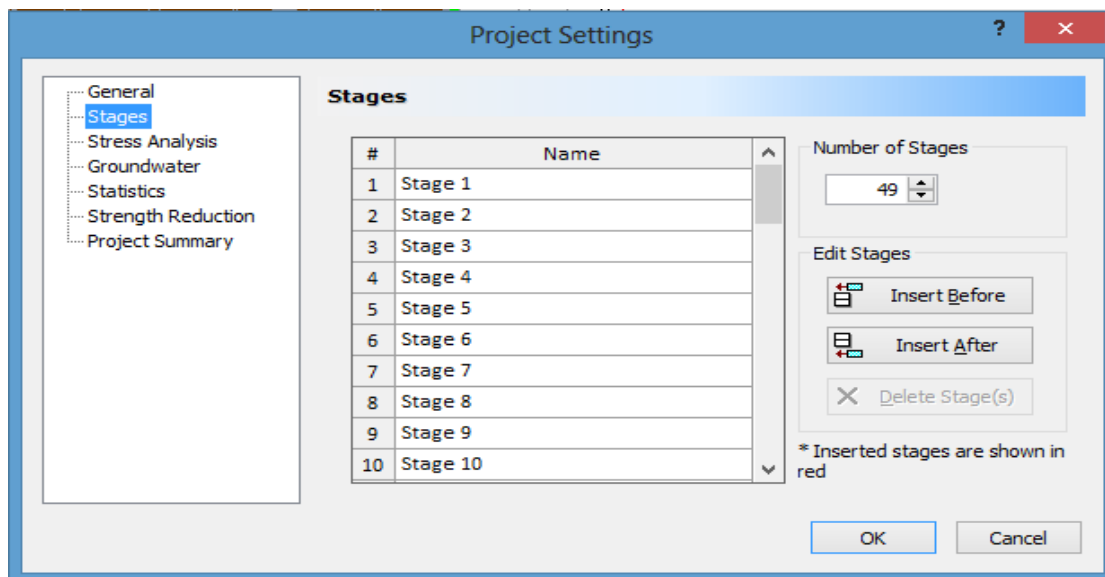


## Αριθμητική προσομοίωση μοντέλων

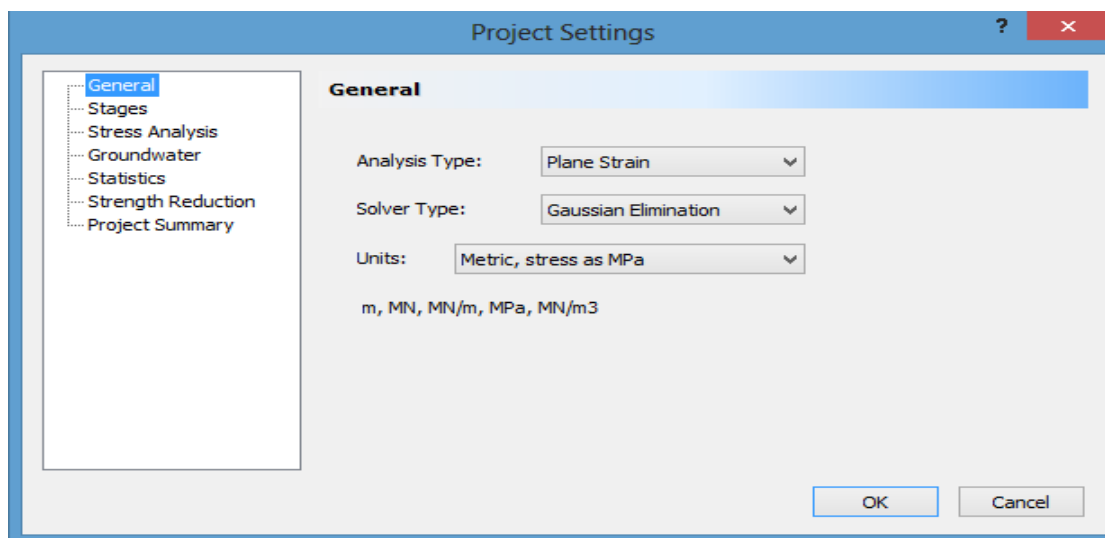
### 4.3.1 Ρυθμίσεις

Αρχικά ορίζουμε τον αριθμό των σταδίων, που όπως προαναφέραμε για το συγκεκριμένο μοντέλο θα είναι σαράντα εννέα. Για να ορίσουμε τον αριθμό των σταδίων πηγαίνουμε: Analysis → Project Settings → Stages, το πρώτο στάδιο αντιπροσωπεύει το αρχικό εντατικό πεδίο που επικρατεί στην περιοχή.

Ως τύπο ανάλυσης επιλέγουμε επίπεδη παραμόρφωση (plane Strain) και στο σύστημα των μονάδων επιλέγουμε, Metric stress as MPa.



Εικόνα 11:Εισαγωγή σταδίων εκσκαφής.



Εικόνα 12:Γενικές παράμετροι μοντελοποίησης.

### 4.3.2 Όρια εκσκαφής (Boundaries)

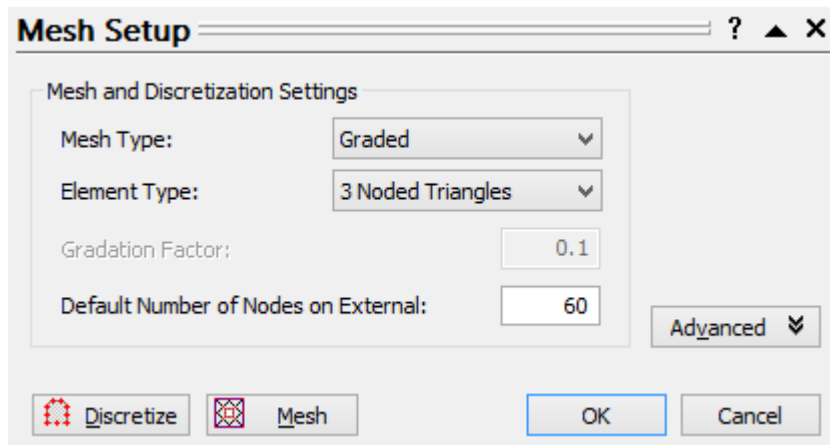
Για των προσθήκη των ορίων της εκσκαφής επιλέγουμε: Boundaries → Add → Excavation και στην συνέχεια σχεδιάζουμε τις διατομές των στοών που θέλουμε.

Για να ορίσουμε την περιοχή έξω από την περίμετρο της εκσκαφής, επιλέγουμε Boundaries → Add → External και για να ορίσουμε συγκεκριμένους σχηματισμούς, που βρίσκονται περιφερειακά της διατομής, επιλέγουμε Boundaries → Add → material και εισάγουμε το σχηματισμό ή υλικό που θέλουμε.

Στο τέλος γίνεται η προσθήκη των σταδίων εκμετάλλευσης: Boundaries → Add → Stages, όπου έτσι το κοίτασμα χωρίζεται σε ορόφους και σε στοές για εκμετάλλευση με γεωμετρικά χαρακτηριστικά στοών, ύψος 4m, πλάτος 4m το τελικό σύνολο των ορόφων είναι είκοσι τρείς

### 4.3.3 Δημιουργία πλέγματος (Meshing)

Η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται σε δυο βήματα. Πρώτα γίνεται η διακριτοποίηση των ορίων εκσκαφής ( Discretize), κατά την οποία μπορούμε να καθορίσουμε τις διάφορες παραμέτρους δημιουργίας του πλέγματος. Η διακριτοποίηση γίνεται επιλέγοντας: Mesh → Setup



Εικόνα 13: Καθορισμός ιδιοτήτων πλέγματος.

Και η διακριτοποίηση των ορίων γίνεται επιλέγοντας: Mesh → Discretize. Η διακριτοποίηση διαμορφώνει το πλαίσιο για το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και φαίνεται από τους κόκκινους σταυρούς επάνω στα όρια. Κατά την επιλογή παρατηρούμε ότι όλα τα σύνορα του μοντέλου διακριτοποιούνται, και στην περιοχή του παραθύρου στο κάτω μέρος δίνεται ο συνολικός αριθμός κόμβων διακριτοποίησης.

Στη συνέχεια το δεύτερο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος (Mesh), το οποίο δημιουργείται με βάση την διακριτοποίηση που έχει γίνει.

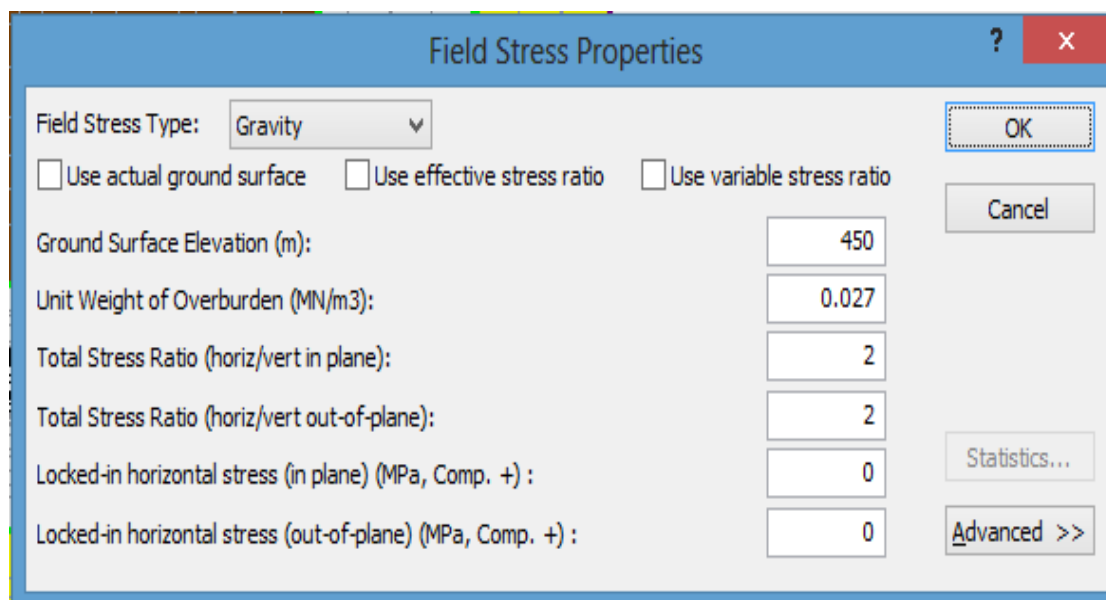
### 4.3.4 Συνοριακές συνθήκες (Boundaries conditions)

Κατά την δημιουργία του πλέγματος οι κόμβοι του εξωτερικού ορίου θα πρέπει να έχουν μηδενική μετατόπιση. Αυτό εμφανίζεται με ένα τριγωνικό σύμβολο που υπάρχει σε κάθε κόμβο των εξωτερικών ορίων. Από την στιγμή που ένα τμήμα των εξωτερικών ορίων των μοντέλων βρίσκεται στην επιφάνεια θα πρέπει να οριστεί η επιφάνεια του εδάφους σαν μια ελεύθερη επιφάνεια.

Αυτό γίνεται επιλέγοντας : Restraints → Free , επιλέγοντας με το ποντίκι τα τμήματα των εξωτερικών ορίων της επιφάνειας.

### 4.3.5 Εντατικό πεδίο (Field stress)

Επιλέγουμε το εντατικό πεδίο στο λογισμικό Phase 2 να είναι μέσω της βαρύτητας, οπότε επιλέγουμε: Loading → Field stress και επιλέγουμε, Gravity και το  $k$ , το οποίο είναι (λόγος οριζόντιων τάσεων προς κατακόρυφες) ισούται με 0,75.



Field Stress Type:	Gravity
<input type="checkbox"/> Use actual ground surface	
<input type="checkbox"/> Use effective stress ratio	
<input type="checkbox"/> Use variable stress ratio	
Ground Surface Elevation (m):	450
Unit Weight of Overburden (MN/m3):	0.027
Total Stress Ratio (horiz/vert in plane):	2
Total Stress Ratio (horiz/vert out-of-plane):	2
Locked-in horizontal stress (in plane) (MPa, Comp. +):	0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane) (MPa, Comp. +):	0

Εικόνα 14: Εντατικό πεδίο εκσκαφής.

### 4.3.6 Συντελεστής $k$

Κατά τον σχεδιασμό των μοντέλων προσομοίωσης ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης  $k$  πήρε την τιμή 0.75 και για τους δύο λόγους των οριζοντίων με τις κάθετες τάσεις (in plane και out of plane). Ποιο αναλυτικά, ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με βάση το βάθος που φτάνει το κάθε άνοιγμα, μέτωπο. Το ειδικό βάρος των υπερκειμένων είναι  $\gamma = 0.028 \text{ MN/m}^3$ , και ο λόγος  $k$ , ο οποίος αντιστοιχεί στον λόγο της οριζόντιας τάσης προς την κατακόρυφη υπολογίζεται με την βοήθεια της βάσης δεδομένων World Stress Map (WSM, 2008). Το ρήγμα του Στρατωνίου βρίσκεται κοντά στη περιοχή της εκμετάλλευσης και ο προσανατολισμός της μέγιστης οριζόντιας τάσης δίνεται από την βάση δεδομένων World Stress Map.

### 4.3.7 Μέτρο Ελαστικότητας $E$

Το μέτρο ελαστικότητας Young χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ελαστική συμπεριφορά, τη σκληρότητα ή την ακαμψία ενός σώματος και στη συγκεκριμένη περίπτωση ενός πληρωτικού υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $E$  για ένα σώμα τόσο μικρότερη είναι η παραμόρφωση που υφίσταται το σώμα από μία ορισμένη τάση συμπίεσης ή εφελκυσμού. Δηλαδή το μέτρο του Young μας δίνει το μέτρο αντίστασης στις παραμορφώσεις του σώματος. Στα μοντέλα το υλικό λιθογόμωσης είχε την τιμή 2500MPa.

### 4.3.8 Καθορισμός ιδιοτήτων

Στο σημείο αυτό καθορίζουμε τις ιδιότητες των διαφόρων σχηματισμών που αναπτύσσονται γύρω από το κοίτασμα καθώς και τις ιδιότητες του μεταλλεύματος, του υλικού λιθογόμωσης και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για τον καθορισμό των ιδιοτήτων ακολουθούμε την διαδρομή: Properties → Define Material. Με τον τρόπο αυτό ορίζουμε τους σχηματισμούς και τα υλικά όπως προαναφέραμε. Στη συνέχεια η ανάθεση των υλικών αυτών στα διάφορα στάδια, γίνεται με την εντολή Properties → Assign Properties, όπου εμφανίζει την παρακάτω εικόνα.

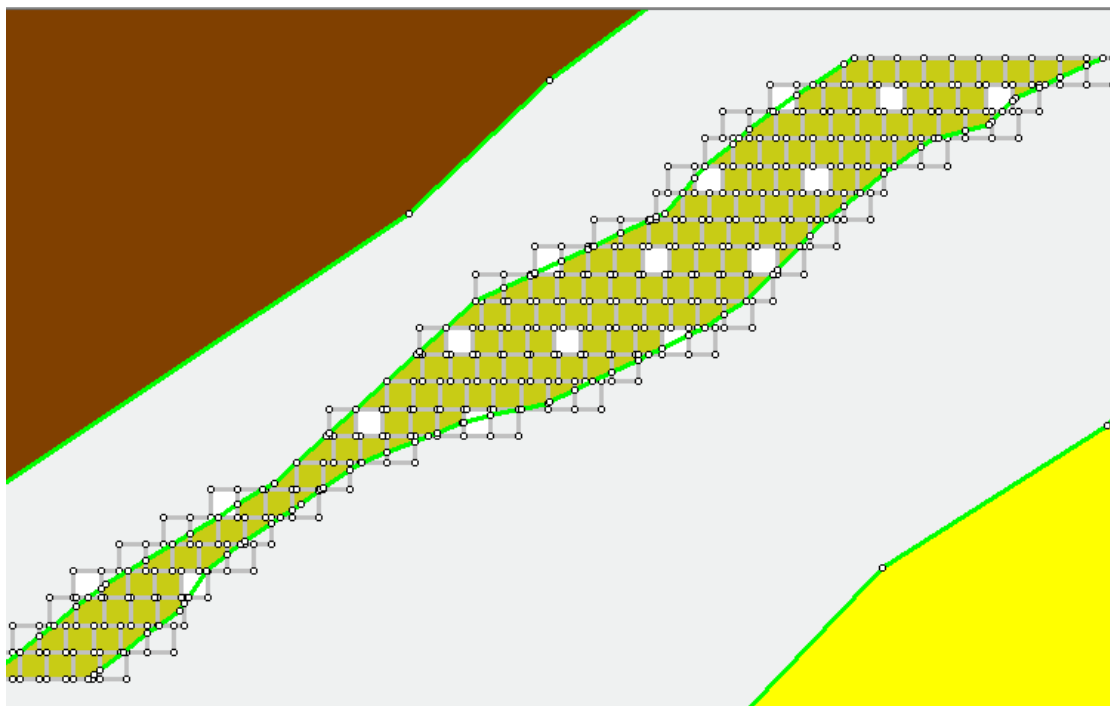
The image shows a software window titled "Define Material Properties" for material "1. Μετάλλευμα". It includes input fields for elastic and strength properties, a list of material types on the left, and buttons for saving and applying the settings.

Εικόνα 15: Καθορισμός ιδιοτήτων των σχηματισμών και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν.

Τα γεωλογικά στρώματα θεωρούνται ελαστικο-πλαστικά υλικά με παραμένουσα αντοχή που ακολουθούν το γενικευμένο μοντέλο των Hoek-Brown.

