



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Γεωμηχανική Συμπεριφορά της Βραχόμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις με την Μέθοδο Εναλλασσόμενων Κοπών και Γομώσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Β. ΖΩΜΑ

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών
Τομέας Μεταλλευτικής Τεχνολογίας

Γεωμηχανική Συμπεριφορά της Βραχόμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις με την Μέθοδο Εναλλασσόμενων Κοπών και Γομώσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Β. ΖΩΜΑ

Επιβλέπων: Παύλος Νομικός

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 21/10/2015.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Π. Νομικός

Α. Σοφιανός

Α. Μπενάρδος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου και υπεύθυνο της εργασίας κ. Παύλο Νομικό που πίστεψε σε μένα και με τις συμβουλές, τις πληροφορίες και την καθοδήγησή του κατέστησε δυνατή την συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας. Υπήρξε καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας της συγγραφής διαθέσιμος να μου προσφέρει λύσεις και βοήθεια για οποιαδήποτε απορία και πρόβλημα που δημιουργήθηκαν στα στάδια της εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών και στοιχείων, που συνέβαλαν στη συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Χατζηευστρατίου, μηχανικό της Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. για την βοήθεια που μου προσέφερε, παρά την μεγάλη απόσταση που μας χώριζε. Με τη γνώση, την εμπειρία και την καλή του διάθεση συνέβαλε στη βαθύτερη κατανόηση λειτουργικών θεμάτων που αφορούσαν άμεσα το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ πηγαίνει στους φίλους μου, τους παλιούς, τους πολύ παλιούς και τους νέους που ήταν πάντα δίπλα μου σε αυτή την διαδρομή των 5 χρόνων. Για τους παλιούς μου φίλους και φίλες πρέπει να πω ένα ευχαριστώ που τόσα χρόνια πίστευαν σε μένα χωρίς την παραμικρή αμφιβολία και βρίσκονταν πάντα δίπλα μου δίνοντας στην ζωή μου ο καθένας κάτι άξιο και διαφορετικό. Για τους αγαπητούς φίλους και φίλες των φοιτητικών μου χρόνων συμφοιτητές και μελλοντικούς συναδέλφους μου, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ γιατί αποτέλεσαν συνοδοιπόροι σε αυτό το ταξίδι και έκαναν αυτά τα χρόνια να μείνουν για πάντα, βαθιά χαραγμένα στο μυαλό και την καρδιά μου.

Βέβαια το πιο μεγάλο και θερμό ευχαριστώ, το οφείλω στην οικογένεια μου, στους γονείς μου Νοτίνα και Βασίλη, τη γιαγιά μου Έφη, τον παππού μου Γιάννη, που πάντα πίστευαν ακράδαντα στις ικανότητές μου, πιέζοντάς με να θέτω στόχους και να τους πετυχαίνω. Είναι εκείνοι που με την αδιάκοπη αγάπη και υποστήριξή τους σε όλη την διάρκεια της ζωής μου με ανέθρεψαν σε ένα περιβάλλον με ηθικές αξίες και αρχές πρόσφεροντάς μου πάντα ότι καλύτερο, κάνωντάς με τον άνθρωπο που είμαι σήμερα.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τη μελέτη της συμπεριφοράς της βραχώμαζας που περιβάλλει ένα κοιτάσμα του οποίου η εκμετάλλευση γίνεται με εναλλασσόμενες κοπές και λιθογομώσεις.

Η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων (cut and fill stoping) αποτελεί κατά κοινή παραδοχή, μία από τις πλέον ασφαλείς αλλά και δαπανηρές μεθόδους εκμετάλλευσης, που εφαρμόζεται σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις, όπου οι γεωλογικές συνθήκες ή άλλοι παράγοντες και περιορισμοί όπως αυξημένη ευαισθησία λόγω κατοικημένης περιοχής, εκμετάλλευση υπό υφιστάμενες λίμνες, θάλασσες κλπ. επιβάλλουν την εφαρμογή της, για να αποφευχθούν διαταράξεις των υπερκειμένων του κοιτάσματος πετρωμάτων και επιφανειακές καθιζήσεις. Σύμφωνα με την εν λόγω μέθοδο, τα κενά που δημιουργούνται από την εξόρυξη του μεταλλεύματος πληρούνται υδραυλικά με υλικό που αποτελεί μίγμα από τέλμα εμπλουτισμού, τσιμέντο και νερό.

Στο αρχικό μέρος της εργασίας παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία που συνδέουν την μηχανική των πετρωμάτων με την συμπεριφορά της βραχώμαζας σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Έπειτα πραγματοποιείται μία εκτενής περιγραφή των μεθόδων υπόγειας εκμετάλλευσης με γομούμενα μέτωπα όπου παραθέτονται λειτουργικά χαρακτηριστικά, πεδία εφαρμογής, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ακολουθεί το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας και περιγραφή μεθόδων υποστήριξης με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στη συνέχεια γίνεται λόγος για το μεταλλείο των Μαύρων Πετρών που εκμεταλλεύεται η εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. στην Βορειοαντολική Χαλκιδική, με βάση την μέθοδο εκμετάλλευσης των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη φορά. Στο εν λόγω μεταλλείο στηρίζονται τα μοντέλα προσομοίωσης για την μελέτη της συμπεριφοράς της βραχώμαζας. Δίδονται τα κοιτασματολογικά στοιχεία της περιοχής ανάπτυξης του μεταλλείου και περιγράφεται ο σχεδιασμός των μοντέλων προσομοίωσης.

Στο πρακτικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται ο τρόπος που επιδρά με τα περιβάλλοντα πετρώματα το υλικό λιθογόμωσης που αντικαθιστά το σώμα του μεταλλεύματος καθώς και παρουσιάζεται η τάξη μεγέθους των συνολικών μετακινήσεων που αναπτύσσονται στους περιβάλλοντες της εκμετάλλευσης

γεωλογικούς σχηματισμούς. Σχεδιάστηκαν 12 μοντέλα και πραγματοποιήθηκαν ισάριθμες αριθμητικές αναλύσεις για την καταγραφή των μετακινήσεων στη βραχόμαζα, οι 8 από τις οποίες ήταν παραμετρικές.

Τέλος καταγράφονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των τασικών αναλύσεων και με την χρήση πινάκων και διαγραμμάτων πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων συμβάλλοντας στην καλύτερη μελέτη και κατανόηση της γεωμηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας που περιβάλλει το κοίτασμα μεικτών θειούχων των Μαύρων Πετρών.

Abstract

In this thesis a series of simulations have been conducted for recording and studying the geomechanical behavior of the rock mass surrounding an ore whose exploitation is being done by the Cut and Fill stoping method.

The Cut and Fill stoping is acknowledged to be one of the safest and costly operating methods applied in underground mining, where geological conditions or other factors and constraints such as increased sensitivity due to residential area, mining activities under existing lakes, seas, etc. require its application, to avoid disruptions of the supernatants of the orebody rock and surface subsidence. According to this method, the voids created by the extraction of the orebody are filled hydraulically by a backfill material, which is a mixture of mill tailings, cementing agents and water.

In the initial part the theory that links the rock mechanics principals to the behavior of rock mass in underground mining is presented. In addition, there is an extensive description of the underground exploitation by filling methods in which, the operational characteristics and features, areas of application, advantages and disadvantages are listed. The subjects that follow are the theoretical background and the description of supporting systems using shotcrete.

Then a lengthy reference is made about the “Mavres Petres” mine, operated by the mining company Hellas Gold SA, located in Northeast Halkidiki with the use of the overhand cut and fill stoping method. The simulation models for the study of the behavior of the rock mass are based on this specific mine. Furthermore, in this section the geological parameters and features of the mine development area are given, along with the description of the designing stages of the simulation models.

In the practical part of the thesis it is studied how the backfill material that replaces the orebody interacts with the surrounding rock and it is also presented the magnitude of the global movements that are generated in the surrounding geological formations. A number of 12 models were designed, 8 of which were parametric, and an equal number of numerical analyses were conducted for recording the movements of the rock mass.

Finally, the results of the stress analysis are presented and interpreted, and also comparisons between the simulation models are made with the use of tables and charts,

contributing to a better study and understanding of the geomechanical behavior of the rock mass surrounding the ore of mixed sulphurous, of the “Mavres Petres” mine.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|------|
| Ευχαριστίες..... | iv |
| Περίληψη..... | vi |
| Abstract | viii |
| Πίνακας Περιεχομένων | x |
| Περιεχόμενα Σχημάτων..... | xv |
| Περιεχόμενα Εικόνων..... | xvii |
| Περιεχόμενα Πινάκων..... | xxii |
| Περιεχόμενα Διαγραμμάτων..... | xxiv |
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Γενικά..... | 1 |
| 1.2 Τοποθέτηση Προβλήματος | 4 |
| 1.3 Απόκριση της Βραχόμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις | 10 |
| 1.4 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων | 14 |
| 1.5 Αντικείμενο της Παρούσας Εργασίας | 16 |
| 2 Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης με Γομούμενα Μέτωπα..... | 19 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 19 |
| 2.2 Μέθοδος των Ξύλινων Πρισματικών Πλαισίων | 20 |
| 2.2.1 Γενικά..... | 20 |
| 2.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ξύλινης Υποστήριξης..... | 20 |
| 2.3 Μέθοδος των Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων | 20 |
| 2.3.1 Χαρακτηριστικά Συστήματος και Σφαίρα Εφαρμογής..... | 20 |
| 2.3.2 Πεδίο Εφαρμογής..... | 24 |
| 2.3.3 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Κατερχόμενη Φορά | 25 |
| 2.3.4 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Ανερχόμενη Φορά | 28 |
| 2.3.5 Διαφορές Μεθόδων | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.6 | Σχεδιασμός Εκμετάλλευσης | 30 |
| 2.3.7 | Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου | 31 |
| 2.4 | Μέθοδοι Λιθογόμωσης | 32 |
| 2.4.1 | Σχεδιασμός Λιθογόμωσης Μεταλλείου | 32 |
| 2.4.2 | Λιθογόμωση με Στείρα | 37 |
| 2.4.3 | Πηγές Υλικών Λιθογόμωσης..... | 37 |
| 2.4.4 | Πνευματική Γόμωση | 39 |
| 2.4.5 | Υδραυλική Γόμωση..... | 40 |
| 3 | Θεωρητικό Υπόβαθρο | 45 |
| 3.1 | Εισαγωγή..... | 45 |
| 3.2 | Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων | 47 |
| 3.3 | Υποστήριξη Υπόγειων Έργων..... | 53 |
| 3.3.1 | Έλεγχος των Στρωμάτων..... | 53 |
| 3.4 | Μέθοδοι Υποστήριξης..... | 54 |
| 3.4.1 | Άμεση Επένδυση από Σκυρόδεμα..... | 54 |
| 3.4.2 | Δράσεις του Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος..... | 55 |
| 4 | Μεταλλείο Μαύρων Πετρών..... | 59 |
| 4.1 | Ελληνικός Χρυσός Α. Ε..... | 59 |
| 4.2 | Μεταλλείο των Μαύρων Πετρών | 59 |
| 4.3 | Μετάλλευμα..... | 61 |
| 4.4 | Υλικό Λιθογόμωσης..... | 62 |
| 4.5 | Κοιτασματολογικά Στοιχεία – Γεωλογικοί Σχηματισμοί της Περιοχής | 64 |
| 4.5.1 | Προσδιορισμός Γεωτεχνικών Παραμέτρων Σχεδιασμού | 65 |
| 4.5.2 | Κριτήριο Αστοχίας κατά Hoek και Brown..... | 68 |
| 5 | Προετοιμασία Αριθμητικών Μοντέλων | 71 |
| 5.1 | Υπολογιστικό Πρόγραμμα Phase της Rocscience (RS ²)..... | 71 |
| 5.2 | Προσομοίωση στο Phase - Βασικά Μοντέλα | 73 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.2.1 | Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα του Μεταλλείου, χωρίς στοιχεία υποστήριξης | 76 |
| 5.2.2 | Αναλυτικός Σχεδιασμός Μοντέλου Προσομοίωσης | 77 |
| 5.2.3 | Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα Ομάδας Διαδοχικών Ορόφων Εκμετάλλευσης, χωρίς στοιχεία υποστήριξης..... | 86 |
| 5.2.4 | Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα του Μεταλλείου, με χρήση Στοιχείων Υποστήριξης..... | 88 |
| 5.2.5 | Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα Ομάδας Διαδοχικών Ορόφων Εκμετάλλευσης, με χρήση Στοιχείων Υποστήριξης | 91 |
| 5.3 | Παραμετρικά Μοντέλα..... | 93 |
| 5.3.1 | Εισαγωγή | 93 |
| 5.3.2 | Η αντοχή σ_c | 94 |
| 5.3.3 | Μέτρο Ελαστικότητας E | 94 |
| 5.3.4 | Δείκτης GSI..... | 95 |
| 5.3.5 | Συντελεστής k | 97 |
| 5.3.6 | Στρώμα Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος πάχους 5cm | 99 |
| 5.3.7 | Κενό οροφής 20cm | 99 |
| 6 | Αποτελέσματα Αριθμητικών Προσομοιώσεων | 103 |
| 6.1 | Εισαγωγή | 103 |
| 6.2 | Τρόπος Ανάλυσης Αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Phase | 103 |
| 6.3 | Μοντέλο Προσομοίωσης Ομοιώματος Συνολικής Εκμετάλλευσης χωρίς στοιχεία υποστήριξης. | 104 |
| 6.4 | Μεταβολές Παραμέτρων στο Αρχικό Μοντέλο | 114 |
| 6.4.1 | Μοντέλο Προσομοίωσης με μεταβολή στην αντοχή σ_c | 114 |
| 6.4.2 | Μοντέλα Προσομοίωσης με μεταβολή στο Μέτρο Ελαστικότητας E | 119 |
| 6.4.3 | Μοντέλα Προσομοίωσης με μεταβολή στο GSI..... | 128 |
| 6.4.4 | Μοντέλο Προσομοίωσης με μεταβολή στον συντελεστή k | 137 |
| 6.5 | Μοντέλο Προσομοίωσης Ομάδας Διαδοχικών Ορόφων Εκμετάλλευσης, χωρίς στοιχεία υποστήριξης..... | 141 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.6 | Μοντέλο Προσομοίωσης Ομοιώματος Συνολικής Εκμετάλλευσης με χρήση μέσων υποστήριξης | 147 |
| 6.7 | Μοντέλο Προσομοίωσης Ομάδας Διαδοχικών Ορόφων Εκμετάλλευσης με στοιχεία υποστήριξης | 154 |
| 6.8 | Μοντέλο Προσομοίωσης με μεταβολή στο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος | 158 |
| 6.9 | Μοντέλο Προσομοίωσης με κενό στην οροφή των τρίτων υψομετρικά ορόφων | 163 |
| 7 | Συμπεράσματα – Σχόλια..... | 167 |
| 7.1 | Ομοιώματα Συνολικής Εκμετάλλευσης με και χωρίς Υποστήριξη | 168 |
| 7.2 | Ομοιώματα Εκμετάλλευσης Ομάδας Ορόφων με και χωρίς υποστήριξη | 169 |
| 7.3 | Παραμετρικά Μοντέλα..... | 171 |
| 8 | Βιβλιογραφία..... | 179 |
| 9 | Παράρτημα..... | 181 |
| 9.1 | Ιδιότητες των Σχηματισμών | 182 |
| 9.1.1 | Μετάλλευμα | 182 |
| 9.1.2 | Στρώμα Μαρμάρου | 182 |
| 9.1.3 | Βιοτιτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος | 183 |
| 9.1.4 | Υλικό Λιθογόμωσης | 183 |
| 9.1.5 | Τεκτονικός Αμφιβολίτης..... | 184 |
| 9.1.6 | Παλαιότερες Εκμεταλλεύσεις | 184 |
| 9.2 | Συνολική Εκμετάλλευση χωρίς μέτρα υποστήριξης | 185 |
| 9.2.1 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (27°) | 185 |
| 9.2.2 | Συνολικές μετακινήσεις στο κέντρο της εκμετάλλευσης (27°) | 185 |
| 9.3 | Συνολική εκμετάλλευση με μέτρα υποστήριξης..... | 186 |
| 9.3.1 | Στοιχεία αστοχίας στο αρχικό στάδιο (2°)..... | 186 |
| 9.3.2 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο στάδιο 2ο | 186 |
| 9.3.3 | Συνολικές μετακινήσεις στο στάδιο 32° | 187 |
| 9.3.4 | Συνολικές μετακινήσεις στο στάδιο 35° | 187 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 9.3.5 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (49°) | 188 |
| 9.4 | Ομάδα Ορόφων χωρίς υποστήριξη..... | 188 |
| 9.4.1 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (25°) | 188 |
| 9.5 | Ομάδα Ορόφων με υποστήριξη..... | 189 |
| 9.5.1 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο..... | 189 |
| 9.6 | Συντελεστής k..... | 189 |
| 9.6.1 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (27°) | 189 |
| 9.7 | Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm..... | 190 |
| 9.7.1 | Συνολικές μετακινήσεις στο στάδιο 42°..... | 190 |
| 9.7.2 | Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο..... | 190 |
| 9.8 | Κενό Οροφής 20cm | 191 |
| 9.8.1 | Μετακινήσεις στο στάδιο 3..... | 191 |
| 9.8.2 | Μετακινήσεις στο στάδιο 14..... | 191 |
| 9.8.3 | Μετακινήσεις στο στάδιο 22..... | 192 |
| 9.9 | GSI = 70..... | 192 |
| 9.9.1 | Μετακινήσεις στο στάδιο 22..... | 192 |
| 9.10 | GSI = 50..... | 193 |
| 9.10.1 | Μετακινήσεις στο στάδιο 22..... | 193 |