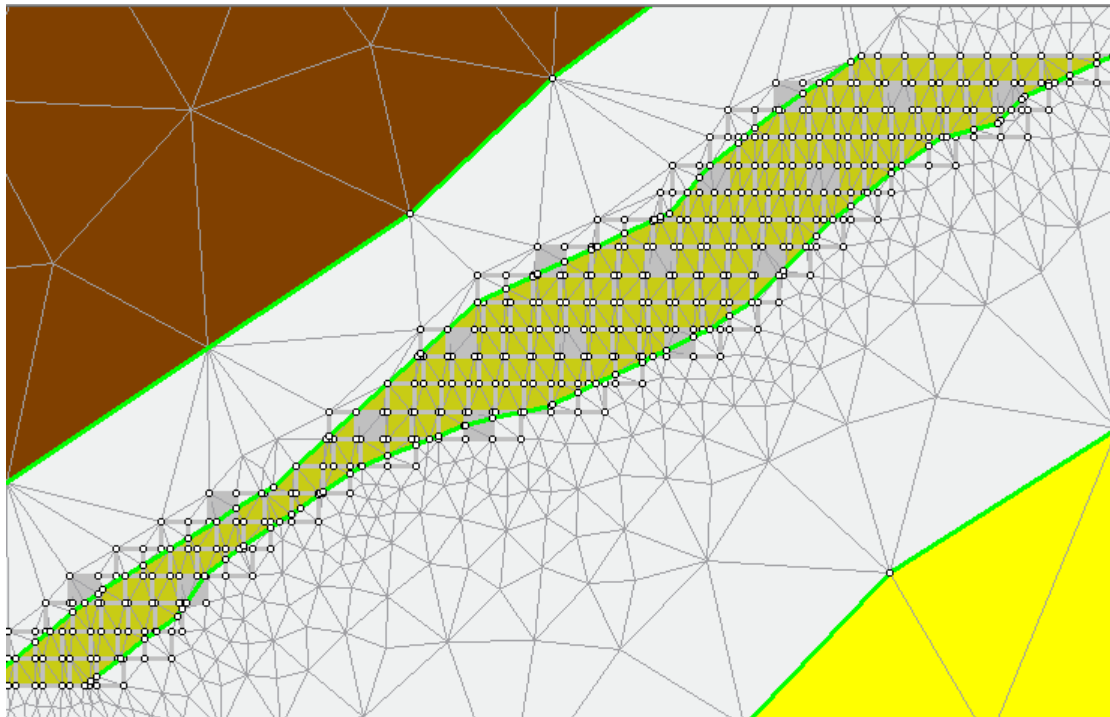
### 4.3.9 Σχεδιασμός

Όπως προ είπαμε η φορά της εκσκαφής είναι ανοδική. Η εκσκαφή γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε εκσκαφή να ξεκινάει αφού εξαντληθεί και πληρωθεί με υλικό λιθογόμωσης η προηγούμενη. Οι στοές απέχουν μεταξύ τους 12m, αυτό σημαίνει ότι σε κάθε όροφο τα ταυτόχρονα μέτωπα που λειτουργούν ανά όροφο απέχουν μεταξύ τους 12m και η απόσταση μεταξύ των ορόφων εκμετάλλευσης είναι 8m, επίσης ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε ο σχεδιασμός των στοών να μην είναι μεταξύ τους στην ίδια κατακόρυφο.

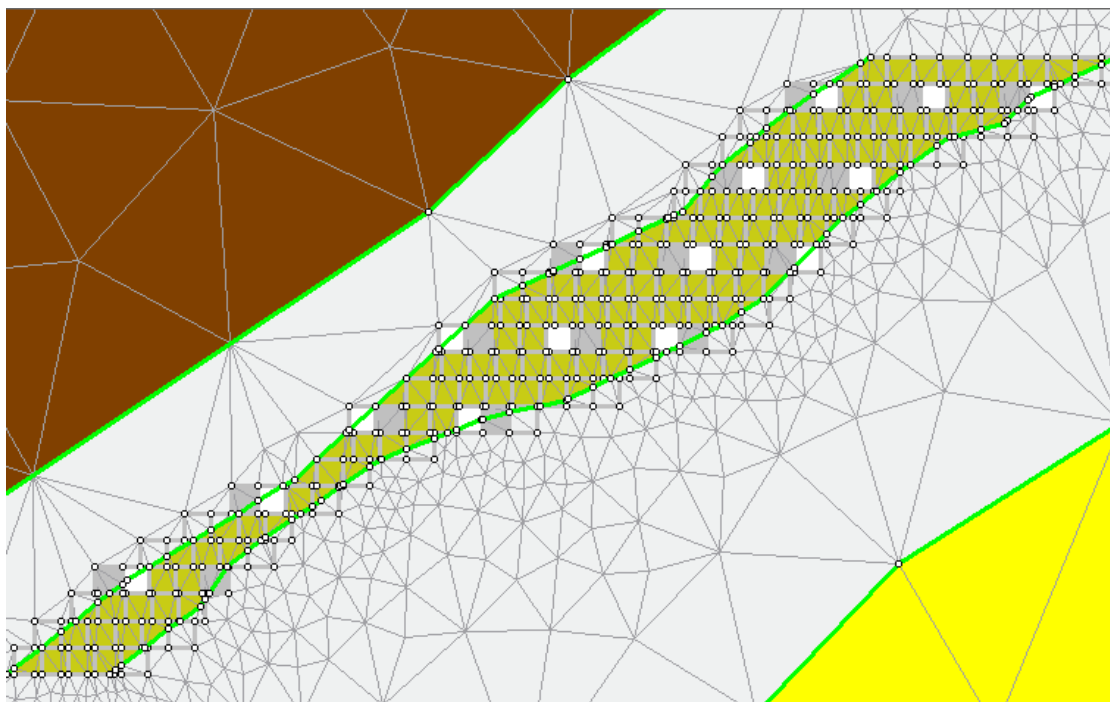


Εικόνα 16: Μοντέλο προσομοίωσης εκσκαφής.

Η εκσκαφή ορίζεται με την εντολή: Properties → Assign Properties → Excavate και η λιθογόμωση με την εντολή Properties → Assign Properties → Λιθογόμωση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τα σαράντα εννέα στάδια μέχρι την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος και την αντικατάσταση του από υλικό λιθογόμωσης.

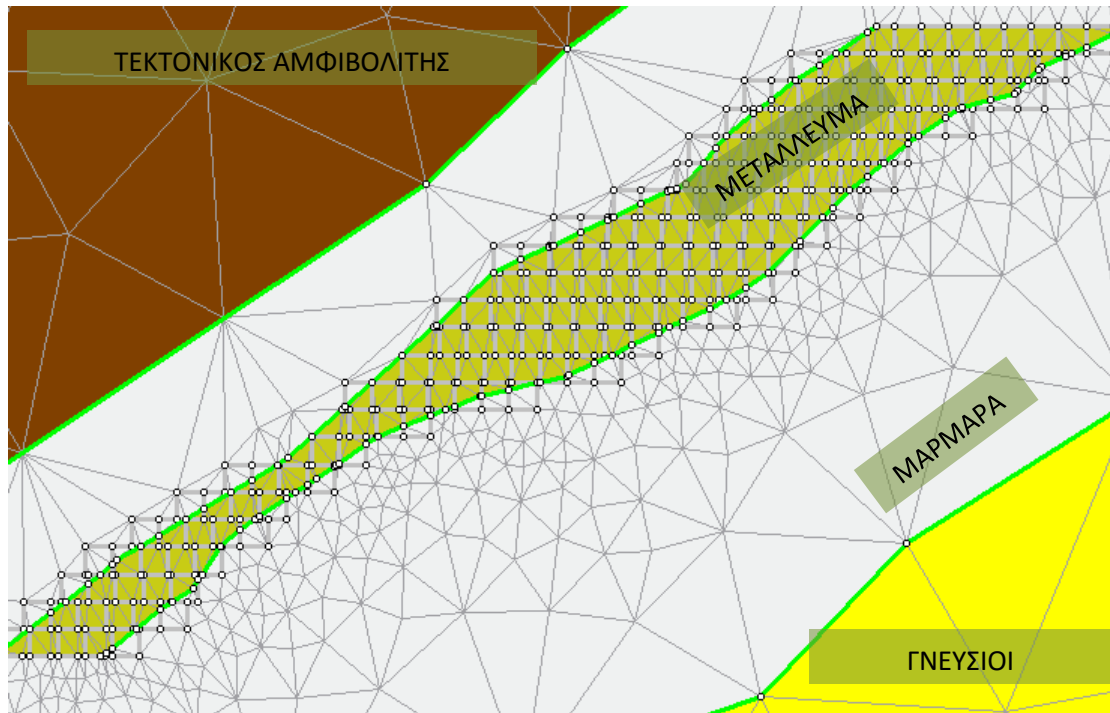


Εικόνα 17: Αμέσως μετά την εκσκαφή γίνεται η πλήρωση των ανοικτών στοών με υλικό λιθογόμωσης.

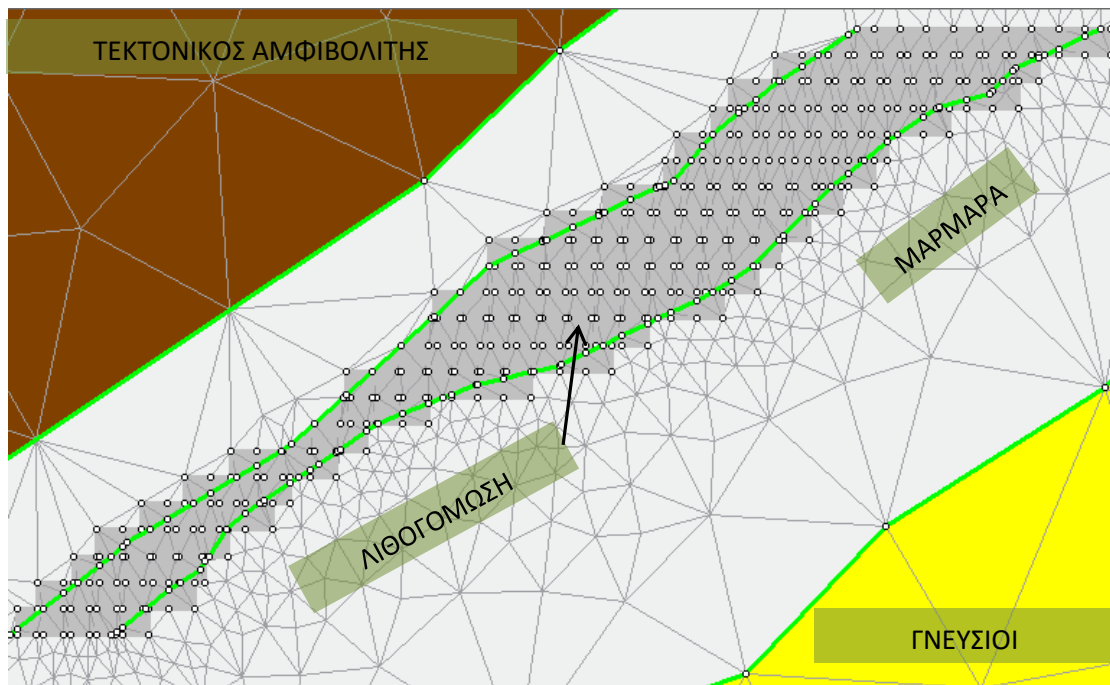


Εικόνα 18: Φάση εκσκαφής αμέσως επόμενων στοών ανά όροφο, μετά την λιθογόμωση των προηγούμενων στοών.





Εικόνα 19: Προσομοίωση αρχικού σταδίου εκμετάλλευσης μεταλλείου Ολυμπιάδας χωρίς χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 20: Προσομοίωση τελικού σταδίου εκμετάλλευσης μεταλλείου Ολυμπιάδας χωρίς χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

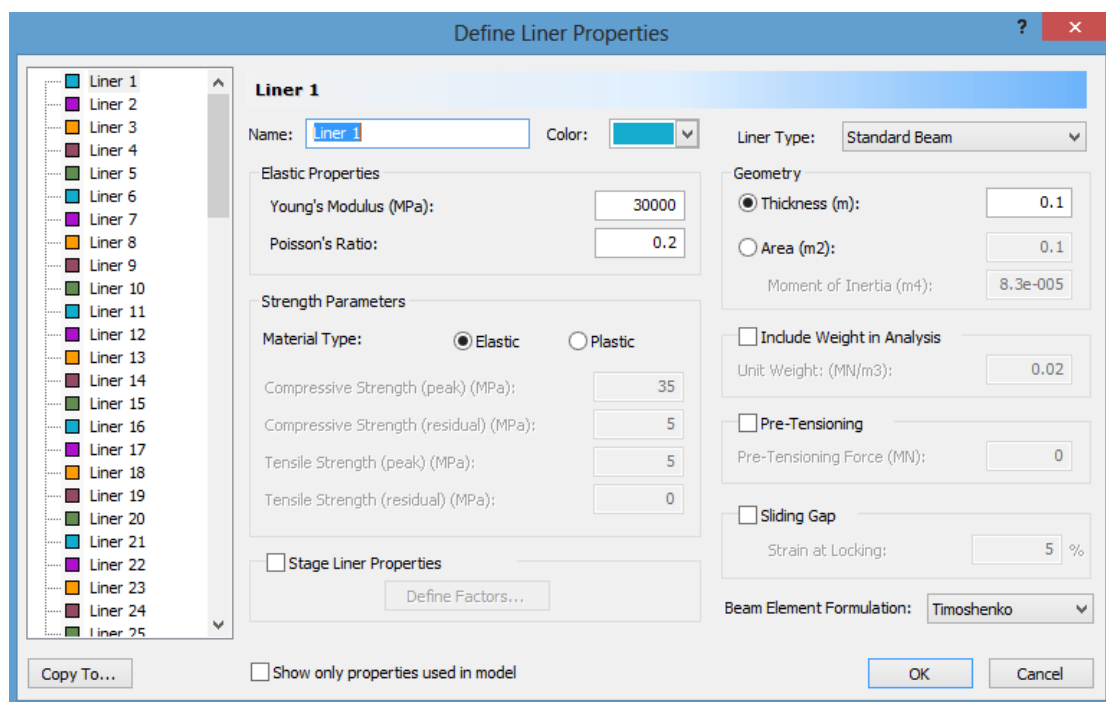
Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία το μοντέλο πλέον θα είναι έτοιμο για ανάλυση.

### 4.4 Αριθμητική προσομοίωση μοντέλου με χρήση μέτρων υποστήριξης.

Στο μοντέλο αυτό θα εξεταστούν οι μετακινήσεις, των περιφερειακών του κοιτάσματος σχηματισμών. Στο μοντέλο αυτό θα γίνει χρήση υποστήριξης με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, συγκεκριμένου πάχους, αμέσως μετά την εκσκαφή και στην συνέχεια, μετά την εξόφληση της στοάς θα ακολουθήσει η πλήρωση με υλικό λιθογόμωσης.

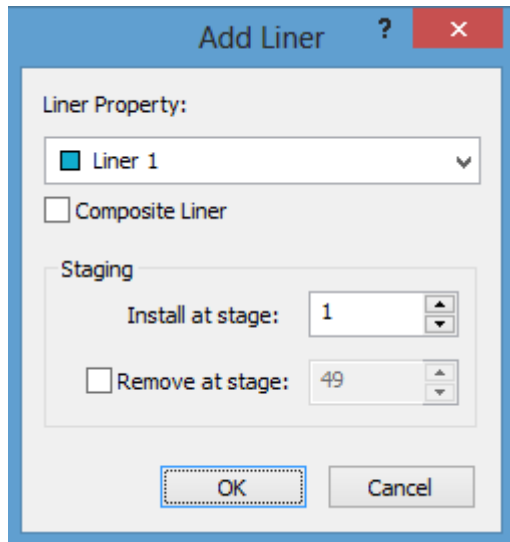
Ξεκινώντας ορίζουμε τις ιδιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος επιλέγοντας: Properties → Define liners,

Όπου εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα. Το πάχος της υποστήριξης θα το βάλουμε 10cm, το μέτρο ελαστικότητας θα είναι ίσο με 30 GPa και ο λόγος Poisson θα είναι ίσος με 0,2.



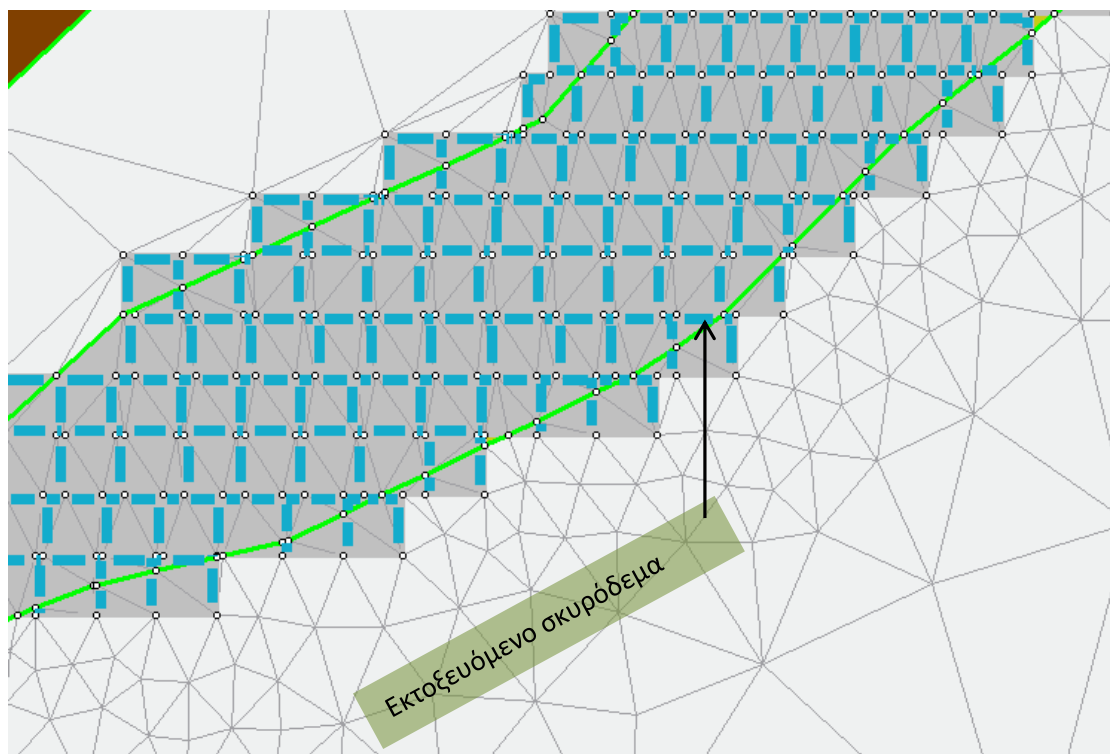
Εικόνα 21: Ιδιότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Για να τοποθετήσουμε το σκυρόδεμα στα σωστά στάδια, δηλαδή μετά την εκσκαφή και πριν την λιθογόμωση πηγαίνουμε : Support→Add Liner, όπου εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα.