Περιεχόμενα Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1. (a) Συνθήκες πριν την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος. (b) Μηχανικές συνέπειες μεταλλευτικής δραστηριότητας στο κοιτάσμα. | 3 |
| Σχήμα 2. Τα κυριότερα είδη εκσκαφών που περιέχονται στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις από διάφορες μεθόδους εκμετάλλευσης. | 5 |
| Σχήμα 3. Κυριότερα χαρακτηριστικά στοιχεία μιας κατακρήμνισης (after Borquez, 1981). 9 | |
| Σχήμα 4. Στοιχεία υποστηριζόμενης μεθόδου εκμετάλλευσης (After Harmin, 1982). | 10 |
| Σχήμα 5. Στοιχεία μεθόδου εκμετάλλευσης με κατακρήμνιση (after Dravo Corporation, 1974)..... | 12 |
| Σχήμα 6. Τυπική διαμόρφωση της εκμετάλλευσης με εναλλασσόμενες κοπές και λιθογομώσεις..... | 24 |
| Σχήμα 7. Μέθοδοι εκμετάλλευσης εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη και κατερχόμενη φορά. | 30 |
| Σχήμα 8. Επιφανειακές εγκαταστάσεις προετοιμασίας υδραυλικής γόμωσης. | 41 |
| Σχήμα 9. Τρόποι υποστήριξης λιθογόμωσης μεταλλείου: (a) κινηματικός περιορισμός στην επιφάνεια των όγκων σε εκτονωμένο πέτρωμα, (b) υποστηρικτικές δυνάμεις που ενεργοποιούνται τοπικά σε ρωγματωμένα πετρώματα, (c) σφαιρική υποστήριξη λόγω συμπίεσης του υλικού πλήρωσης από τα τοιχώματα. | 46 |
| Σχήμα 10. Σχηματική όψη της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων που απεικονίζει την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης μιας εκσκαφής. | 48 |
| Σχήμα 11. Τάσεις στη στέψη και στα τοιχώματα που αναπτύσσονται γύρω από το μέτωπο εκμετάλλευσης με την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων σε διάφορες γεωμετρίες και συνθήκες τασικών πεδίων. | 49 |
| Σχήμα 12. Στρατηγικές εξόρυξης για να ανταπεξέρθουν σε συνθήκες έντονης υποβάθμισης στην στέψη μετώπου στην μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων: (a) εγκατάλειψη του μετώπου, και εκμετάλλευση κατά κατερχόμενη φορά από υψηλότερο επίπεδο, (b) ανάπτυξη νέου μετώπου με ανερχόμενη φορά σε υψηλότερο επίπεδο, αφήνοντας στύλο πατώματος, (c) η καθήλωση της στέψης του μετώπου, (d) διάγραμμα ελεύθερου σώματος για ανάθεση υποστηρικτικού σχεδίου..... | 52 |
| Σχήμα 13. Αριθμός σταδίων εκσκαφής. | 78 |
| Σχήμα 14. Γενικά στοιχεία του προγράμματος. | 79 |
| Σχήμα 15. Επιλεγμένο πλέγμα. | 80 |
| Σχήμα 16. Τασικό πεδίο εκσκαφής..... | 81 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 17. Παράθυρο προσδιορισμού ιδιοτήτων των σχηματισμών που συναντώνται στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών. | 82 |
| Σχήμα 18. Ανάθεση των σχηματισμών και διάνοιξη των στοών εκμετάλλευσης. | 83 |
| Σχήμα 19. Παράθυρο ιδιοτήτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος (liner)..... | 88 |
| Σχήμα 20. Τοποθέτηση υποστηρικτικών μέτρων (liner) στις εξορυσσόμενες στοές. | 89 |
| Σχήμα 21. Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI (Πηγή: Καββαδάς 2000)..... | 96 |
| Σχήμα 22. Παράθυρο ιδιοτήτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος..... | 99 |
| Σχήμα 23. Ο συσχετισμός των τριών υποπρογραμμάτων που αποτελούν το πρόγραμμα Phase2 | 104 |