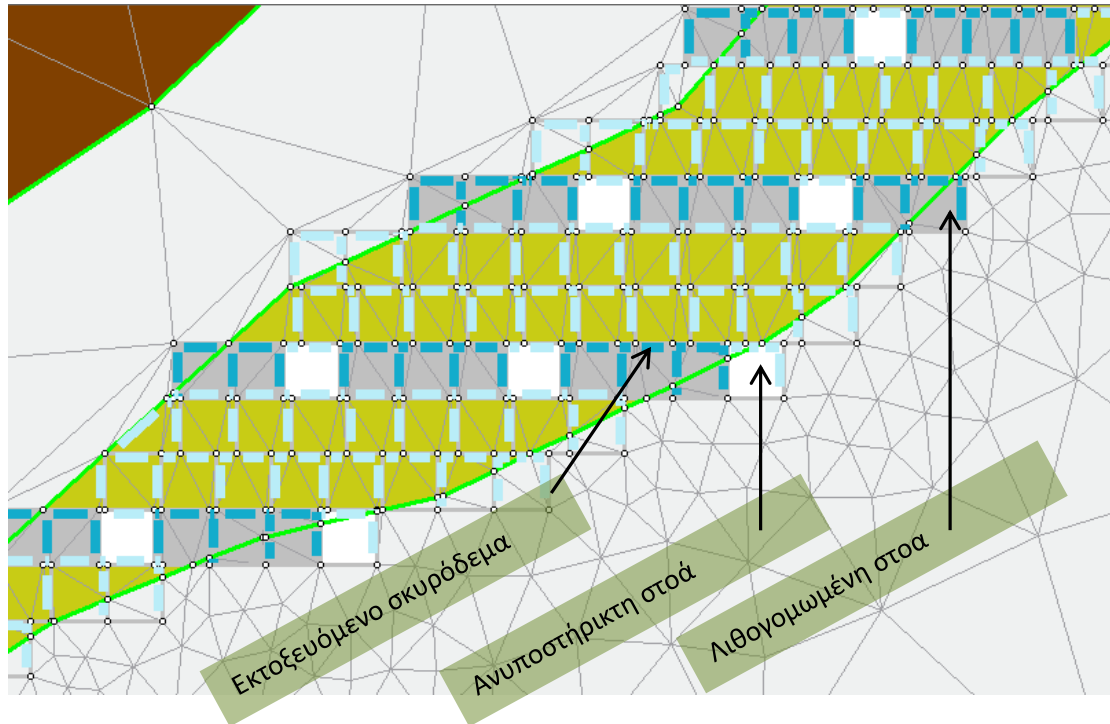


Εικόνα 22: Προσθήκη εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μοντέλο.

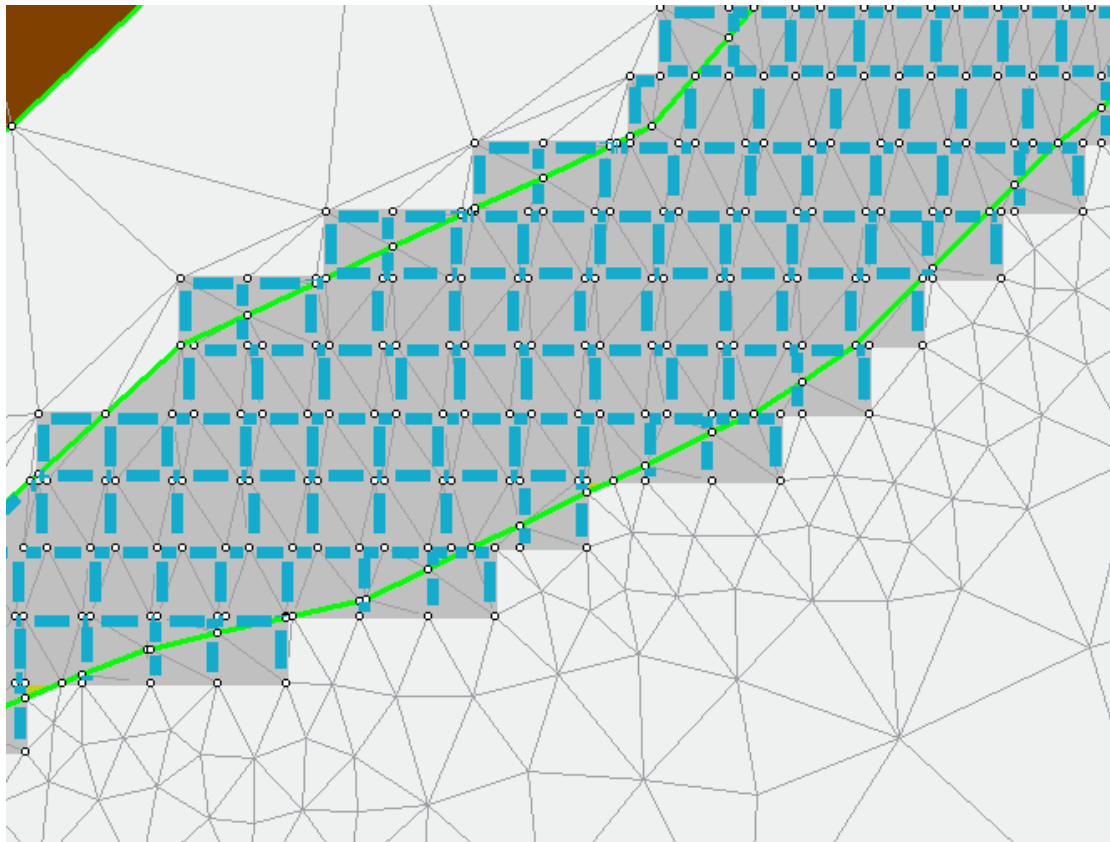
Έτσι έχει τοποθετηθεί με τον τρόπο αυτό η υποστήριξη σε όλες τις στοές την εκμετάλλευσης με χρώμα γαλάζιο. Τέλος ακολουθούν τα στάδια της λιθογόμωσης μέχρι την ολική εξόφληση του μεταλλεύματος.



Εικόνα 23: Εμφάνιση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μοντέλο.



Εικόνα 24:Φάσεις εκμετάλλευσης όπου εμφανίζονται, η ανυποστήρικτη στοά η Λιθογωμμένη στοά, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και η Λιθογόμωση.



Εικόνα 25: Τέλος εκμετάλλευσης με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και λιθογόμωσης.

### 4.5 Παραμετρικά μοντέλα

#### 4.5.1 Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό θα δημιουργηθούν 2 νέα μοντέλα στα οποία θα γίνουν κάποιες διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες της λιθογόμωσης, με σκοπό την μελέτη των μετατοπίσεων περιφερειακά και στο σύνολο του κοιτάσματος, χωρίς την χρήση μέτρων υποστήριξης.

- Στο πρώτο μοντέλο θα μεταβάλουμε την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη της λιθογόμωσης από 4MPa σε 1MPa.

#### 4.5.2 Δείκτης GSI

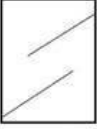
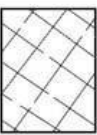



Ο δείκτης GSI (Geological Strength Index) είναι ο γεωλογικός δείκτης αντοχής και χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας της βραχομάζας. Προτάθηκε το 1995 από τον Hoek και δίνει έμφαση σε βραχομάζες σχετικά φτωχής ποιότητας. Ο σχεδιασμός του συστήματος GSI έχει πολλά πλεονεκτήματα για  $RMR < 40$ , λόγω καλύτερης διακριτοποίησης, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις τιμής. Το σύστημα GSI στηρίζεται σε (Καββαδάς, 2000):

- Δομή της βραχομάζας που χαρακτηρίζει τον βαθμό που αλληλομπλέκονται τα βραχώδη τεμάχια μεταξύ τους, και
- Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής τους αντοχής.

Το συγκεκριμένο σύστημα εφαρμόζεται σε βραχομάζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού  $< 20\%$  του συνολικού τους όγκου της.



## Αριθμητική προσομοίωση μοντέλων

<p><b>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ</b> (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζομενοι στην εμφάνιση της βραχόμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. <u>Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες.</u> Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχόμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p style="text-align: center;"><b>ΔΟΜΗ</b></p>		<p style="text-align: center;"><b>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</b></p>				
		<p><b>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ</b> Πολύ τραχιές, μη αποσθαρωμένες επιφάνειες</p>	<p><b>ΚΑΛΗ</b> Τραχιές, ελαφρά αποσθαρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p>	<p><b>ΜΕΤΡΙΑ</b> Λείες, μετρίως αποσθαρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p>	<p><b>ΠΤΩΧΗ</b> Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσθαρωμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p>	<p><b>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ</b> Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσθαρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>
		<p style="text-align: center;"><b>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> →</p>				
	<p><b>INTACT OR MASSIVE</b> - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	90			N/A	N/A
	<p><b>BLOCKY</b> - Αδιατάρακτη βραχόμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	80	70			
	<p><b>VERY BLOCKY</b>- Μερικώς διαταραγμένη βραχόμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>	60	50			
	<p><b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>	40	30			
	<p><b>DISINTEGRATED</b> - Ισχυρά κερματισμένη βραχόμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογυλωμένων τεμαχίων</p>	20				
	<p><b>LAMINATED/SHEARED</b> - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχόμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	N/A	N/A		10	
		<p style="text-align: center;">← <b>ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΛΛΗΛΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ</b></p>				

Εικόνα 26: Διάγραμμα δείκτη γεωλογικής αντοχής GSI ( Καββαδάς, 2000).

### 4.5.3 Η αντοχή $\sigma_c$

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υλικού λιθογόμωσης μεταβάλλεται από 4 MPa σε 1 MPa.

Η μεταβολή αυτή έχει μεγάλη σημασία στις μετακινήσεις γύρω από την εκμετάλλευση, καθώς όσο μικρότερη αντοχή, συνεπάγεται στην δημιουργία μίγματος λιθογόμωσης με μικρότερο ποσοστό σε τσιμέντο.

Λιγότερο τσιμέντο στο σώμα της λιθογόμωσης σημαίνει λιγότερα έξοδα, άρα και μεγαλύτερη οικονομία στην παραγωγή του υλικού αυτού.

Στο συγκεκριμένο μείγμα του υλικού λιθογόμωσης τα ποσοστά συμμετοχής όπως προαναφέρθηκαν είναι 70% αδρομερές τέλμα του εργοστασίου εμπλουτισμού, 20% νερό και 10% τσιμέντο.

Άρα το ποσοστό του τσιμέντου για να προσφέρει στο μίγμα αντοχή 1MPa θα κινηθεί χαμηλότερα από το 10% καθώς οι απαιτήσεις στην αντοχή του υλικού είναι χαμηλότερες.

### 5 Αποτελέσματα

#### 5.1 Εισαγωγή

Οι αναλύσεις των εκσκαφών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έδωσαν πληροφορίες σχετικά με τις τασικές συνθήκες και τη κινητική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών περιφερειακά και στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης παρουσιάζονται με βάση τη τομή έρευνας, ως κατανομές των μετακινήσεων, με χρωματική διαβάθμιση στις παρακάτω εικόνες.

Αναμένονται οι τιμές των μετακινήσεων που θα προκύψουν από την προσομοίωση, ειδικά στο μοντέλο χωρίς υποστήριξη να αποκλίνουν σημαντικά από τις πραγματικές, δεδομένου του κύκλου εργασιών που περιλαμβάνει συμβατικό τρόπο όρυξης, δηλαδή, διάτρηση ανατίναξη, ξεσκάρωμα, ξεμπάζωμα μεταφορά υλικών και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

#### 5.2 Προσομοίωση μοντέλου εκμετάλλευσης χωρίς χρήση στοιχείων υποστήριξης.

Οι μετακινήσεις που σημειώθηκαν στο μοντέλο αυτό, παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν, χωρισμένες στα επιμέρους στάδια. Σε αυτές παρουσιάζεται η συμπεριφορά της βραχομάζας περιμετρικά και στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

Όπως παρατηρούμε κατά την προσομοίωση στο στάδιο 2, έχουμε την εκσκαφή των πρώτων στοών, όπου παρατηρούνται μικρές μετακινήσεις της τάξης των χιλιοστών.

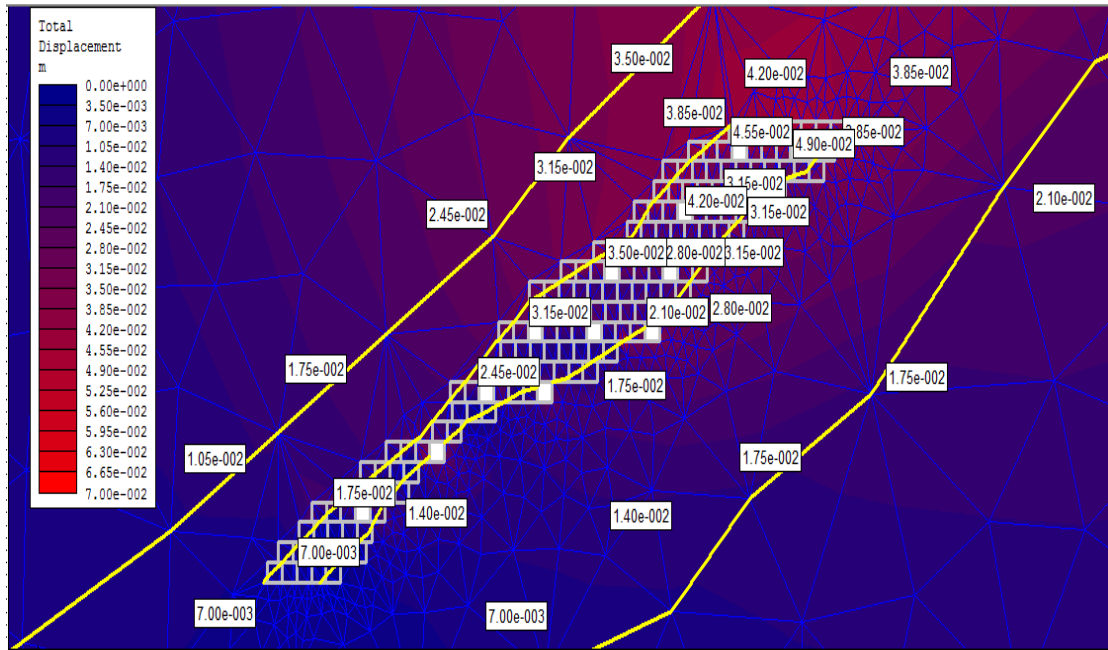
Οι διακυμάνσεις αυτές μεταβάλλονται από 4,5mm έως 9,00mm στις περιφερειακές περιοχές του κοιτάσματος, επάνω από αυτό και εντός του, ενώ κάτω από αυτό οι μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν είναι της τάξης 2,7mm έως 4,5mm. Στο κάτω δεξιά τμήμα του κοιτάσματος παρατηρήθηκαν μετακινήσεις της τάξης των 0,995mm. Στο εσωτερικό του κοιτάσματος και περιμετρικά των ανοιγμάτων σημειώνονται οι μεγαλύτερες μετακινήσεις, με διακυμάνσεις από 2,7mm έως 1,02cm. Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο 3 στο οποίο γίνεται η πλήρωση των πρώτων κενών με λιθογόμωση. Οι μεταβολές που παρατηρήθηκαν από την προσθήκη της λιθογόμωσης είναι πολύ μικρές, με τις μεγαλύτερες μετακινήσεις να σημειώνονται στα σύνορα των μαρμάρων με τιμές που κυμαίνονται από 3mm έως και 5,40mm στην συγκεκριμένη περιοχή.



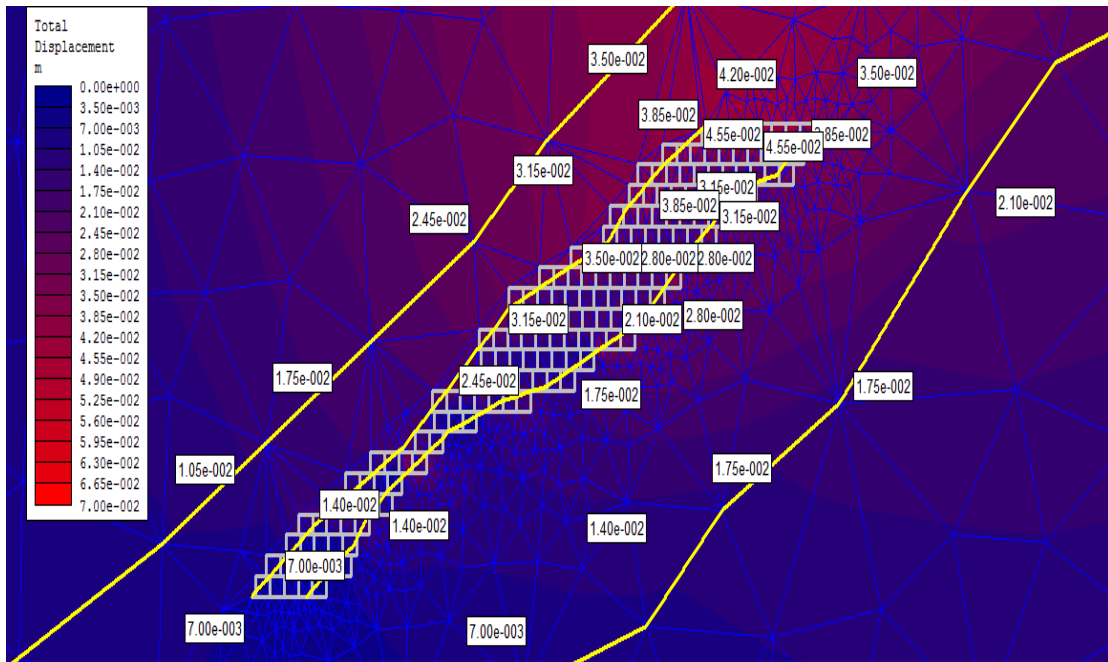
---



## Αποτελέσματα

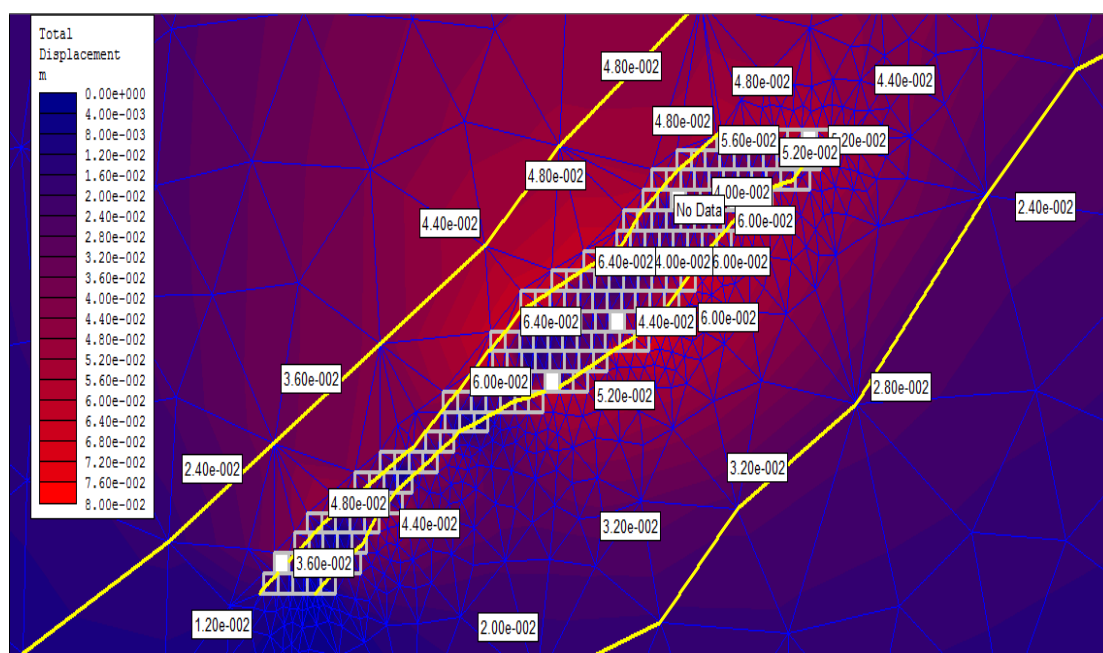


Εικόνα 29: 8<sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την εκσκαφή των στοών του μεταλλείου.

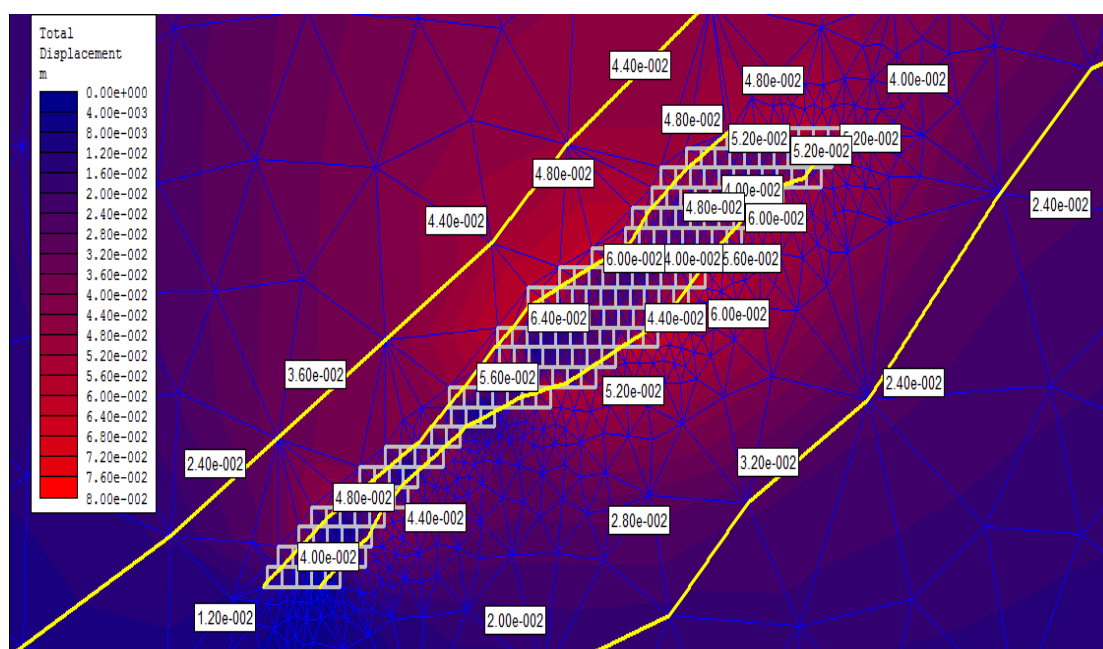


Εικόνα 30: 9<sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την λιθογόμωση των στοών μεταλλείου.

## Αποτελέσματα



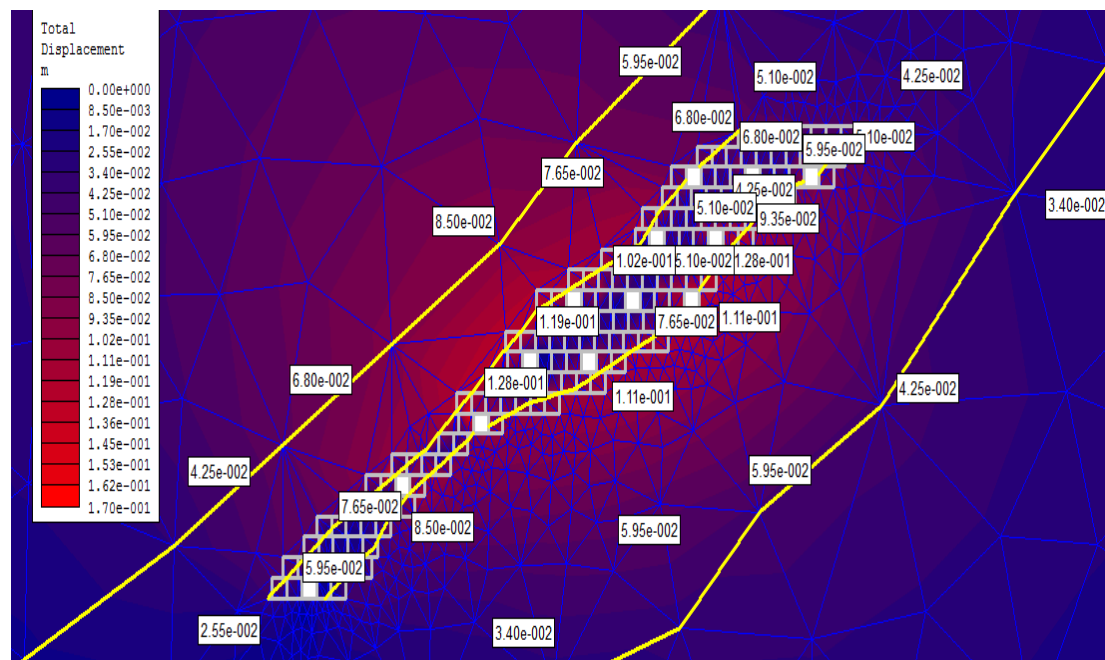
Εικόνα 31: 16<sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την εκσκαφή των στοών του μεταλλείου.



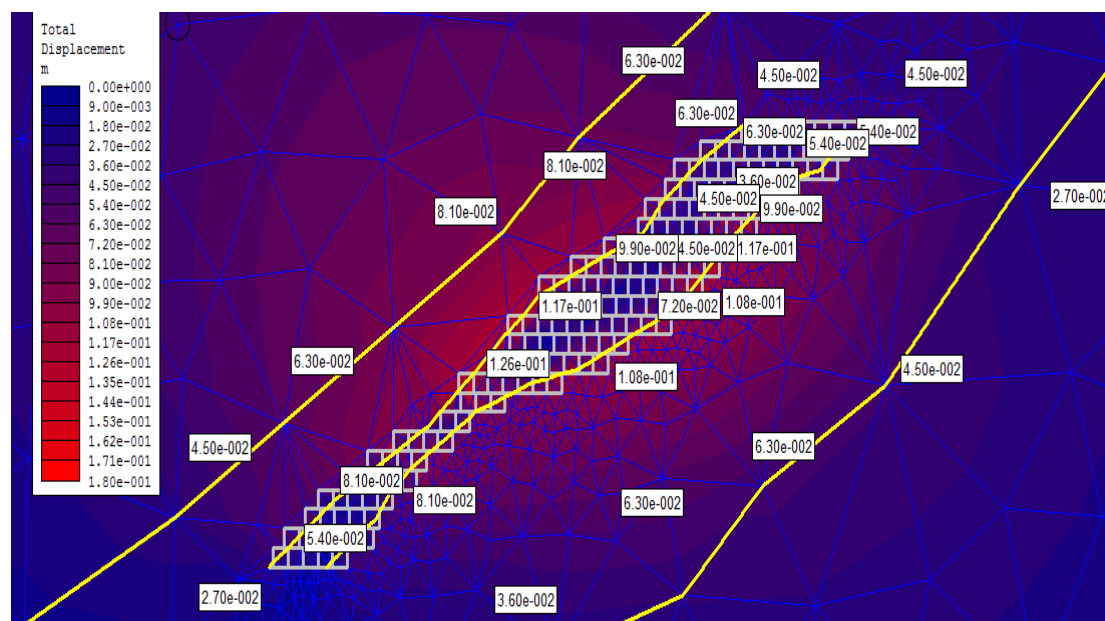
Εικόνα 32: 17<sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την λιθογόμωση των στοών μεταλλείου.

Προχωρώντας στα στάδια 16-17, καθώς η εκμετάλλευση προχωράει οι μετακινήσεις που παρατηρούνται είναι της τάξης των εκατοστών. Κατά τα στάδια αυτά της εκμετάλλευσης τα νέα πατώματα στις στοές που ορύσσονται αποτελούνται από λιθογόμωση των κάτω ορόφων στα προηγούμενα στάδια. Στα στάδια αυτά οι τιμές των

μετακινήσεων που σημειώθηκαν είναι από 2,01cm έως 6,8cm, επάνω από το κοίτασμα, στο εσωτερικό του οι τιμές που λαμβάνουν είναι από 8mm έως 7,2cm. Στο μέρος κάτω από το κοίτασμα οι μετακινήσεις κυμαίνονται από 1,57mm έως και 3,6cm.



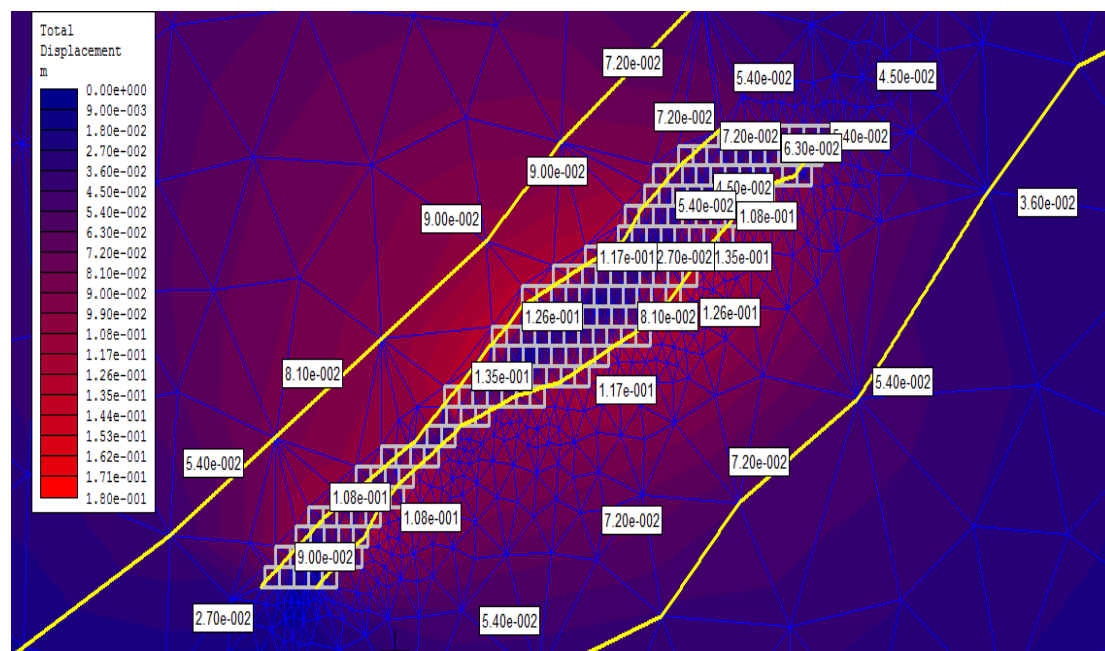
Εικόνα 33: 22<sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την εκσκαφή των στοών του μεταλλείου.



Εικόνα 34: 23<sup>ο</sup> στάδιο εκμετάλλευσης, μετακινήσεις μετά την λιθογόμωση των στοών μεταλλείου.

---

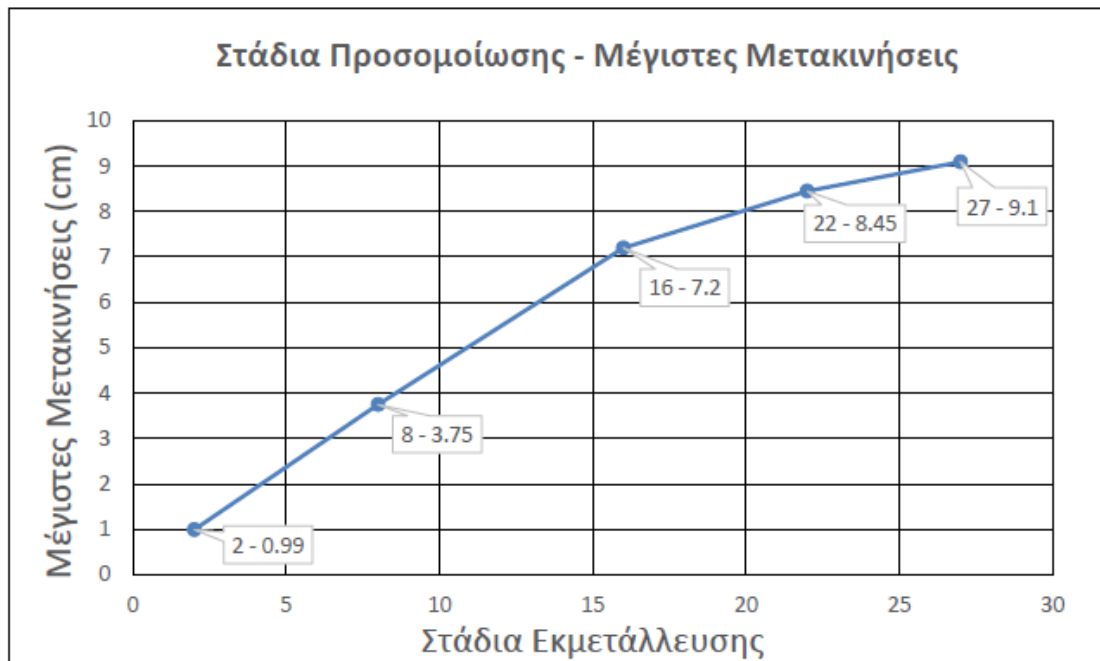
Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν είναι της τάξης των 9,8cm και είναι στο άνω μέρος της εκμετάλλευσης.