Περιεχόμενα Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1. Διατρητικό μηχάνημα Jumbo κινείται παράλληλα σε λιθογομωμένη στοά (στα αριστερά), η οποία λειτουργεί ως οδηγός της νέας στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών. | 35 |
| Εικόνα 2. Λιθογομωμένη στοά με χαρακτηριστικό χρώμα του υλικού λιθογόμωσης στο μεταλλείο Μαύρων Πετρών. | 36 |
| Εικόνα 3. Στοά πληρωμένη υδραυλικά, με το υλικό λιθογόμωσης όπου φαίνονται δύο αντλίες μεταφοράς του υλικού. | 43 |
| Εικόνα 4. Στοά υποστηριζόμενη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete). | 56 |
| Εικόνα 5. Στοά υποστηριζόμενη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών. | 57 |
| Εικόνα 6. Περιοχή όπου δραστηροποιείται η εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε στη ΒΑ Χαλκιδική. | 59 |
| Εικόνα 7. Μεταλλείο Μαύρων Πετρών, προσπελαστική στοά, κύκλωμα αερισμού. | 60 |
| Εικόνα 8. Διατρητικό μηχάνημα και φορτωτής κινούνται στο μέτωπο για εργασίες δίπλα σε λιθογομωμένη στοά στο μεταλλείο Μαύρων Πετρών. | 63 |
| Εικόνα 9. Υλικό λιθογόμωσης σε πληρωμένη στοά. Χαρακτηριστικό χρώμα και μορφή του σώματος της λιθογόμωσης. | 64 |
| Εικόνα 10. Τα τέσσερα βασικά μοντέλα, στα τελικά στάδια εκμετάλλευσης. Στην πάνω σειρά: εκμετάλλευση χωρίς και με υποστήριξη. Στη κάτω σειρά: ομάδα διαδοχικών ορόφων χωρίς και με υποστήριξη. | 73 |
| Εικόνα 11. Ανώτερο υψομετρικά τμήμα του κοιτάσματος. Παλιότερες εκμεταλλεύσεις. | 75 |
| Εικόνα 12. Μορφή κοιτάσματος πριν την εκμετάλλευση και οι διάφοροι σχηματισμοί που το περιβάλλουν και το φορτίο από τον οικισμό της Στρατονίκης. | 77 |
| Εικόνα 13. Εκσκαφή στοών εκμετάλλευσης στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης. | 83 |
| Εικόνα 14. Πλήρωση των κενών στοών με το υλικό λιθογόμωσης (γαλάζιο χρώμα). Στάδιο 3 ^ο της προσομοίωσης. | 84 |
| Εικόνα 15. Εκσκαφή των αμέσως διπλανών στοών των εκάστοτε ορόφων ώστε να συνεχιστεί η εκμετάλλευση. | 84 |
| Εικόνα 16. Τελικό στάδιο εκμετάλλευσης και πλήρωση των κενών με υλικό λιθογόμωσης, στάδιο 27 προσομοίωσης. | 85 |
| Εικόνα 17. Μεταλλείο των Μαύρων Πετρών πριν τις διαδικασίες εκμετάλλευσής στο στάδιο 1. | 85 |
| Εικόνα 18. Κλίμακα ομάδας στοών με εκμετάλλευση κοπής και λιθογόμωσης με ανερχόμενη φορά. Δάπεδο και οροφή πλήρως λιθογομωμένα. Στάδιο 1 ^ο . | 86 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 19. Προσομοίωση σε ομάδα στοών του μεταλλείου. Στάδιο 12°..... | 87 |
| Εικόνα 20. Στοές υπό εκμετάλλευση σε ανώτερο υψομετρικά επίπεδο, λιθογόμωση ως δάπεδο και ανώτερη περιοχή πλήρως εξοφλημένη και λιθογομωμένη. Στάδιο 22°..... | 87 |
| Εικόνα 21. Στάδιο 1° της εκμετάλλευσης με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα προστεθεί στα επόμενα βήματα. | 89 |
| Εικόνα 22. Στάδο 11, ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης των αρχικών ορόφων με εκσκαφή, υποστήριξη και λιθογόμωση. | 90 |
| Εικόνα 23. Στάδιο 30 της προσομοίωσης. Λιθογομωμένες στοές και άλλες υποστηριζόμενες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έτοιμες για λιθογόμωση. | 90 |
| Εικόνα 24. Ολοκλήρωση εκμετάλλευσης με υποστήριξη και λιθογόμωση. Στάδιο 49°. | 91 |
| Εικόνα 25. Στάδιο 24° της προσομοίωσης. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με λιθογόμωση σε πληρωμένες στοές και στοές υποστηριζόμενες έτοιμες για λιθογόμωση. | 92 |
| Εικόνα 26. Ομάδα διαδοχικών ορόφων πριν την εκμετάλλευση στο αρχικό στάδιο. | 92 |
| Εικόνα 27. Ρήγμα strike – slip, όπως το ρήγμα του Στρατωνίου..... | 97 |
| Εικόνα 28. Παρουσία ρηγμάτων στον Ελλαδικό χώρο (WSM, 2008). | 98 |
| Εικόνα 29. Κενά διαστήματα ύψους 20cm από τα οποία κάποια παραμένουν κενά και κάποια λιθογομώνονται για να αποτελέσουν νέο πάτωμα εργασιών. | 100 |
| Εικόνα 30. Στάδιο 14 του παραμετρικού μοντέλου με κενό 20cm στην οροφή των στοών. | 101 |
| Εικόνα 31. Κενό 20cm μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης σε τμήματα του κοιτάσματος που συναντούν λιθογομωμένα πατώματα..... | 101 |
| Εικόνα 32. Κατασκευή του φράγματος όπου θα μεταφερθεί το υλικό πλήρωσης. | 102 |
| Εικόνα 33. Ξύλινο φράγμα όπου μεταφέρεται υδραυλικά το υλικό λιθογόμωσης και συγκρατείται προσωρινά..... | 102 |
| Εικόνα 34. Στάδιο 2 της εκμετάλλευσης, πραγματοποιείται η εκσκαφή των πρώτων στοών. | 105 |
| Εικόνα 35. Στάδιο 3 της εκμετάλλευσης, όπου γίνεται η πλήρωση των κενών με το υλικό λιθογόμωσης. | 105 |
| Εικόνα 36. Στάδια 8 και 9 του βασικού μοντέλου στη προσομοίωση όπου γίνεται συνολική εκμετάλλευση του μεταλλείου. | 106 |
| Εικόνα 37. Μετακινήσεις της περιβάλλουσας το κοιτάσμα βραχώμαζας στα στάδια 16 και 17..... | 107 |
| Εικόνα 38. Μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στα στάδια εκμετάλλευσης 22 (πάνω) και 23..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 39. Στάδιο 27°, τελικό στάδιο εκμετάλλευσης και παρουσία στοιχείων αστοχίας (κάτω αριστερά) και διανύσματα παραμόρφωσης (κάτω δεξιά). | 109 |
| Εικόνα 40. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο (27° στάδιο) αναλυτικά. | 110 |
| Εικόνα 41. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης του ομοιώματος του μεταλλείου..... | 113 |
| Εικόνα 42. Στάδια 8 και 9 στο μοντέλο με μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της λιθογόμωσης. | 114 |
| Εικόνα 43. Στάδια 16 (πάνω) – 17 με αντοχή του υλικού λιθογόμωσης $\sigma_c=1$ MPa. | 115 |
| Εικόνα 44. Μετακινήσεις στα στάδια εκμετάλλευσης 22 (πάνω) και 23. | 116 |
| Εικόνα 45. Τελικό στάδιο 27 εκμετάλλευσης με πλήρωση των κενών με σώμα λιθογόμωσης. | 117 |
| Εικόνα 46. Στοιχεία αστοχία στην περιοχή της εκμετάλλευσης για $\sigma_c=1$ MPa. | 118 |
| Εικόνα 47. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στα στάδια 8 και 9 με υψηλό μέτρο ελαστικότητας..... | 119 |
| Εικόνα 48. Μέγιστες μετακινήσεις στο μοντέλο με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, στα στάδια 16 -17. | 120 |
| Εικόνα 49. Μετακινήσεις της βραχόμαζας γύρω και μέσα στο κοίτασμα του τελικού σταδίου (27°) της εκμετάλλευσης..... | 121 |
| Εικόνα 50. Στοιχεία αστοχίας στο μοντέλο με $E=3125$ MPa..... | 122 |
| Εικόνα 51. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στα στάδια 8 και 9 του μοντέλου προσομοίωσης με μείωση του μέτρου ελαστικότητας. | 123 |
| Εικόνα 52. Τιμές μέγιστων μετακινήσεων στα αντίστοιχα στάδια 16 - 17 με μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 25%..... | 124 |
| Εικόνα 53. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης, στάδιο 27°. | 125 |
| Εικόνα 54. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο του μοντέλου με μειωμένο E κατά 25%. | 127 |
| Εικόνα 55. Συνολικές μετακινήσεις στα προσομοιωτικά στάδια 8 και 9. | 128 |
| Εικόνα 56. Στάδια 16 και 17 στη προσομοίωση με μεγαλύτερο GSI. | 129 |
| Εικόνα 57. Συνολικές μετακινήσεις στο τελικό στάδιο (27) της προσομοίωσης με αυξημένο τον δείκτη GSI. | 130 |
| Εικόνα 58. Αστοχίες της βραχόμαζας στο τελικό στάδιο..... | 131 |
| Εικόνα 59. Στάδια 8 και 9 στο παραμετρικό μοντέλο, με μείωση στο GSI της λιθογόμωσης. | 132 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 60. Συνολικές μετακινήσεις στα στάδια 16 (πάνω) και 17 (κάτω) με μειωμένο GSI. | 133 |
| Εικόνα 61. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο του προσομοιωτικού μοντέλου με δείκτη GSI = 50..... | 134 |
| Εικόνα 62. Τελικό στάδιο προσομοίωσης με τα στοιχεία αστοχίας. | 136 |
| Εικόνα 63. Στάδια προσομοίωσης 8 και 9 με συντελεστή k να ισούται με 2 και 1 αντίστοιχα..... | 137 |
| Εικόνα 64. Μετακινήσεις της βραχύμαζας στα στάδια 16 και 17. | 138 |
| Εικόνα 65. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο προσομοίωσης 27..... | 139 |
| Εικόνα 66. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο στην παραμετρική ανάλυση μεταβολής του k. | 140 |
| Εικόνα 67. Στάδιο 2 (πάνω) και 3 στην εκμετάλλευση ομάδας διαδοχικών ορόφων. | 141 |
| Εικόνα 68. Μετακινήσεις της βραχύμαζας στα στάδια προσομοίωσης 8 (πάνω) και 9. . | 142 |
| Εικόνα 69. Μετακινήσεις στα στάδια 16 και 17 της προσομοίωσης. | 143 |
| Εικόνα 70. Στάδιο 24° από την εκμετάλλευση ομάδας ορόφων στον τελευταίο υψομετρικό επίπεδο. | 144 |
| Εικόνα 71. Τελικό στάδιο του μοντέλου της ομάδας διαδοχικών ορόφων. Στάδιο 25°... | 145 |
| Εικόνα 72. Στοιχεία αστοχίας στο ομοίωμα ομάδας ορόφων, χωρίς υποστήριξη..... | 146 |
| Εικόνα 73. Μετακινήσεις της βραχύμαζας στα αρχικά στάδια της εκμετάλλευσης, στάδια 2 και 4..... | 147 |
| Εικόνα 74. Μετακινήσεις στα προσομοιωτικά στάδια 20 και 22, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. | 148 |
| Εικόνα 75. Μετακινήσεις στα στάδια 26 και 28 του μοντέλου με χρήση υποστήριξης... | 149 |
| Εικόνα 76. Συνολικές μετακινήσεις στα στάδια προσομοίωσης 32 και 35. | 150 |
| Εικόνα 77. Τελικό στάδιο εκμετάλλευσης με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και διανύσματα παραμόρφωσης. | 151 |
| Εικόνα 78. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της συνολικής εκμετάλλευσης με χρήση υποστήριξης..... | 153 |
| Εικόνα 79. Στάδια 8 και 10, εκσκαφή, υποστήριξη και λιθογόμωση. | 154 |
| Εικόνα 80. Μετακινήσεις στα προσομοιωτικά στάδια 19° και 29°..... | 155 |
| Εικόνα 81. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο. | 156 |
| Εικόνα 82. Τελικό στάδιο προσομοίωσης διαδοχικών ορόφων με χρήση liner. Στάδιο 37, στοιχεία αστοχίας (δεξιά). | 156 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 83. Στοιχεία αστοχίας στο στάδιο όπου ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση της ομάδας ορόφων. | 157 |
| Εικόνα 84. Μετακινήσεις στα στάδια 3 και 4 του μοντέλου με μείωση του πάχους στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. | 158 |
| Εικόνα 85. Μεταβολή του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε 5cm, στάδια 20 - 22. | 159 |
| Εικόνα 86. Στάδιο προσομοίωσης 32 στο μοντέλο με υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm. | 160 |
| Εικόνα 87. Τελικό στάδιο εκμετάλλευσης με υποστήριξη. Στοιχεία αστοχίας (πάνω δεξιά) και διανύσματα παραμόρφωσης (πάνω αριστερά). | 161 |
| Εικόνα 88. Στοιχεία αστοχίας σε διάτμηση και σε εφελκυσμό στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης με πάχος στρώσης σκυροδέματος 5cm. | 162 |
| Εικόνα 89. Στάδιο 10 ^ο προσομοίωσης μοντέλου με κενό 20cm στην οροφή. | 163 |
| Εικόνα 90. Μετακινήσεις στα στάδια 16 – 18 του μοντέλου με κενό στην οροφή των στοών εκμετάλλευσης. | 164 |
| Εικόνα 91. Τελικό στάδιο με κενά στους ανώτερους ορόφους. Στάδιο 31. | 165 |
| Εικόνα 92. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης με το κενό 20cm. Κατώτερο υψομετρικά τμήμα της εκμετάλλευσης (κάτω). | 166 |

Περιεχόμενα Πινάκων

| | |
|--|------------------------------|
| Πίνακας 1. Ποσοστά συμμετοχής υλικών στο σώμα της λιθογομώσης..... | 63 |
| Πίνακας 2. Τιμές παραμέτρων υπολογισμού των γεωτεχνικών τιμών των γεωλογικών σχηματισμών και του υλικού λιθογόμωσης με την εφαρμογή της μεθοδολογίας GSI. | 65 |
| Πίνακας 3. Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 200m..... | Error! Bookmark not defined. |
| Πίνακας 4. Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 300m..... | 67 |
| Πίνακας 5. Συντελεστές κριτηρίου Hoek και Brown για ακέραιο πέτρωμα (Bieniawski, 1984)..... | 69 |
| Πίνακας 6. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή της εκμετάλλευσης στο ομοίωμα του συνολικού μεταλλείου σε διάφορα στάδια προσομοίωσης..... | 111 |
| Πίνακας 7. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή πάνω από την εκμετάλλευση στο ομοίωμα του συνολικού μεταλλείου σε διάφορα στάδια προσομοίωσης..... | 111 |
| Πίνακας 8. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στο τμήμα κάτω από την εκμετάλλευση στο ομοίωμα του συνολικού μεταλλείου σε διάφορα στάδια προσομοίωσης..... | 112 |
| Πίνακας 9. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης με μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. | 118 |
| Πίνακας 10. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας γύρω από το κοίτασμα με μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη..... | 118 |
| Πίνακας 11. Μέγιστες τιμές μετακινήσεων της βραχομάζας μέσα στην περιοχή του κοιτάσματος, με μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας..... | 126 |
| Πίνακας 12. Μέγιστες τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας που περιβάλλει το κοίτασμα, με μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας..... | 126 |
| Πίνακας 13. Τιμές μέγιστων μετακινήσεων της βραχόμαζας στο εσωτερικό του κοιτάσματος με μεταβολή του δείκτη GSI στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης..... | 135 |
| Πίνακας 14. Τιμές μέγιστων μετακινήσεων της βραχόμαζας γύρω από το κοίτασμα με μεταβολή του δείκτη GSI στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης..... | 135 |
| Πίνακας 15. Συνολικές μετακινήσεις της βραχόμαζας στο συγκεκριμένο παραμετρικό μοντέλο. | 139 |
| Πίνακας 16 Μετακινήσεις στην περιοχή πάνω από το κοίτασμα..... | 146 |
| Πίνακας 17. Συνολικές μετακινήσεις στο εσωτερικό του κοιτάσματος..... | 146 |
| Πίνακας 18. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας μέσα στο σώμα του κοιτάσματος στο ομοίωμα του μεταλλείου με χρήση υποστήριξης..... | 152 |