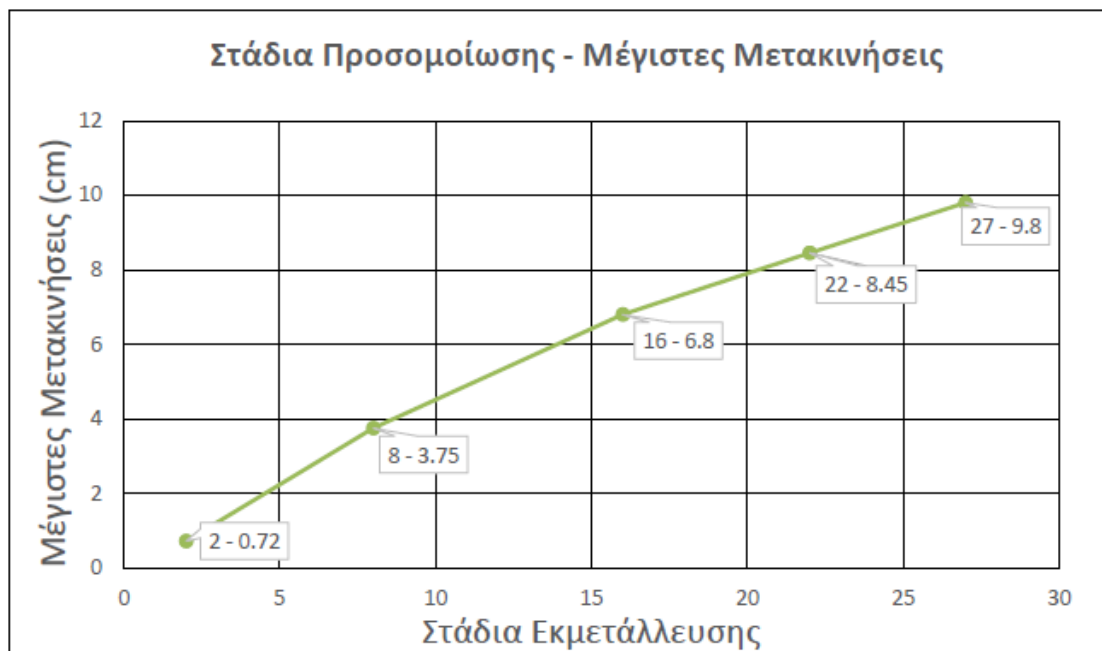
79



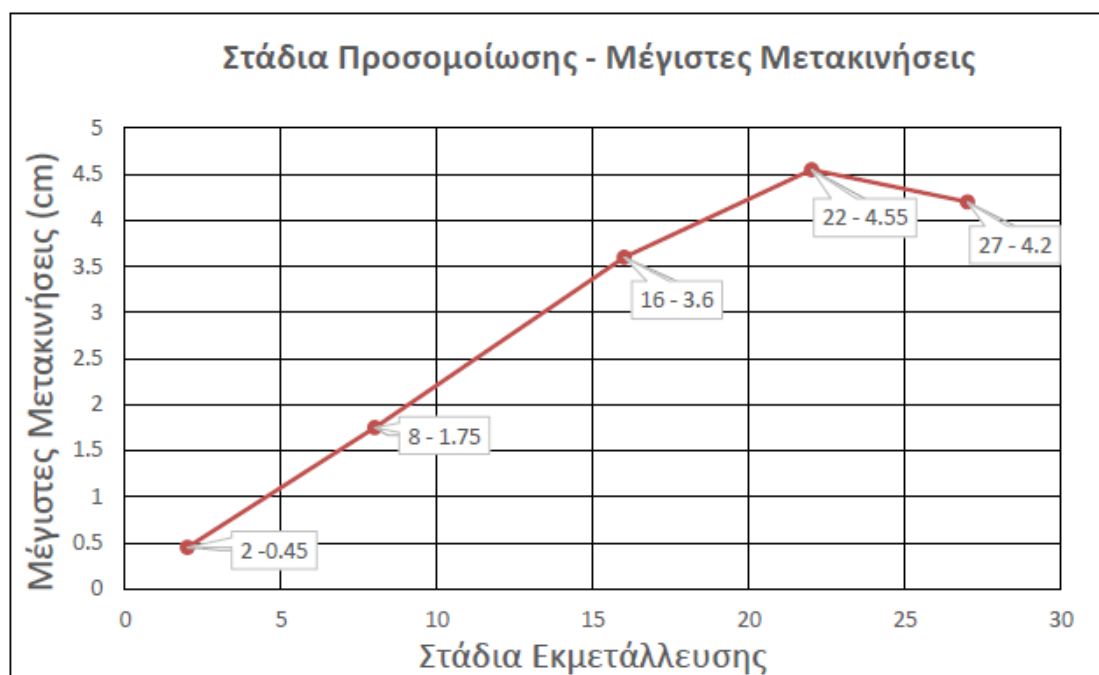
## Αποτελέσματα



Διάγραμμα 1: Στάδια εκμετάλλευσης και μετακινήσεις που λαμβάνονται στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

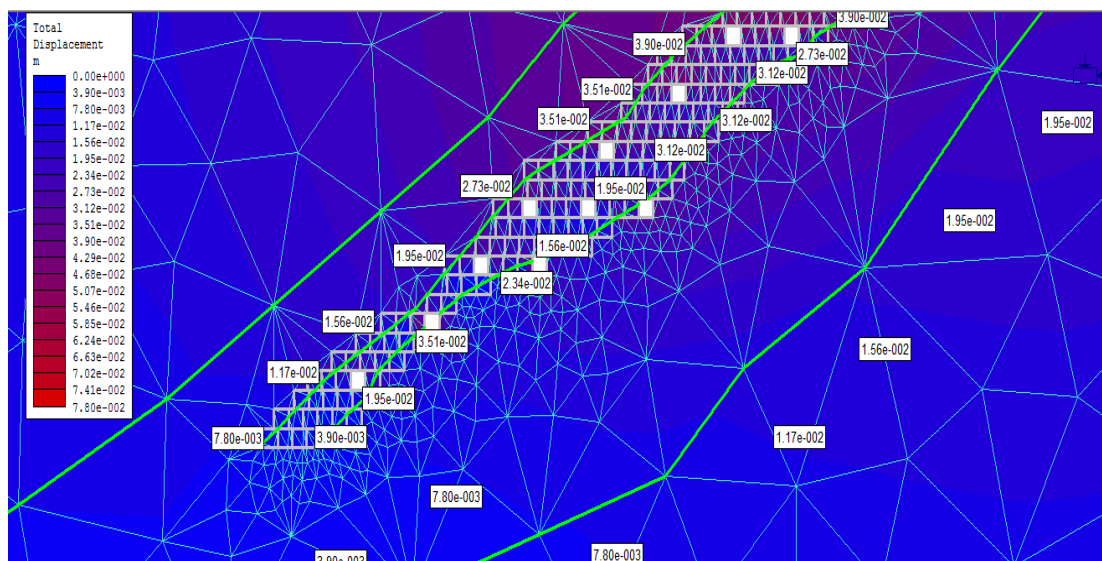


Διάγραμμα 2: Στάδια εκμετάλλευσης και μετακινήσεις πάνω από το κοίτασμα.

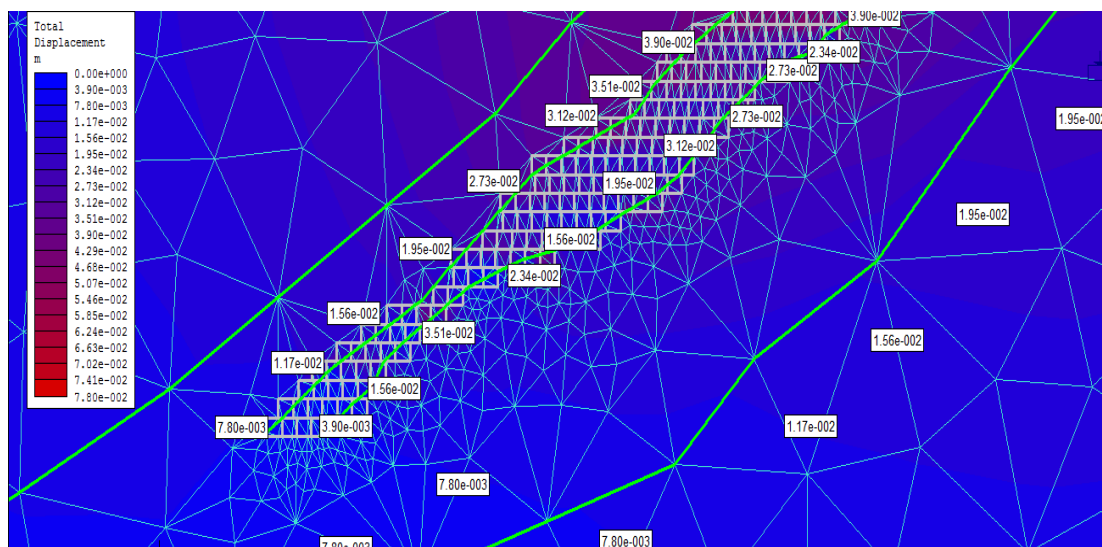


Διάγραμμα 3: Στάδια εκμετάλλευσης και μετακινήσεις στην περιοχή κάτω από το κοίτασμα

### 5.3 Προσομοίωση με μεταβολή στην αντοχή $\sigma_c$



Εικόνα 36: Στάδιο προσομοίωσης 8°, με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση.



Εικόνα 37: Στάδιο προσομοίωσης 9°, με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση.

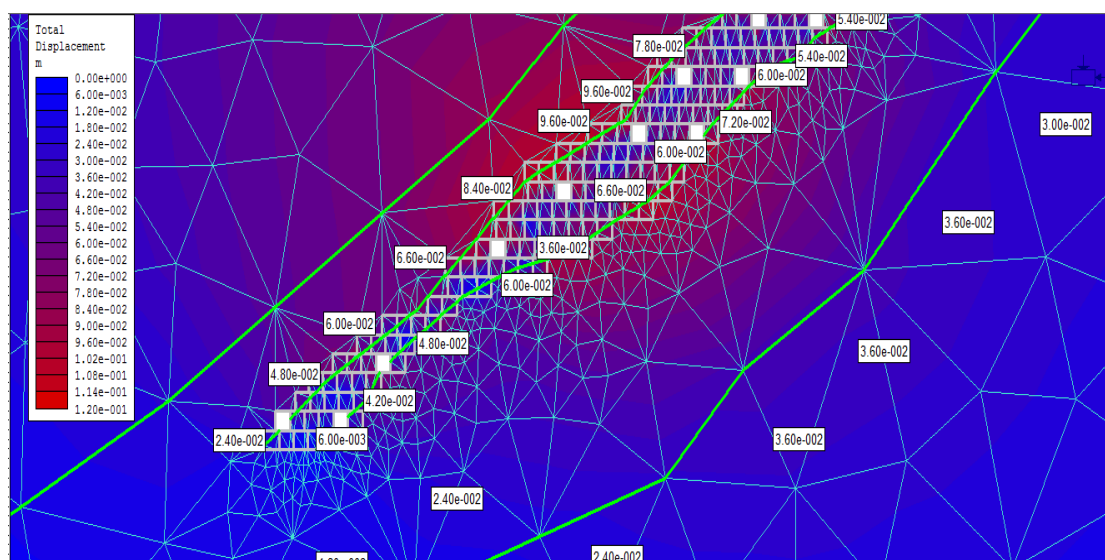
Η προσομοίωση αυτή θα γίνει στο μοντέλο χωρίς υποστήριξη μεταβάλλοντας την ποσότητα του τσιμέντου στην λιθογόμωση.

Οι τιμές έχουν ένα εύρος από 7,5mm έως 5,25cm κατά τα στάδια 8 και 9 εντός του κοιτάσματος.

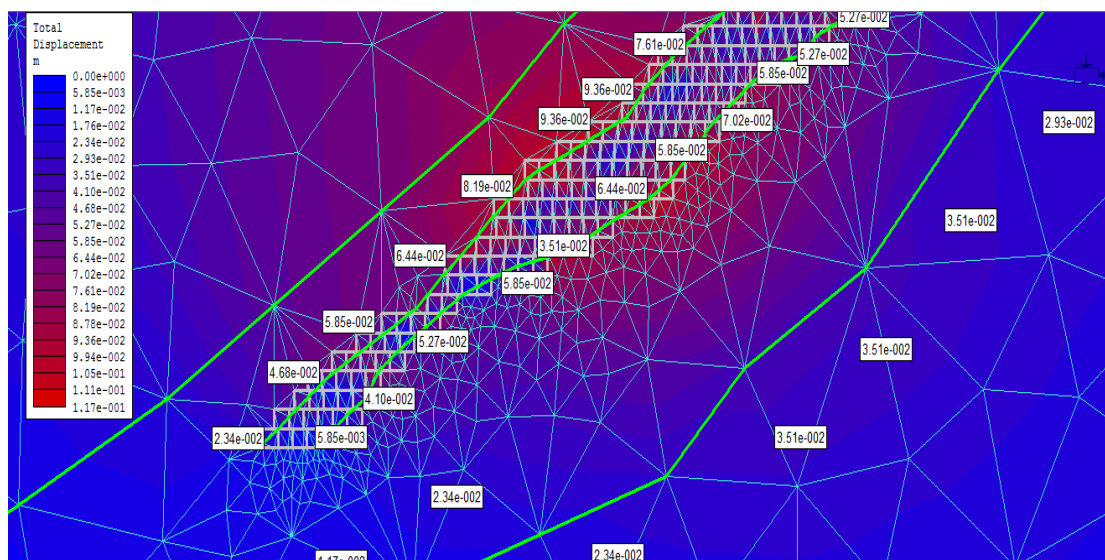
Στο ανώτερο τμήμα οι μετακινήσεις κυμαίνονται από 2,25cm έως και 4,5cm, ενώ στο κατώτερο τμήμα του μοντέλου οι μετακινήσεις λαμβάνουν τιμές από 3cm κοντά στο κοίτασμα και όσο βαθθάνει οι τιμές μειώνονται από 9,62mm έως και 3,62mm.



## Αποτελέσματα



Εικόνα 38: Στάδιο προσομοίωσης 16°, με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση από 4MPa σε 1MPa.



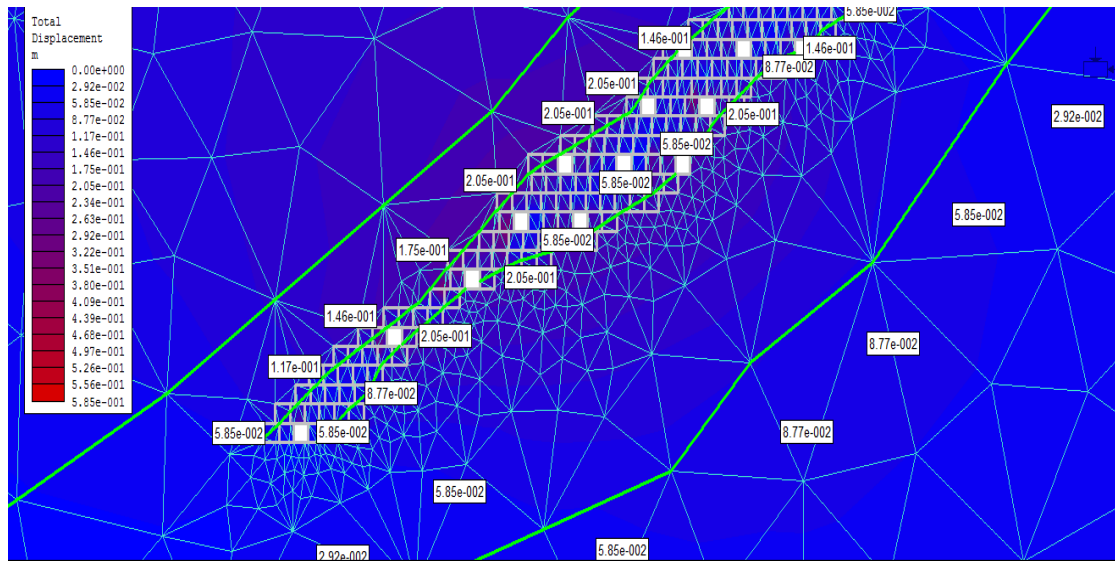
Εικόνα 39: Στάδιο προσομοίωσης 17°, με μείωση θλιπτικής αντοχής στη λιθογόμωση από 4MPa σε 1MPa.

Όπως είναι φυσικό μειώνοντας την ποσότητα του τσιμέντου μειώνεται και η αντοχή του, στην περίπτωση μας η αντοχή έχει μειωθεί από 4MPa σε 1MPa.

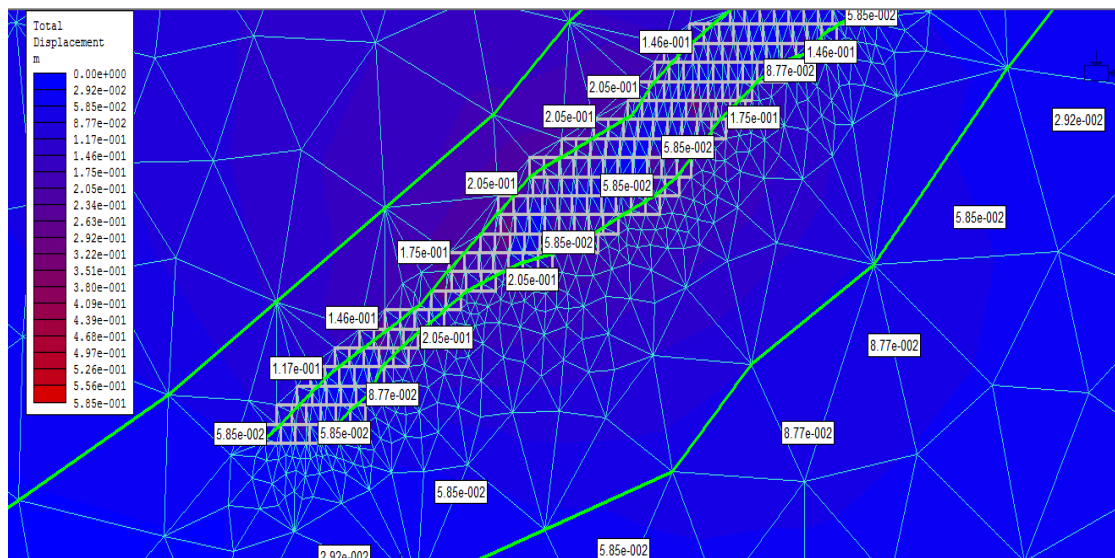
Οι τιμές των μετακινήσεων στην περιφέρεια του κοιτάσματος κυμαίνονται από 5,4cm έως και 11,7cm. Εντός του κοιτάσματος οι μετακινήσεις έχουν αρκετά υψηλές τιμές από 1,8cm έως 13,5cm και αυτό οφείλεται στην χρήση των μηχανημάτων, των

## Αποτελέσματα

εργασιών που εκτελούνται εντός καθώς και στην χαμηλή μηχανική αντοχή του υλικού της λιθογόμωσης.



Εικόνα 40: Μετακινήσεις κατά το στάδιο 22°, για υλικό λιθογόμωσης με μειωμένη θλιπτική αντοχή.

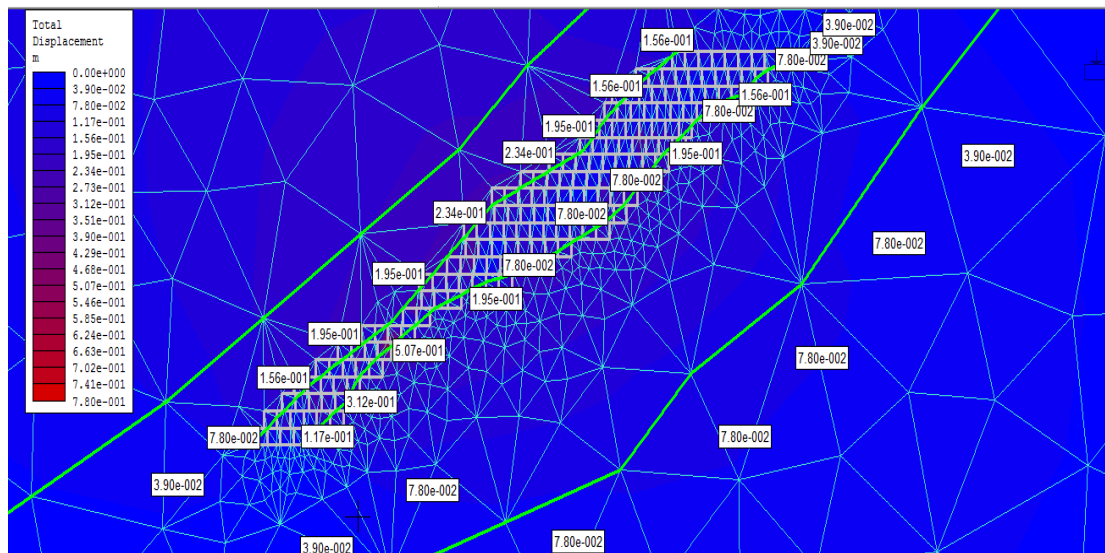


Εικόνα 41: Μετακινήσεις κατά το στάδιο 23°, για υλικό λιθογόμωσης με μειωμένη θλιπτική αντοχή.