| | |
|--|--------|
| Πίνακας 19. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας στην περιοχή πάνω από το κοίτασμα στο ομοίωμα του μεταλλείου με χρήση υποστήριξης..... | 152 |
| Πίνακας 20. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας στην περιοχή κάτω από το κοίτασμα στο ομοίωμα του μεταλλείου με χρήση υποστήριξης..... | 153 |
| Πίνακας 21. Μέγιστες μετακινήσεις της βραχόμαζας πάνω από την περιοχή της εκμετάλλευσης. | 157 |
| Πίνακας 22. Συνολικές μετακινήσεις στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης καθώς προχωρούν τα στάδια. | 157 |
| Πίνακας 23. Μετακινήσεις της βραχόμαζας γύρω από την εκμετάλλευση, σε σχέση με το πάχος της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος..... | 160 |
| Πίνακας 24. Μετακινήσεις της βραχόμαζας μέσα στο σώμα του κοιτάσματος, σε σχέση με το πάχος της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. | 161 |
| Πίνακας 25. Μέγιστες μετακινήσεις στην περιοχή εσωτερικά της εκμετάλλευσης..... | Error! |

Bookmark not defined.

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

| | |
|--|-----|
| Διάγραμμα 1. Στάδια προσομοίωσης με τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κοιτάσματος. | 110 |
| Διάγραμμα 2. Τα στάδια προσομοίωσης με τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή πάνω από το κοιτάσμα. | 111 |
| Διάγραμμα 3. Τα στάδια προσομοίωσης με τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή κάτω από το κοιτάσμα. | 112 |
| Διάγραμμα 4. Μέγιστες μετακινήσεις στα μοντέλα της συνολικής εκμετάλλευσης με και χωρίς χρήση υποστηρικτικών μέτρων. | 168 |
| Διάγραμμα 5. Γραφική απεικόνιση των σταδίων της προσομοίωσης με τις μέγιστες μετακινήσεις πάνω από το κοιτάσμα. | 169 |
| Διάγραμμα 6. Τα στάδια προσομοίωσης με τις μέγιστες συνολικές μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή εσωτερικά του κοιτάσματος. | 170 |
| Διάγραμμα 7. Μεταβολές των μετακινήσεων της βραχόμαζας με τα στάδια της προσομοίωσης με μεταβολή της αντοχής σς της λιθογόμωσης. | 171 |
| Διάγραμμα 8. Μεταβολές στις μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή του κοιτάσματος με τα στάδια για τα διάφορα μέτρα ελαστικότητας E. | 172 |
| Διάγραμμα 9. Μέγιστες μετακινήσεις στους διάφορους δείκτες GSI με τα στάδια προσομοίωσης στην περιοχή της εκμετάλλευσης. | 173 |
| Διάγραμμα 10. Μεταβολές των μετακινήσεων με τα στάδια προσομοίωσης, στους διάφορους δείκτες GSI στην περιοχή γύρω από την εκμετάλλευση. | 174 |
| Διάγραμμα 11. Μεταβολές των μετακινήσεων της βραχόμαζας με τα στάδια εκμετάλλευσης για τα διαφορετικά πάχη εκτοξευόμενου σκυροδέματος γύρω από την εκμετάλλευση. | 175 |
| Διάγραμμα 12. Μεταβολές των μετακινήσεων της βραχόμαζας με τα στάδια εκμετάλλευσης για τα διαφορετικά πάχη εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο εσωτερικό του κοιτάσματος. | 176 |
| Διάγραμμα 13. Στάδια προσομοίωσης με μέγιστες μετακινήσεις του βασικού μοντέλου και του παραμετρικού με μεταβολή του λόγου k. | 177 |
| Διάγραμμα 14. Διαγραμματική απεικόνιση των μετακινήσεων της βραχόμαζας κατά τα διάφορα στάδια προσομοίωσης στο εσωτερικό του κοιτάσματος, στο βασικό μοντέλο και στο μοντέλο με κενό στις οροφές κάποιων ορόφων 20cm. | 178 |

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Το πρόβλημα που τίθεται στην τεχνική μηχανική σε όλες τις τεχνικές μελέτες κατασκευών, είναι η πρόβλεψη της απόκρισης της κατασκευής κάτω από την επιβολή φορτίων σε αυτή κατά την διάρκεια της προβλεπόμενης λειτουργίας της. Το αντικείμενο της μηχανικής των πετρωμάτων όπως εφαρμόζεται στη μεταλλευτική, είναι κυρίως η εφαρμογή των αρχών της μηχανικής στον σχεδιασμό κατασκευών σε πετρώματα.

Η Μηχανική Πετρωμάτων ή Βραχομηχανική (Rock Mechanics, Rock Engineering) είναι η θεωρητική και η εφαρμοσμένη επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων τόσο στο φυσικό τους περιβάλλον όσο και στο εργαστήριο, κάτω από την εφαρμογή διαφόρων ενταντικών καταστάσεων.

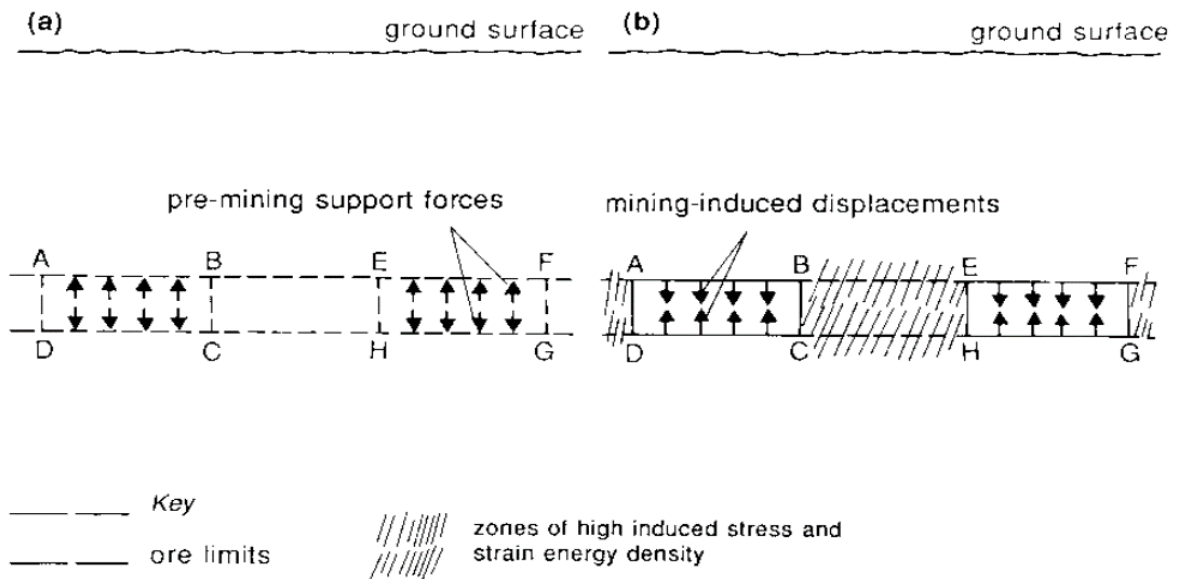
Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό, είναι σημαντική για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υπόγειων ανοιγμάτων, στοών και κατασκευών, τόσο σε μεταλλευτικά όσο και σε τεχνικά έργα. Η τεχνική μηχανική των πετρωμάτων (Rock mechanics engineering), η οποία χρησιμοποιείται για τη σύγχρονη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς και των υπογείων διανοίξεων, χρησιμοποιεί για την ανάλυση τις μεθόδους της κλασικής μηχανικής, λαμβάνει επίσης ποσοτικά στοιχεία για τις μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων από εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές βραχομηχανικής.

Η εφαρμογή των αρχών της μηχανικής των πετρωμάτων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις βασίζεται σε απλές ορισμένες αρχές. Πρώτον, αξιωματικά, η βραχώμαζα μπορεί να περιέχει μία σειρά από μηχανικές ιδιότητες που δύναται να μετρηθούν με πρότυπες δοκιμές ή να υπολογιστούν με την χρήση καθιερωμένων τεχνικών. Δεύτερον, είναι βέβαιο πως οι διεργασίες των υπόγειων εκμεταλλεύσεων παράγουν μία δομική κατασκευή στο πέτρωμα που αποτελείται από κενά και στοιχεία υποστήριξης και πως η μηχανική απόκριση της κατασκευής υπάγεται σε αναλύσεις με βάση τις αρχές της κλασικής μηχανικής. Η τρίτη πρόταση είναι πως η ικανότητα πρόβλεψης και ελέγχου της μηχανικής απόκρισης της βραχώμαζας που περιβάλλει το έργο μεταλλευτικής δραστηριότητας, δύναται να εξασφαλίσει και να ενισχύσει την ασφαλή και οικονομική απόδοση του μεταλλείου. Η συγκεκριμένες ιδέες είναι δυνατόν να μοιάζουν κάπως

στοιχειώδης. Παρόλα αυτά, ακόμα και οι περιορισμένες εφαρμογές των γενικών ιδεών της μηχανικής σε εκσκαφές ή στον σχεδιασμό μεταλλευτικών έργων αποτελούν συγκριτικά πρόσφατες καινοτομίες (Hook and Brown, 1999). Είναι χρήσιμο να εξετάσουμε εν συντομία κάποιες από τις μηχανικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά την διάνοιξη ανοιγμάτων κατά τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις.

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται μία εγκάρσια τομή οριζόντιου, σταθερού πάχους κοίτασμα. Τα ABCD και EFGH αντιπροσωπεύουν τμήματα μεταλλεύματος που πρόκειται να εξορυχθούν. Πριν την εκμετάλλευση το υλικό μέσα στις επιφάνειες ABCD και EFGH ασκεί μία σειρά από δυνάμεις στήριξης στο περιβάλλον πέτρωμα. Η εκσκαφή του πετρώματος του μεταλλεύματος για την δημιουργία κενών του Σχήματος 1b εξαλείφει τις υποστηρικτικές δυνάμεις δηλαδή, η διαδικασία της εξόρυξης είναι στατικά ισοδύναμη με την εισαγωγή σειράς δυνάμεων στις επιφάνειες ABCD και EFGH, του ίδιου μεγέθους, αλλά αντίθετες σε αυτές που δρουν αρχικά.

Υπό την δράση αυτών των δυνάμεων, στο πέτρωμα οι ακόλουθες μηχανικές διαταραχές. Μετακινήσεις του περιβάλλοντος πετρώματος απαντώνται στο εσωτερικό των εξορυσσόμενων κενών. Τάσεις και μετακινήσεις επάγονται στο κεντρικό στήλο και στα άκρα. Οι συνολικές, τελικές τάσεις στον στήλο και στα άκρα προέρχονται από επαγωγικές τάσεις και την αρχική κατάσταση των τάσεων στην βραχόμαζα. Τέλος οι επιβάλλουσες δυνάμεις στην επιφάνεια που ενεργούν μέσω των επαγόμενων μετακινήσεων, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση εντατικής ενέργειας στη βραχόμαζα. Η εντατική ενέργεια αποθηκεύεται τοπικά στις ζώνες αυξημένης συγκέντρωσης τάσεων [5].



Σχήμα 1. (α) Συνθήκες πριν την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος. (β) Μηχανικές συνέπειες μεταλλευτικής δραστηριότητας στο κοιτάσμα.

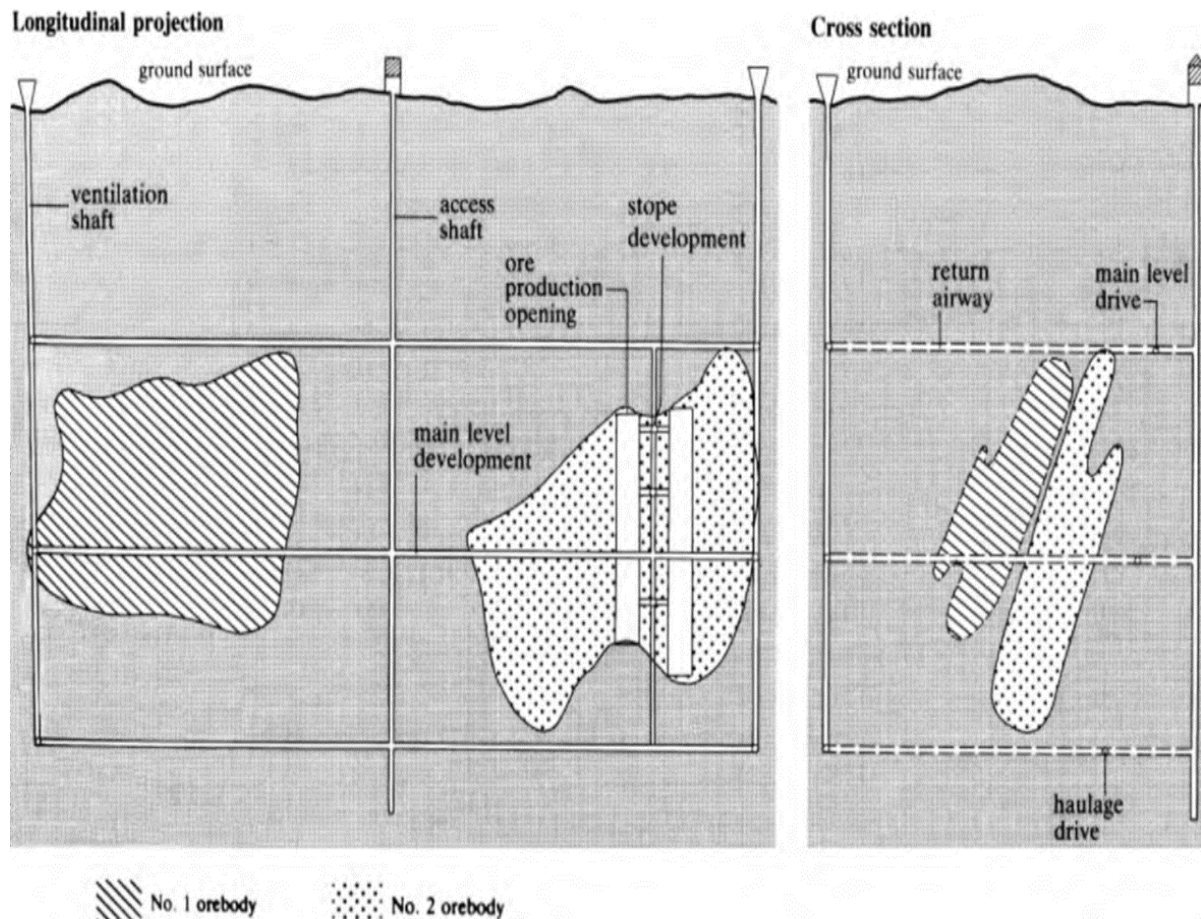
Ο τελικός στόχος στο σχεδιασμό ενός υπόγειου μεταλλευτικού έργου (μεταλλείου) είναι ο έλεγχος των μετακινήσεων των πετρωμάτων στο εσωτερικό αλλά και γύρω από το περιβάλλον της εκσκαφής. Οι ελαστικές μετακινήσεις γύρω από εκσκαφές είναι τυπικά μικρές. Μετακινήσεις πετρωμάτων μηχανικής σημασίας δύνανται να περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως θραύση άρρηκτου πετρώματος, ολίσθηση σε γεωλογικές δομές όπως ρήγματα, υπερβολικές μετατοπίσεις των πετρωμάτων της οροφής και του δαπέδου (για παράδειγμα, λόγω της αποκόλλησης από παρακείμενο πέτρωμα), ή αστοχία αστάθειας στο συνολικό σύστημα. Η τελευταία εκφράζεται φυσικά σαν μία ξαφνική απελευθέρωση της αποθηκευμένης δυναμικής ενέργειας ενώ παρουσιάζεται σημαντική αλλαγή στη σύνθεση του ισοζύγιου της κατασκευής. Αυτοί οι πιθανοί τρόποι συμπεριφοράς των πετρωμάτων, αμέσως ορίζουν κάποια από τα συστατικά της μεθοδολογίας που προορίζεται να παρέχει μία βάση για τον γεωμηχανικά υγιή και ορθό σχεδιασμό της εκσκαφής. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία. Οι ιδιότητες της αντοχής και της παραμόρφωσης του σώματος του μεταλλεύματος και των παρακείμενων πετρωμάτων που το περιβάλλουν πρέπει να καθορίζονται με ακριβή τρόπο.

Η γεωλογική δομή της βραχώμαζας, η θέση και οι μηχανικές ιδιότητες των ρηγμάτων καθώς και άλλων γεωλογικών θραύσεων, οι οποίες απαντώνται στη ζώνη επιρροής της μεταλλευτικής δραστηριότητας θα πρέπει να προσδιορίζονται από κατάλληλες ερευνητικές διαδικασίες. Εφόσον η πιθανότητα ολίσθησης στα επίπεδα αδυναμίας της

βραχόμαζας έχει σχέση με την πίεση νερού, η κατανομή της πίεσης των υπόγειων υδάτων στη περιοχή του μεταλλείου είναι σημαντικό να καθοριστεί. Τέλος, αναλυτικές τεχνικές απαιτούνται για την αξιολόγηση της κάθε είδους συμπεριφοράς της βραχόμαζας για τις συγκεκριμένες συνθήκες και την προτεινόμενη γεωμετρία της εξόρυξης [5].