Κατά τα στάδια 22-23 όπως φαίνεται και στις σχετικές εικόνες σημειώνονται αρκετά ψηλές τιμές μετατοπίσεων από 10cm έως 14cm στο άνω τμήμα του μοντέλου στην περιοχή των αμφιβολιτών.

## Αποτελέσματα

Οι μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των μαρμάρων κυμαίνονται από 14cm έως και 20cm στα όρια με το κοίτασμα. Εντός του κοιτάσματος οι μετακινήσεις ξεκινούν από 2cm και αγγίζουν και τα 18cm.



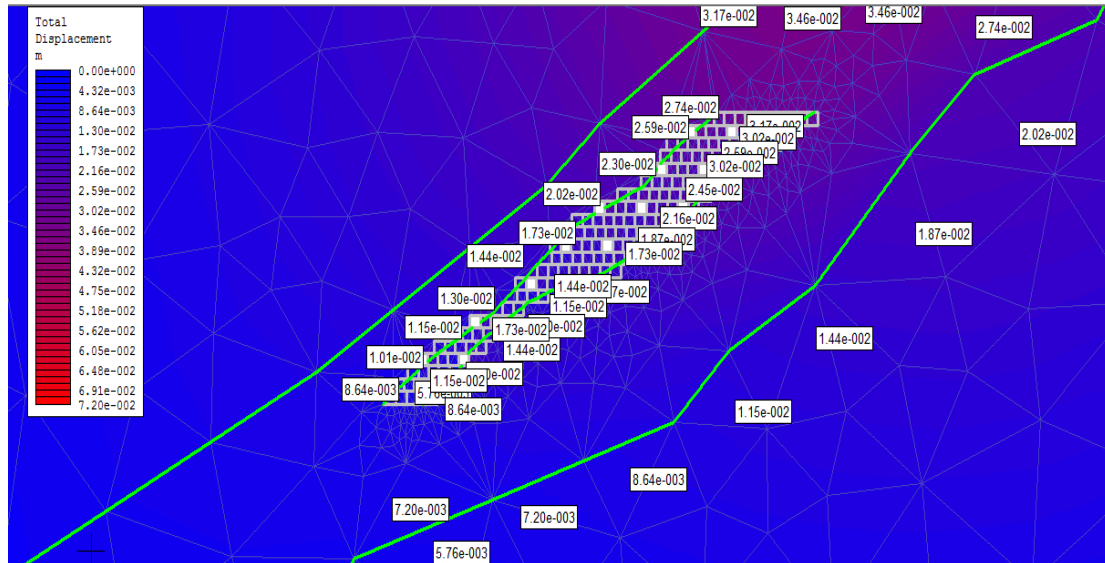
Εικόνα 42: Μετακινήσεις κατά το τελικό στάδιο 27°, για υλικό λιθογόμωσης με μειωμένη θλιπτική αντοχή.

Η μείωση αυτή στην αντοχή της λιθογόμωσης οφείλεται στην μείωση της περιεκτικότητας της λιθογόμωσης σε τσιμέντο, το οποίο δεν επαρκεί για την πλήρωση των κενών της εκμετάλλευσης.

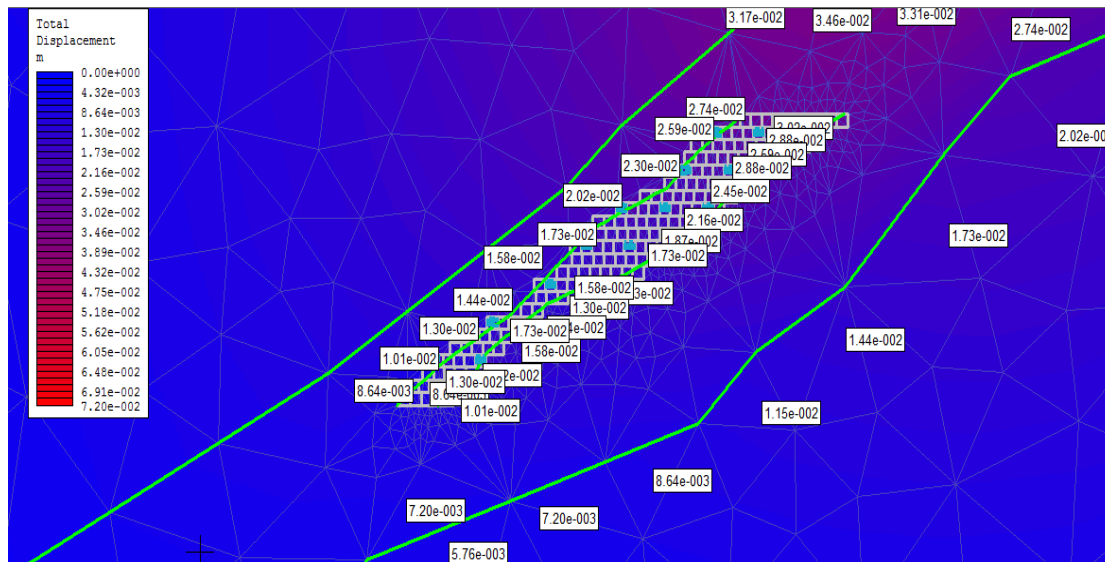
Οι μέγιστη μετακίνηση στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης είναι 22cm, πάνω και γύρω από το κοίτασμα οι τιμές κυμαίνονται από 6cm έως 16cm στο τμήμα του τεκτονικού αμφιβολίτη.

### 5.4 Προσομοίωση μοντέλου εκμετάλλευσης με χρήση στοιχείων υποστήριξης.

Σε αυτό το μοντέλο προσομοίωσης γίνεται χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέσο υποστήριξης και στη συνέχεια ακολουθεί το κλείσιμο των εξοφλημένων στοών με την χρήση λιθογόμωσης. Οι μετακινήσεις που σημειώθηκαν είναι της τάξης των 3,2mm έως 7,2mm περιφερειακά του κοιτάσματος. Στην περιοχή των μαρμάρων και των αμφιβολιτών οι μετακινήσεις είναι από 1,17mm έως και 1,5mm.



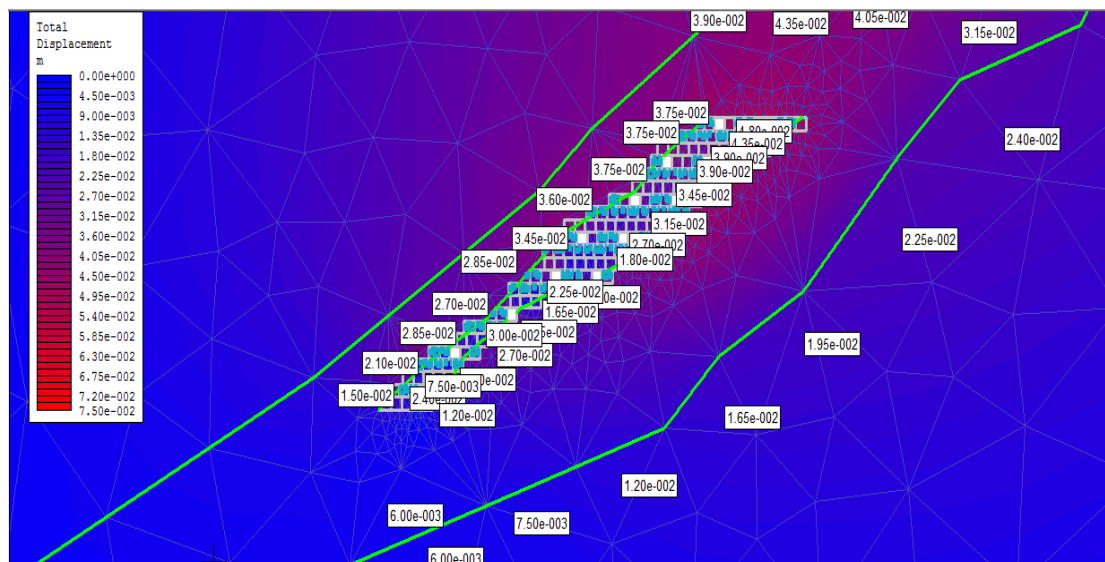
Εικόνα 43: 2<sup>ο</sup> στάδιο προσομοίωσης μοντέλου με υποστήριξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.



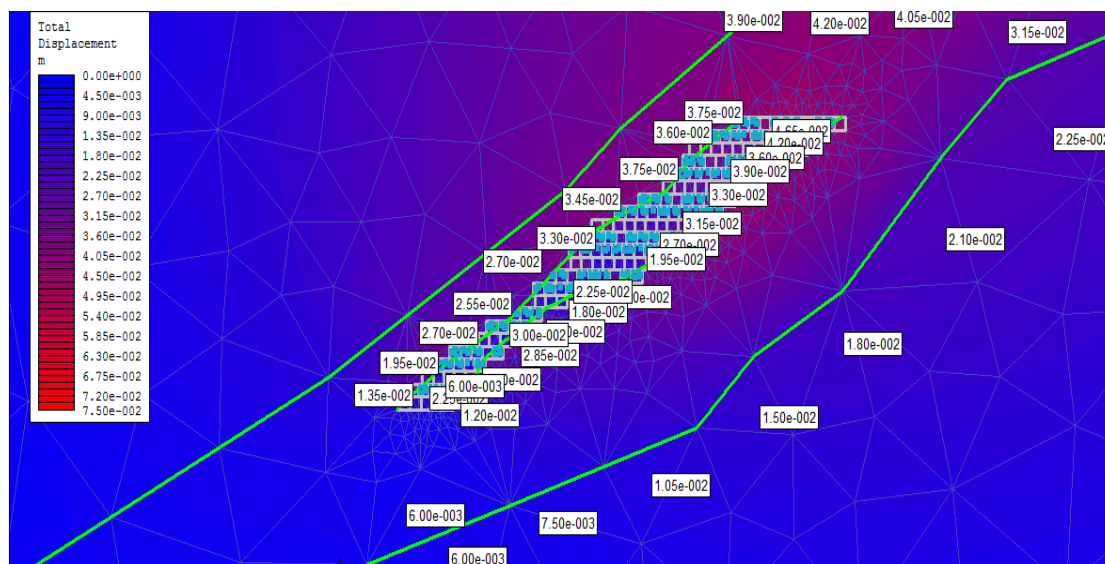
Εικόνα 44: 4<sup>ο</sup> στάδιο προσομοίωσης μοντέλου με υποστήριξη εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.

## Αποτελέσματα

Οι μετακινήσεις που καταγράφονται κατά τα στάδια 20-22 είναι από 3,30cm έως και 4,2cm στο άνω τμήμα της εκμετάλλευσης. Περιφερειακά των στοών εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις που σημειώνονται είναι από 6mm έως 4,5cm. Στην περιοχή κάτω από το κοίτασμα οι μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα κυμαίνονται από 8mm έως 3cm.



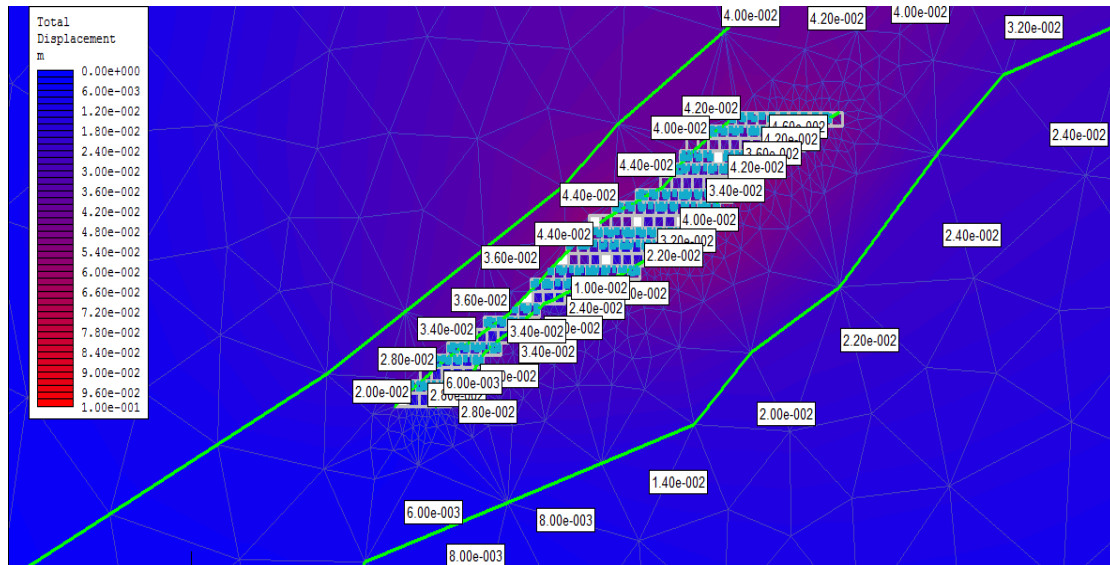
Εικόνα 45: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 20, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.



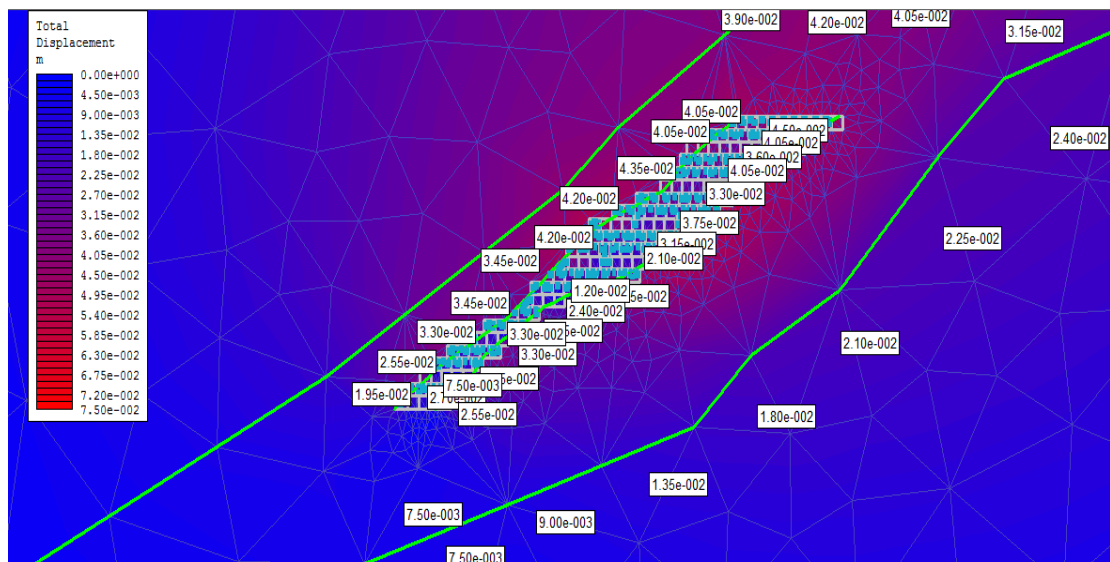
Εικόνα 46: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 22, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.



---



Εικόνα 47: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 26, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.

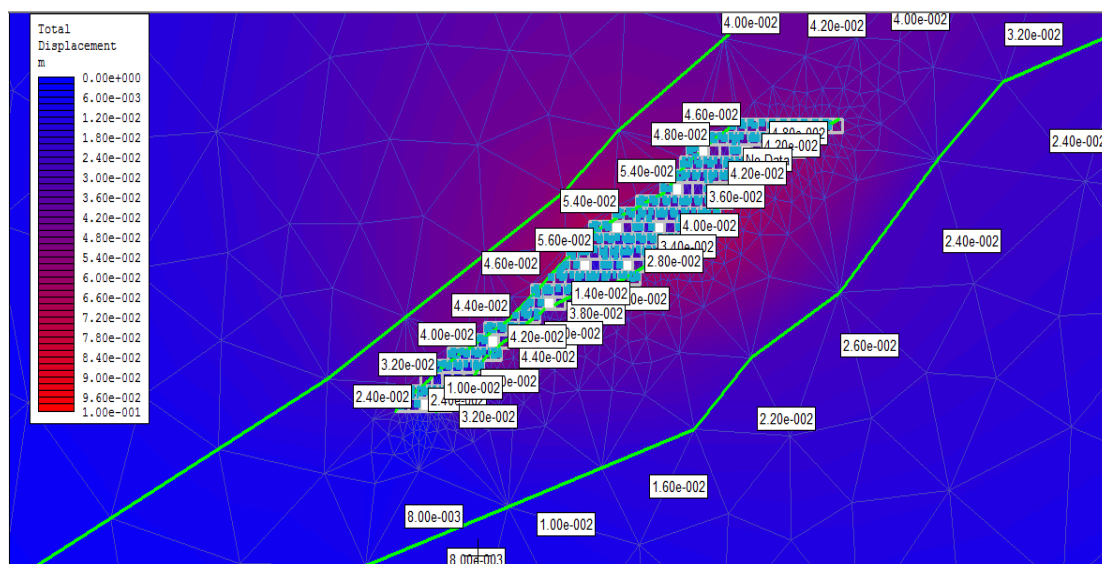


Εικόνα 48: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 28, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.

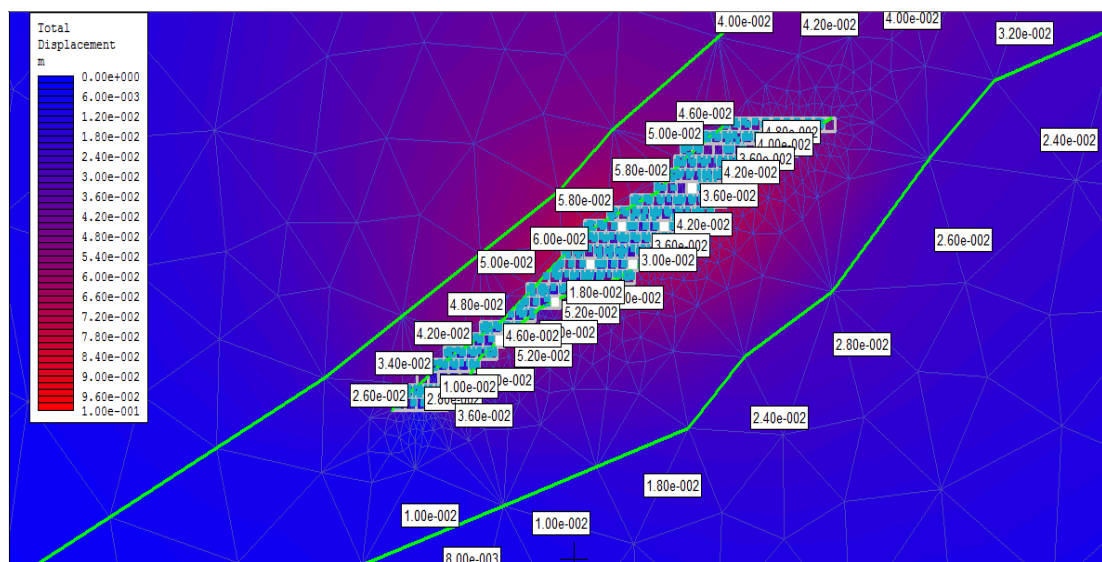
Κατά τα στάδια 26-28 οι μετακινήσεις που σημειώνονται ξεκινούν από τα 4cm έως και τα 4,9cm στο άνω τμήμα του κοιτάσματος (αμφιβολίτες, μάρμαρα).

Περιφερειακά και στο εσωτερικό του κοιτάσματος οι μετακινήσεις κυμαίνονται από 3,5mm έως και 5,2cm.

## Αποτελέσματα



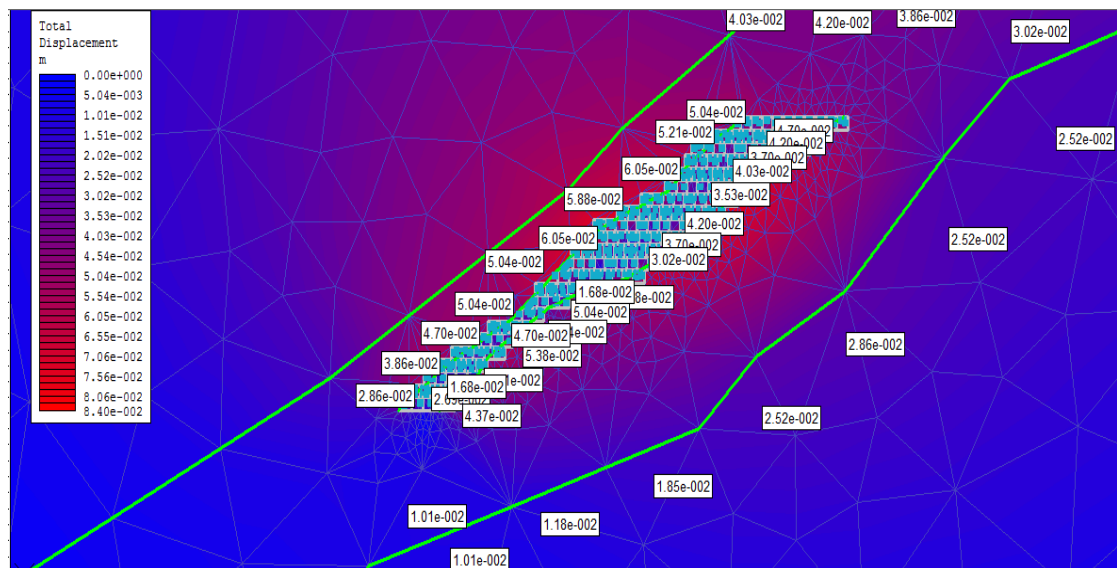
Εικόνα 49: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 32, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.



Εικόνα 50: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 35, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.

Στην συνέχεια της εκμετάλλευσης, που όπως έχουμε προαναφέρει στα παραπάνω κεφάλαια, έχει ανοδική φορά, οι εργασίες γίνονται σε υψηλότερο σημείο του κοιτάσματος.

Εδώ παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες και κυμαίνονται από 2,4cm έως 6,8cm στο κάτω μέρος του κοιτάσματος. Εντός του κοιτάσματος οι μετακινήσεις που σημειώνονται ξεκινούν από 8mm έως και 5,6cm. Οι μέγιστες μετακινήσεις σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται στα σύνορα κοιτάσματος και μαρμάρων με τιμή 7,2cm.



Εικόνα 51: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το τελικό στάδιο, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm.

Στο τελευταίο στάδιο της εκμετάλλευσης όπως παρατηρούμε, οι μετακινήσεις της βραχομάζας περιφερειακά του κοιτάσματος είναι μικρότερες συγκριτικά από το τελευταίο στάδιο της εκμετάλλευσης χωρίς την χρήση υποστήριξης.

Ο λόγος είναι φανερός και οφείλεται στις ιδιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

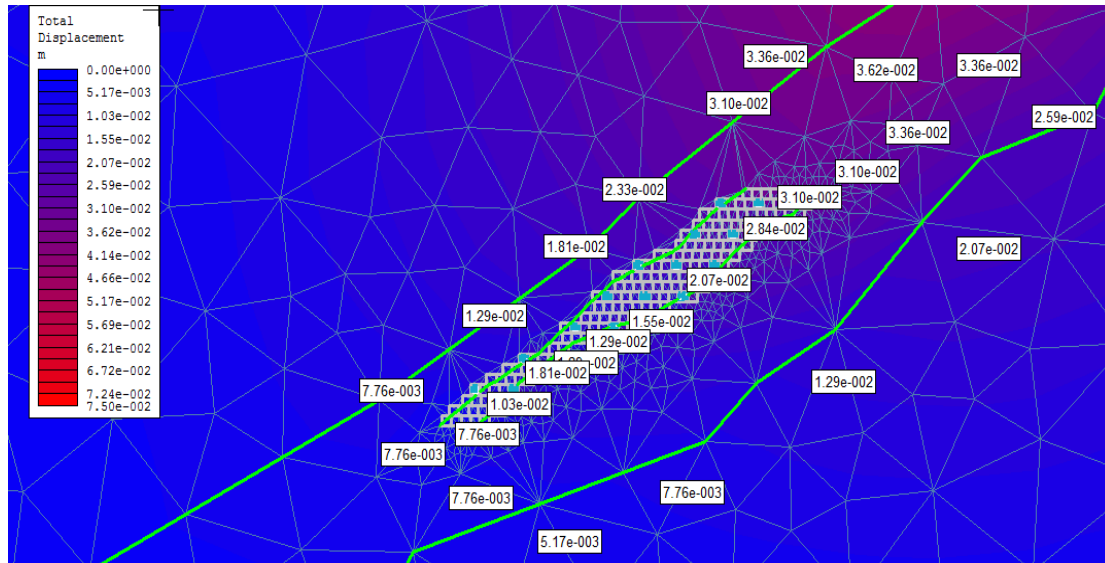
Μετά το τέλος της εκμετάλλευσης το σώμα του κοιτάσματος έχει αντικατασταθεί από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm και υλικό λιθογόμωσης. Οι μετακινήσεις στο άνω μέρος και συγκεκριμένα στο στρώμα των αμφιβολιτών κυμαίνονται 5,6cm έως 7,2cm.

Στα μάρμαρα από 1,62cm έως 3,6cm. Στο εσωτερικό του κοιτάσματος οι μετακινήσεις είναι από 4mm έως και 5,6cm όπου στα όρια με τα μάρμαρα κυμαίνονται από 6 έως 7,2cm.

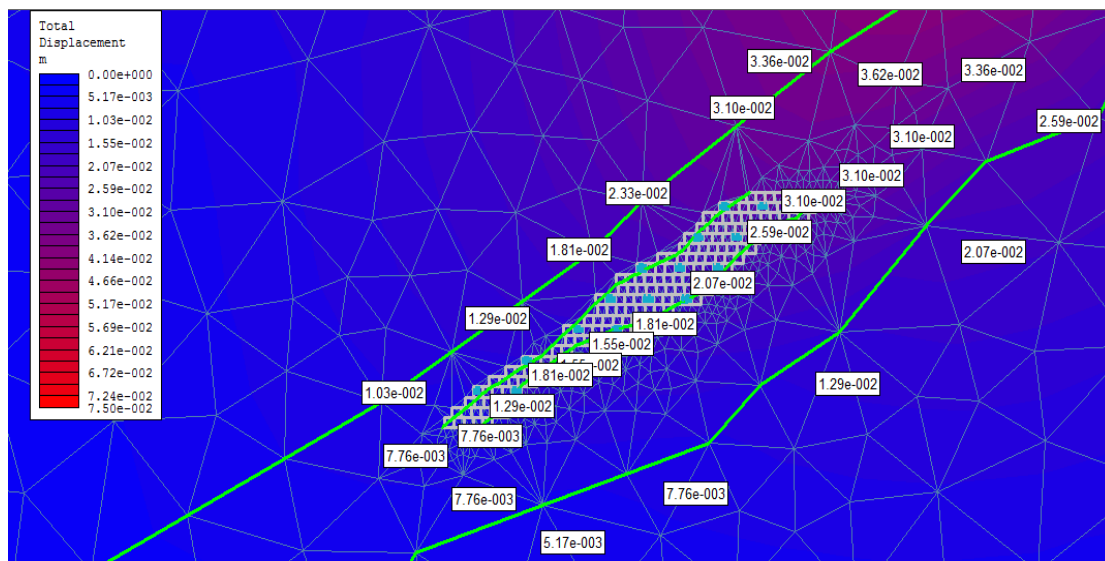
Αν εν τέλει τις συγκρίνουμε με αυτές από το μοντέλο χωρίς υποστήριξη, οι οποίες ξεκινούν από 7cm έως τα 9,80cm στο εσωτερικού του κοιτάσματος, για το μοντέλο με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οι αντίστοιχες τιμές είναι από 1,2cm έως και τα 6cm.



### 5.5 Προσομοίωση με μεταβολή στο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 52: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 3, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.



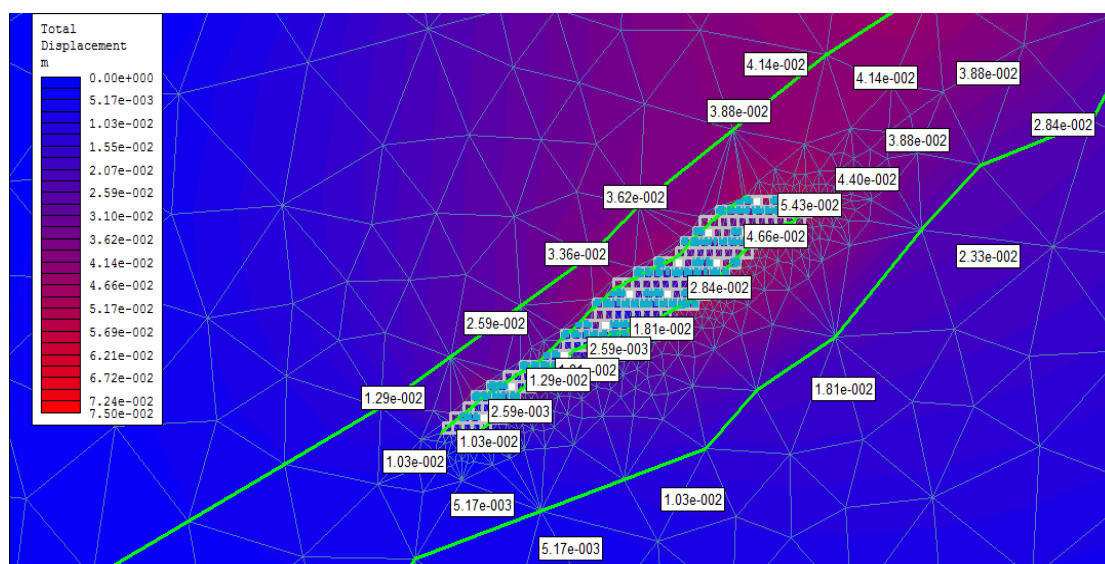
Εικόνα 53: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 4, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.

Προχωρώντας στην αντικατάσταση του πάχους του σκυροδέματος της υποστήριξης στο μοντέλο, από 10cm σε 5cm, είναι προφανές ότι τόσο οι μετακινήσεις αναμένονται να είναι μεγαλύτερες και οι αντοχές μικρότερες.

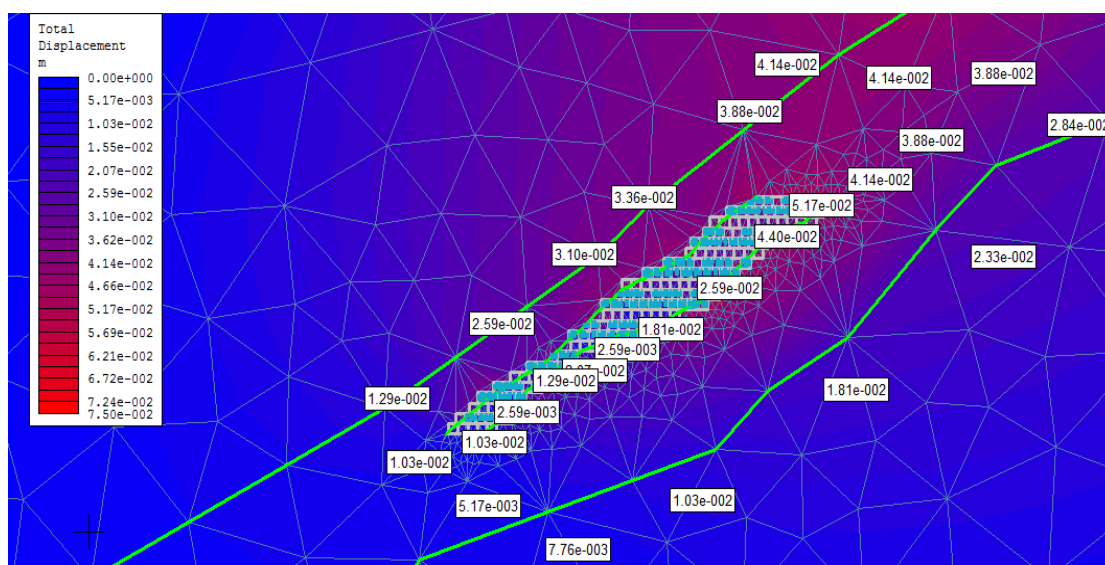
## Αποτελέσματα

Στα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις είναι μικρές περιμετρικά της εκμετάλλευσης και οι τιμές που λαμβάνονται είναι στο 3<sup>ο</sup> στάδιο, με πάχος 10cm, είναι 4,5mm και στο 4<sup>ο</sup> στάδιο οι μέγιστη τιμή είναι 5,4mm.

Αντίστοιχα για πάχος σκυροδέματος 5cm μέσα στο σώμα της εκμετάλλευσης, οι μέγιστες μετακινήσεις στο στάδιο 3 και 4 είναι 7,2mm και 9mm αντίστοιχα.



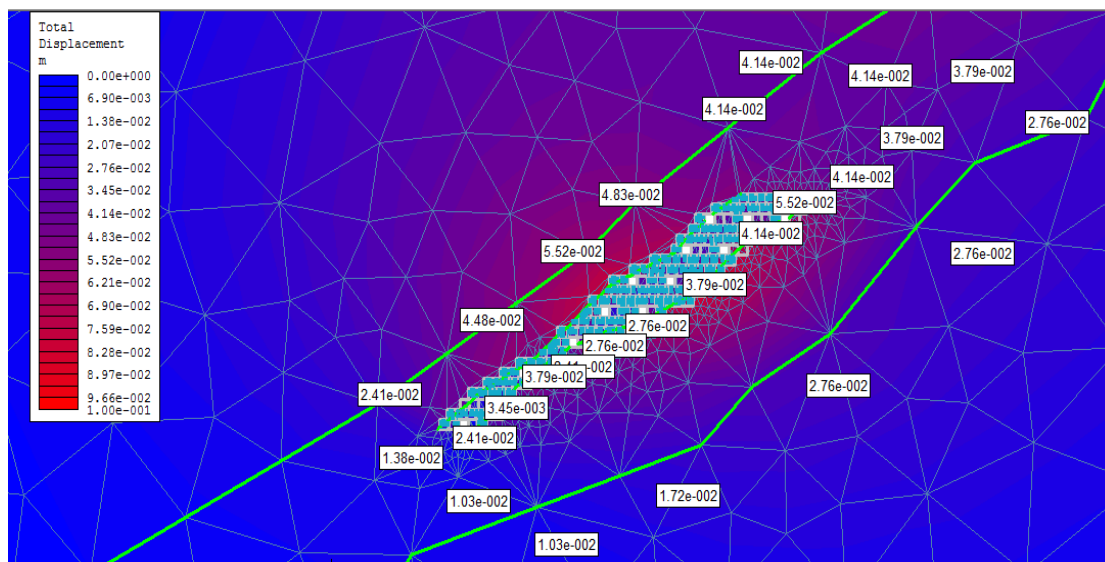
Εικόνα 54: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 20, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.



Εικόνα 55: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 22, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.

## Αποτελέσματα

Σε μετέπειτα στάδια της εκμετάλλευσης οι εργασίες λαμβάνουν χώρα σε υψηλότερα πατώματα. Κατά τα στάδια 20-22 παρατηρούνται μετακινήσεις από 1,8cm έως 4,2cm περιμετρικά της εκμετάλλευσης, στα όρια του κοιτάσματος οι τιμές κυμαίνονται από 1,2cm έως 5,04cm.



Εικόνα 56: Μετακινήσεις βραχομάζας κατά το στάδιο 32, με χρήση υποστήριξης, εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm.