1.2 Τοποθέτηση Προβλήματος

Η εξόρυξη ενός μεταλλεύματος με τη χρήση υπόγειας μεθόδου εκμετάλλευσης περιλαμβάνει την παραγωγή διαφόρων ειδών ανοιγμάτων, με σημαντικό αριθμό λειτουργιών. Η σχηματική εγκάρσια τομή και η διαμήκης τομή ενός μεταλλείου σε λειτουργία, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζει τους διαφορετικούς ρόλους ποικίλων εκσκαφών. Το κύριο φρέαρ, τα επίπεδα και οι διασταυρώσεις, οι στοές μεταφοράς του μεταλλεύματος, τα φρέατα αερισμού και οι δίοδοι του αέρα συνθέτουν τις στοές (ανοίγματα) πρόσβασης και λειτουργίας του μεταλλείου. Η διάρκεια ζωής τους μπορεί να συγκριθεί με ή ακόμα και να ξεπεράσει τη διάρκεια εκμετάλλευσης του κοιτάσματος και συνήθως αναπτύσσονται σε άγονο πέτρωμα. Προσπελαστικές και λειτουργικές στοές που σχετίζονται απευθείας με την εξόρυξη του μεταλλεύματος αποτελούνται από τις στοές πρόσβασης (cross cuts), μέτωπα διάτρησης, μέτωπα εκσκαφής, ανυψωτικές στοές πρόσβασης και προσπελαστικές στοές προς το μετάλλευμα όπου γίνονται διάφορες διεργασίες για την παραγωγή του μεταλλεύματος. Αυτές οι στοές αναπτύσσονται στο κοίτασμα ή στο περιβάλλον πέτρωμα κοντά στα όρια του κοιτάσματος και η λειτουργική τους ζωή περιορίζεται στη διάρκεια της εξορυκτικής δραστηριότητας άμεσα γειτονικών τμημάτων. Μεγάλος αριθμός στοών εξαλείφονται από την εξορυκτική δραστηριότητα. Ο τρίτος τύπος εκσκαφών είναι εκείνος της πηγής του μεταλλεύματος. Δύναται να είναι μέτωπο με καλά καθορισμένα και επιδαπέδια τοιχώματα που σχηματίζουν τα γεωμετρικά όρια του εξορυσσόμενου κενού, το οποίο με την σειρά του αυξάνει σε μέγεθος όσο προχωράει η εκμετάλλευση του μεταλλεύματος. Εναλλακτικά, η πηγή του μεταλλεύματος μπορεί ένας χώρος γεμάτος μπάζα με ευδιάκριτα κατώτερα και πλευρικά όρια, που συνήθως συμπίπτει με τα όρια του κοιτάσματος.



Σχήμα 2. Τα κυριότερα είδη εκσκαφών που περιέχονται στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις από διάφορες μεθόδους εκμετάλλευσης.

Τα προϊόντα μπαζών παράγονται με την επαγωγή αποσύνθεσης του πετρώματος πάνω από την στέψη του κοιτάσματος και πληρούν τον εξορυσσόμενο χώρο καθώς προχωράει η εκμετάλλευση. Η ζωή λειτουργίας αυτού του είδους στοών καθορίζεται από τη διάρκεια της εξόρυξης του μεταλλεύματος. Είναι ξεκάθαρο πως πρόκειται για δύο γεωμηχανικά διαφορετικές τεχνικές για υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Κάθε τεχνική αντιπροσωπεύεται στην πράξη από έναν αριθμό διαφορετικών μεθόδων εκμετάλλευσης. Η κατάλληλη μέθοδος που θα επιλεγεί για την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος καθορίζεται από παράγοντες όπως το μέγεθος, το σχήμα και τη γεωμετρία του κοιτάσματος, την κατανομή των τιμών στο εσωτερικό του και το γεωτεχνικό περιβάλλον.

Ο τελευταίος παράγοντας λαμβάνει υπόψη ζητήματα όπως οι επί τόπου ιδιότητες του κοιτάσματος και των πετρωμάτων που το περιβάλλουν, η γεωλογική δομή της βραχώμαζας, η εντατική κατάσταση των περιβαλλόντων πετρωμάτων και οι υδρογεωλογικές συνθήκες στη ζώνη της πιθανής μεταλλευτικής επιρροής. Αξίζει να

αναφερθεί πως οι μέθοδοι εκμετάλλευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το είδος και τον βαθμό της υποστήριξης που παρέχεται στη δομή του μεταλλείου από την εξορυκτική δραστηριότητα (Thomas, 1978). Υποστηριζόμενες μεταλλευτικές εγκαταστάσεις δημιουργούνται από μεθόδους εκμετάλλευσης όπως η ανοιχτού μετώπου, των θαλάμων και στύλων, ή των εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων και του συμπυκνόμενου μετώπου. Στις προγενέστερες μεθόδους, εξασφαλιζόταν η φυσική υποστήριξη των εγκαταστάσεων του μεταλλείου από απομεινάρια μεταλλεύματος που παρέμεναν στη περιοχή του μετώπου. Στις σύγχρονες μεθόδους η υποστήριξη των τοιχωμάτων των εξορυσσόμενων στοών επιτυγχάνεται είτε με την εισαγωγή υλικού πλήρωσης ή θραυσμένου μεταλλεύματος που έρχεται προσωρινά σε επαφή με τα τοιχώματα του εξορυσσόμενου μετώπου. Ο δεύτερος τύπος διαμόρφωσης ενός μεταλλείου είναι η δομή κατακρήμνισης που δημιουργείται από μεθόδους εκμετάλλευσης όπως η κατακρήμνιση προκαθορισμένου όγκου και των διαδοχικών ορόφων με κατακρήμνιση της οροφής (Thomas, 1978). Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν παρέχονται μέσα υποστήριξης στους εξορυσσόμενους χώρους, οι οποίοι πληρώνονται απευθείας με κατακερματισμένα και εκτοπισμένα κομμάτια του κοιτάσματος και πετρωμάτων που το περιβάλλουν.

Από τη σκοπιά της μηχανικής των πετρωμάτων, η διάκριση μεταξύ των δύο γενικών εξορυκτικών τεχνικών και των εγκαταστάσεων που δημιουργούν δύναται να πραγματοποιηθεί με βάση τις μετακινήσεις που επάγονται στο περιβάλλον πέτρωμα και στην ανακατανομή της ενέργειας που συνοδεύει την εκμετάλλευση. Στην τεχνική με τη χρήση υποστηρικτικών μέτρων, στόχος αποτελεί ο περιορισμός των μετακινήσεων του περιβάλλοντος πετρώματος σε ελαστικές τάξεις μεγέθους και η διατήρηση της όσο το δυνατόν, ακεραιότητας τόσο της βραχόμαζας όσο και των εναπομεινάντων εκμεταλλεύσιμων τμημάτων του κοιτάσματος. Αυτό τυπικά έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση εντατικής ενέργειας στο μεταλλείο και πρόβλημα αποτελεί η εξασφάλιση του να μην λάβει χώρα ασταθής απελευθέρωση ενέργειας. Η τεχνική της κατακρήμνισης προορίζεται να επιφέρει μεγάλη κλίμακας, ψευδοάκαμπτες μετακινήσεις του σώματος του πετρώματος πάνω από την στέψη του κοιτάσματος με το πεδίο των μετακινήσεων να πολλαπλασιάζεται μέσα στο πέτρωμα όσο επεκτείνεται η εξόρυξη. Η αρχή απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 3. Η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αποτόνωση της ενέργειας στην κατακρημνιζόμενη βραχόμαζα μέσω της ολίσθησης, της σύνθλιψης και της τριβής. Οι απαιτήσεις της εκμετάλλευσης είναι

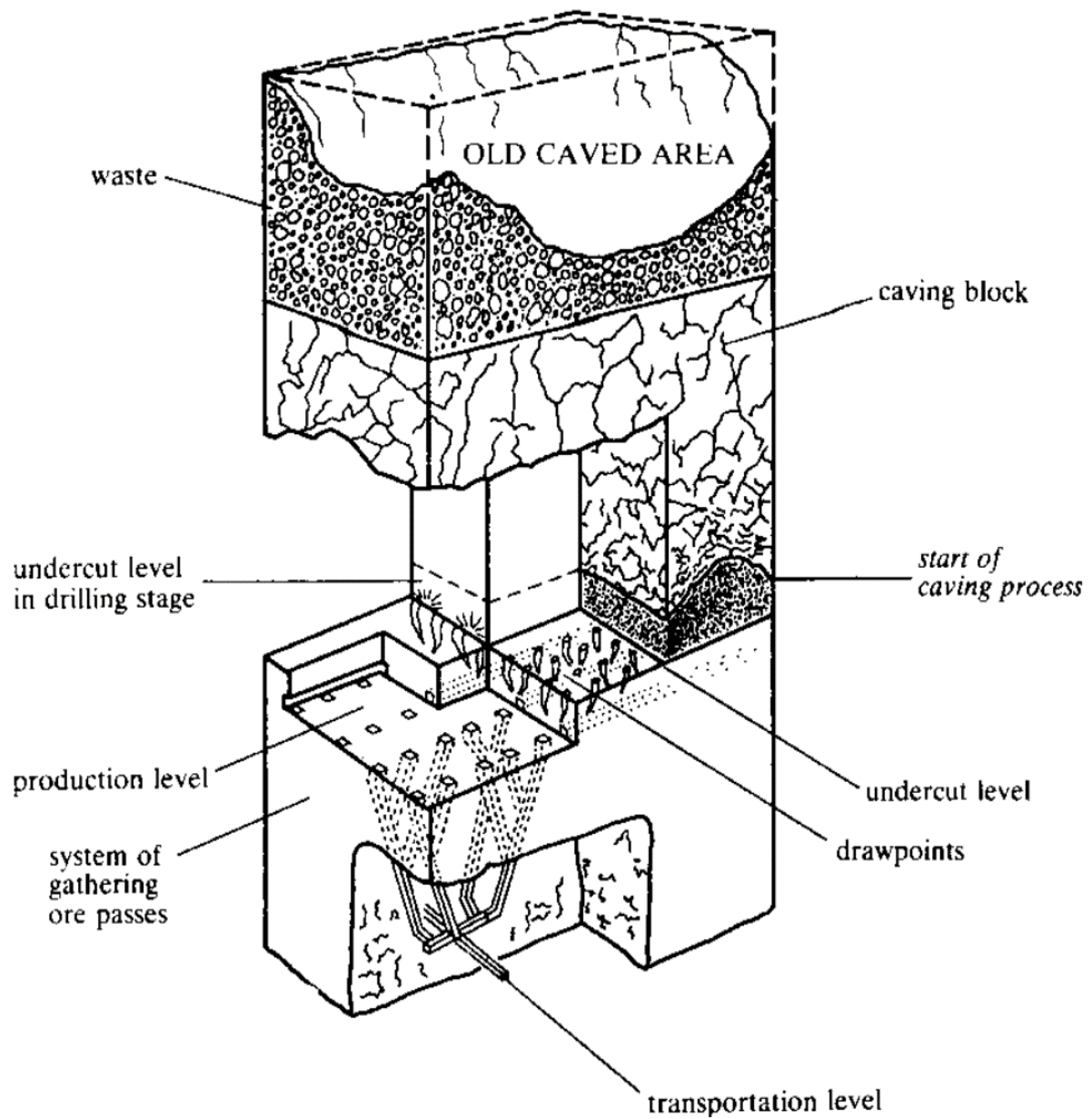
η εξασφάλιση της σταθερής μετακίνησης της κατακρημνιζόμενης μάζας έτσι ώστε το εξορυσσόμενο κενό να αυτό-πληρώνεται συνεχώς και να μην δημιουργούνται ασταθή κενά στο εσωτερικό του κατακρημνιζόμενου υλικού.