Καθώς πλησιάζουμε προς την εξόφληση του κοιτάσματος στο στάδιο 32 οι μετατοπίσεις κυμαίνονται από 5,6cm έως 6,8cm περιφερειακά του κοιτάσματος και πάνω από αυτό, ενώ στο κάτω μέρος της εκμετάλλευσης οι τιμές που λαμβάνονται είναι από 1,2cm έως 4,4cm. Στο εσωτερικό του κοιτάσματος οι μετατοπίσεις που καταγράφονται είναι από 1,2cm έως 8cm.

### 6 Συμπεράσματα - προτάσεις

Τα στοιχεία τα οποία ελήφθησαν από τις προσομοιώσεις των μοντέλων είναι αρκετά και επαρκή για να μας δώσουν ικανό αριθμό δεδομένων σχετικά με τις μετακινήσεις της βραχομάζας που αναμένονται να εκδηλωθούν στο εσωτερικό του κοιτάσματος, περιμετρικά αυτού και γύρω από τα όρια του. Ανακεφαλαιώνοντας μπορούμε να αναφέρουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις:

- Το σύνολο των μετακινήσεων της βραχομάζας είναι της τάξης των εκατοστών.
- Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις, τόσο στο εσωτερικό όσο και στην περιφέρεια του κοιτάσματος, παρατηρήθηκαν στις προσομοιώσεις των ανυποστήρικτων μοντέλων, των μοντέλων δηλαδή όπου ακολούθησε η άμεση πλήρωση των στοών με υλικό λιθογόμωσης χωρίς προηγούμενη χρήση προσωρινής υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυροδέμα), όπως είναι φυσικό, σε σχέση με τα μοντέλα όπου έγινε χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σαν υποστήριξη.
- Σχετικά με τα μοντέλα όπου μελετήθηκε η μείωση της αντοχής, τα αποτελέσματα ήταν επίσης αναμενόμενα καθώς οι μετακινήσεις στο μοντέλο με την χαμηλότερη αντοχή (1MPa), ήταν σαφώς μεγαλύτερες από τις μετακινήσεις που παρουσίασε το μοντέλο με αντοχή λιθογόμωσης 4MPa.
- Κατά την ανάλυση των μοντέλων όπου μελετάμε τις μετακινήσεις διαφοροποιώντας τα πάχη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, παρατηρούμε και εδώ ότι καθώς μειώνουμε το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μισό, οι μετακινήσεις αυξάνονται σε όλη τη βραχομάζα σε σχέση με το μοντέλο με διπλάσιο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

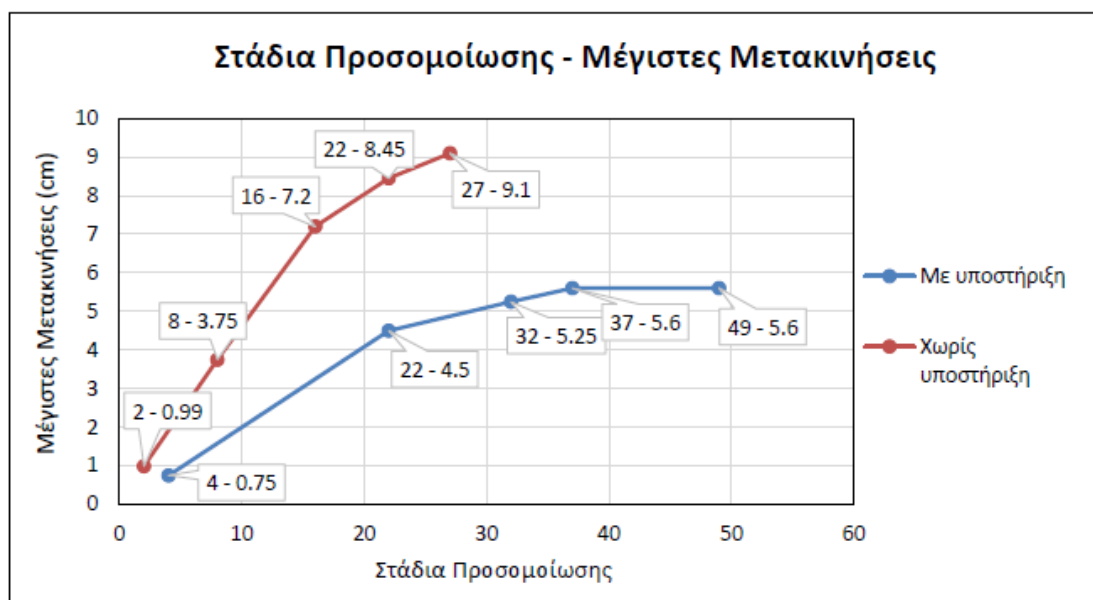
Όλα τα συμπεράσματα που αναφέραμε παραπάνω, παρουσιάζονται αναλυτικότερα και ποσοτικοποιούνται στις επόμενες υπό-παραγράφους.

## Συμπεράσματα

### 6.1 Σύγκριση μοντέλων εκμετάλλευσης με και χωρίς υποστήριξη.

Διεξάγοντας τη σύγκριση μεταξύ των μοντέλων με και χωρίς υποστήριξη φαίνεται καθαρά η επίδραση της υποστήριξης στις μετακινήσεις της βραχομάζας. Οι μετακινήσεις αυτές παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές στο μοντέλο χωρίς χρήση υποστήριξης.

Αναλυτικότερα παρακάτω ακολουθεί σχήμα όπου καταγράφονται οι μέγιστες μετακινήσεις για τα διάφορα στάδια κατά την προσομοίωση, μεταξύ των μοντέλων με και χωρίς υποστήριξη.



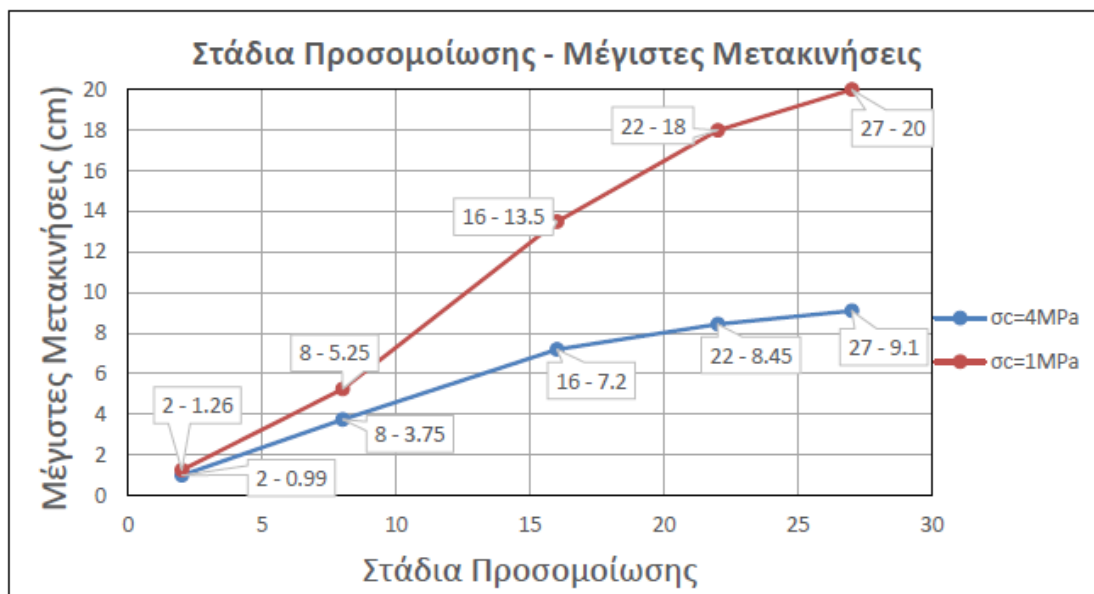
Διάγραμμα 4: Μέγιστες μετακινήσεις ανά στάδιο για μοντέλα με και χωρίς υποστήριξη.

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα οι τιμές των μετακινήσεων για το μοντέλο χωρίς υποστήριξη σε όλα τα στάδια της προσομοίωσης είναι μεγαλύτερες από εκείνες του μοντέλου με υποστήριξη. Ενδεικτικά στα τελικά στάδια των 2 αυτών μοντέλων έχουμε τιμές μετακινήσεων 5,6cm στο στάδιο 49 με χρήση σκυροδέματος και 9,1cm στο στάδιο 27 για το μοντέλο χωρίς χρήση υποστήριξης.

## Συμπεράσματα

### 6.2 Σύγκριση μοντέλων εκμετάλλευσης με διαφορετική $\sigma_c$ .

Καθώς μειώνουμε την αντοχή  $\sigma_c$ , αυτό σημαίνει και μείωση της ποσότητας του τσιμέντου για την παρασκευή της λιθογόμωσης. Οι τιμές των μετακινήσεων που καταγράφηκαν στο μοντέλο με την μειωμένη αντοχή της λιθογόμωσης είναι αρκετά υψηλές σε σχέση με τις μετακινήσεις του μοντέλου με την αρχική αντοχή των 4MPa.



Διάγραμμα 5: Μείγιστες μετακινήσεις βραχομάζας ανά στάδιο για μοντέλα χωρίς υποστήριξη με μεταβολή στην αντοχή  $\sigma_c$ .

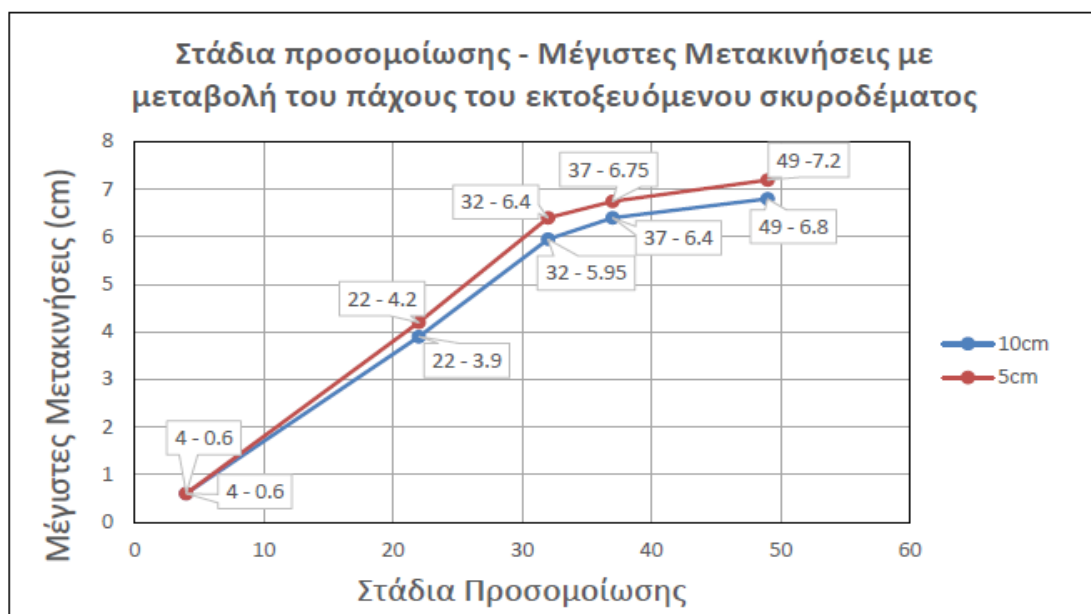
Στον παραπάνω πίνακα γίνεται η σύγκριση των μετακινήσεων των μοντέλων με τις διαφορετικές τιμές αντοχής στη λιθογόμωση.

Όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα οι διαφορές μεταξύ των δυο μοντέλων είναι εμφανής.

## Συμπεράσματα

### 6.3 Σύγκριση μοντέλων εκμετάλλευσης με διαφορετικά πάχη υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

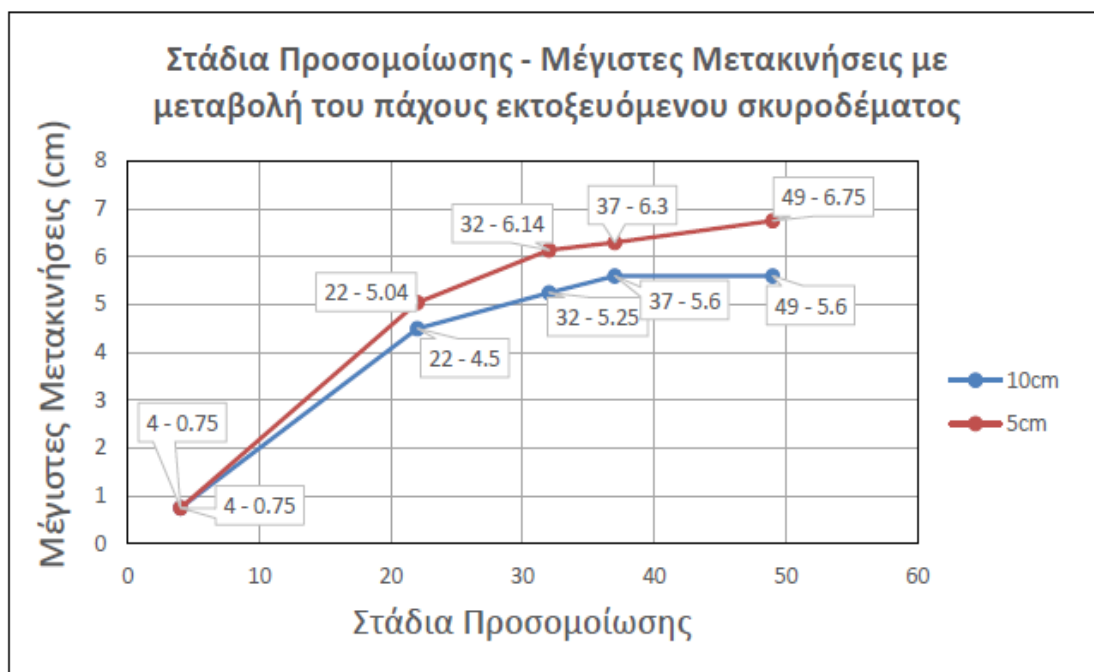
Και στα συγκεκριμένα μοντέλα όπως είναι αναμενόμενο, μειώνοντας το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνονται οι μετακινήσεις της βραχομάζας. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της βραχομάζας για τα μοντέλα με τα διαφορετικά πάχη υποστήριξης περιμετρικά της εκμετάλλευσης.



Διάγραμμα 6: Μέγιστες μετακινήσεις βραχομάζας στην περιφέρεια του κοιτάσματος, για μοντέλα με διαφορετικά πάχη υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Τέλος στο επόμενο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι μετακινήσεις της βραχομάζας μεταξύ των μοντέλων με τα διαφορετικά πάχη στην εσωτερική περιοχή του κοιτάσματος.

## Συμπεράσματα



Διάγραμμα 7: Μέγιστες μετακινήσεις βραχομάζας στο εσωτερικού του κοιτάσματος, για μοντέλα με διαφορετικά πάχη υποστήριξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Παρατηρούμε ότι οι διακυμάνσεις των διαφορών μεταξύ των δυο μοντέλων είναι παρόμοιες με εκείνες στην περιφέρεια της βραχομάζας όμως λίγο μεγαλύτερου μεγέθους.

Τα ανωτέρω συμπεράσματα προέκυψαν μετά από έναν αριθμό απλοποιητικών παραδοχών και θα πρέπει να επαληθευθούν στην πράξη. Γι' αυτό προτείνονται τα εξής:

- Να γίνει αποτύπωση των ασυνεχειών εντός των παραγωγικών στοών αν υπάρχουν ήδη ή διαφορετικά κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης για να επαληθευθούν οι τιμές του δείκτη GSI και η ετερογένεια της κατανομής του εντός κάθε γεωλογικού στρώματος.
- Να εγκατασταθούν όργανα μέτρησης μετακινήσεων πριν την εκκίνηση της εκμετάλλευσης σε στρατηγικά σημεία για την βαθμονόμηση του μοντέλου.
- Να εκτελεσθούν εργαστηριακά πειράματα μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια του υλικού λιθογόμωσης με διαφορετικές περιεκτικότητες σε τσιμέντο για την επαλήθευση των τιμών των παραμέτρων αντοχής της λιθογόμωσης και του χρόνου ωρίμανσης του υλικού λιθογόμωσης που χρειάζεται για την απόκτηση των παραμέτρων αυτών. Ο χρόνος αυτός της



## Συμπεράσματα

---

τάξης των μερικών ωρών θα πρέπει να μοντελοποιηθεί κατάλληλα στο μοντέλο που παρουσιάστηκε.

- Να γίνουν στο μέλλον προσομοιώσεις στις τρεις διαστάσεις και να βρεθεί η διαφορά με τις παρούσες προσομοιώσεις που έγιναν με την παραδοχή της επίπεδης παραμόρφωσης.

### 7 Βιβλιογραφία

1. Εξαδάκτυλος Γ. (2000), «Συστήματα υπογείων έργων», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Ε. Κ. Στειακάκης (2003). Συμπεριφορά ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους. Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητας Εδαφών στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. Σοφιανός, Α. 2014. Υποστήριξη Υπόγειων Έργων. Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
4. Τερεζόπουλος, Ν. 2003. Μέθοδος Υπόγειων Εκμεταλλεύσεων. Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
5. Agoshkov, M., Borisov, S. & Boyarsky, V. 1988. Mining of Ores and Non-Metallic Minerals. Moscow: Mir Publishers.
6. Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J.Geotech. Engng Div.*, ASCE **106**(GT9), 1013-1035.
7. Hoek, E. and Brown, E.T. 1988. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. In Rock engineering for underground excavations, proc. *15th Canadian rock mech.symp.*, (ed. J.C. Curran), 31-38. Toronto: Dept. Civ. Engineering, University of Toronto.
8. Hoek, E. and Brown, E.T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min.g Sci. & Geomech. Abstr.* **34**(8), 1165-1186.
9. B. H. G. Brady and E. T. Brown. ROCK MECHANICS For underground mining. Second Edition.
10. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΙΑ Μελετητική Α.Ε. (2011). Τεχνική Μελέτη Εκμετάλλευσης Μεταλλείου Ολυμπιάδας, Τεχνική Έκθεση.