Η διάκριση μεταξύ διαφόρων εξορυκτικών τεχνικών δεν αποκλείει τη μετάβαση από τη μία τεχνική στην άλλη κατά την διάρκεια της ζωής ενός μεταλλεύματος. Στην πραγματικότητα, η διάκριση αυτή είναι χρήσιμη διότι καθορίζει τις κύριες μηχανικές επιπτώσεις σε οποιαδήποτε αλλαγή της εξορυκτικής στρατηγικής. Ανεξαρτήτως από τις εξορυκτικές τεχνικές που έχουν υιοθετηθεί για την εκσκαφή ενός μεταλλεύματος είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τέσσερις κοινοί στόχοι της μηχανικής των πετρωμάτων για την επίδοση ενός μεταλλείου ή μίας εκμετάλλευσης και για τους τρεις διαφορετικούς τύπους μεταλλευτικών ανοιγμάτων που περιγράφηκαν προηγουμένως. Αυτοί οι στόχοι είναι οι ακόλουθοι:

1. Να διασφαλίσει την συνολική σταθερότητα ολόκληρης της εκμετάλλευσης, που ορίζεται από της πηγές του κύριου σώματος του μεταλλεύματος, εξορυσσόμενα κενά, απομεινάρια μεταλλεύματος και παρακείμενα περιβάλλοντα πετρώματα.
2. Να προστατέψει τα κύρια λειτουργικά ανοίγματα, στοές προσπέλασης καθ' όλη την διάρκεια της σχεδιασμένης ζωής λειτουργίας τους.
3. Να εξασφαλίσει πρόσβαση σε ασφαλές εργασιακό περιβάλλον τόσο στο εσωτερικό, όσο και περιμετρικά του κέντρου παραγωγής του μεταλλεύματος.
4. Να διατηρήσει την εξορύξιμη κατάσταση των αποθεμάτων του μεταλλεύματος που δεν έχει γίνει ακόμα η εκμετάλλευσή τους.

Αυτοί οι στόχοι δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Επίσης, το τυπικό πρόβλημα για τον προγραμματισμό και τον σχεδιασμό μιας εκμετάλλευσης είναι ο εντοπισμός μετώπου ή ακολουθία εξόρυξης όγκου μεταλλεύματος που να ικανοποιεί τους τέσσερις αυτούς στόχους ταυτόχρονα καθώς και να εκπληρώνει τις διάφορες λειτουργικές και οικονομικές απαιτήσεις. Η πραγματοποίηση των στόχων της μηχανικής των πετρωμάτων απαιτεί καλή γνώση των γεωλογικών συνθηκών στην περιοχή του μεταλλείου και δυνατότητα ανάλυσης των μηχανικών συνεπειών από τις διάφορες εξορυκτικές επιλογές. Απαιτείται επίσης εκτίμηση των ευρείων πολιτικών διαχείρισης και γενικών μεταλλευτικών θεμάτων που έχουν υιοθετηθεί για την εκμετάλλευση συγκεκριμένων πηγών ορυκτού πλούτου. Είναι σημαντικό να οριστεί η βασική διαφορά σε λειτουργικούς περιορισμούς μεταξύ των υπόγειων εξορύξεων

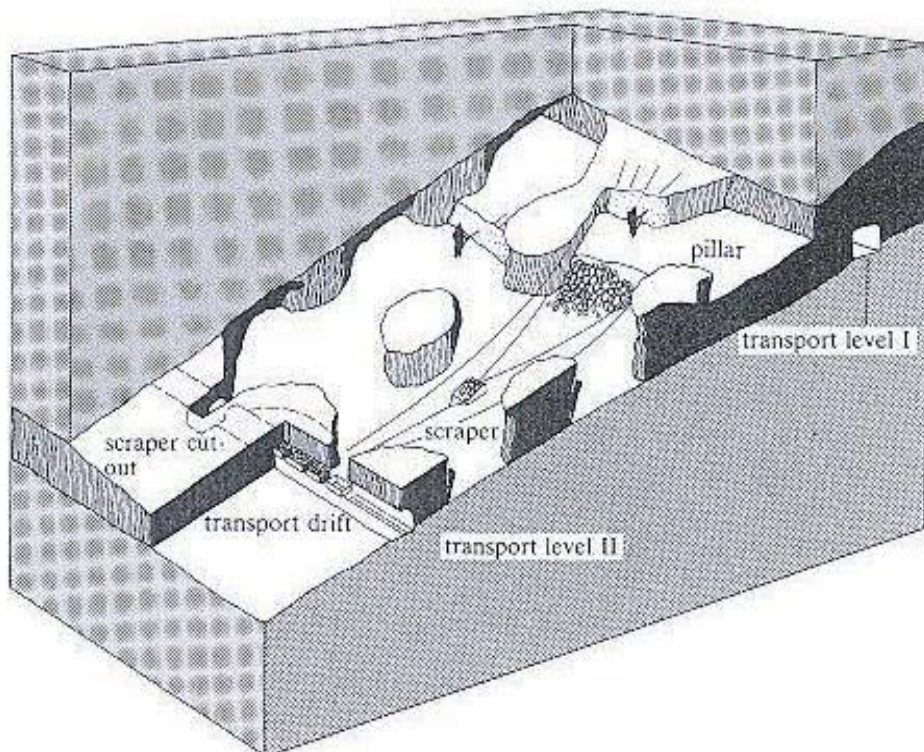
σχεδιασμένων τεχνικών έργων και των εκσκαφών που περιλαμβάνονται σε μεταλλευτικές εφαρμογές όπου δραστηριοποιείται το αντίστοιχο ανθρώπινο δυναμικό. Στη τελευταία περίπτωση η χρησιμότητα της κάθε στοάς και ανοίγματος ελέγχεται εξ' ολοκλήρου από τον υπεύθυνο χειριστή και κατά τη διάρκεια της ενεργής λειτουργίας του οι επιφάνειες της εκσκαφής αποτελούν αντικείμενο συνεχόμενων επιθεωρήσεων από το εξειδικευμένο προσωπικό της εκμετάλλευσης. Εργασίες για την συντήρηση και την επανεγκατάσταση ασφαλών συνθηκών γύρω από ένα άνοιγμα, δύναται να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε στάδιο της εκμετάλλευσης υπό τις υποδείξεις της διαχείρισης του μεταλλείου. Αυτές οι συνθήκες δεν ικανοποιούνται πάντα σε εκσκαφές για τεχνικά έργα. Μία άλλη βασική διαφορά είναι πως οι περισσότερες εκμεταλλεύσεις έχουν διάρκεια ζωής - λειτουργίας σημαντικά μικρότερη από εκείνη των εκσκαφών τεχνικών έργων. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός πως ο σχεδιασμός των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων αντικατοπτρίζει τον άμεσο έλεγχο της λειτουργικότητας των ανοιγμάτων – στοών, την επιθεώρηση, τη συντήρηση και την τοποθέτηση υποστήριξης που παρέχονται από τον υπεύθυνο. Επιπρόσθετα με τους διαφορετικούς λειτουργικούς περιορισμούς για τις μεταλλευτικές και αστικές δραστηριότητες (εκσκαφές) υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στη φύση των κατασκευστικών έργων που δημιουργούνται και αυτές επηρεάζουν κατευθείαν ολόκληρη τη φιλοσοφία του σχεδιασμού. Η κύρια διαφορά είναι πως ο σχεδιασμός κατασκευών τεχνικών έργων σε πετρωμάτα είναι ουσιαστικά σταθερός (αμετάβλητος) ενώ στη μεταλλευτική δραστηριότητα η δομή ενός μεταλλείου συνεχίζει να αναπτύσσεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Στη τελευταία περίπτωση η αλληλουχία εξόρυξης μετώπων ή όγκου μεταλλεύματος αποκτά μεγάλη σημασία. Εάν παρθούν αποφάσεις στα αρχικά στάδια ζωής ενός μεταλλείου είναι δυνατόν να δημιουργηθούν περιορισμοί στις επιλογές και την επιτυχία της εκμετάλλευσης όταν επιδιώκεται να εγκαθιδριθεί μία εύρυθμη και αποτελεσματική στρατηγική εκσκαφής ή να αποκτηθούν εναπομείναντα τμήματα του μεταλλεύματος [5].



Σχήμα 3. Κυριότερα χαρακτηριστικά στοιχεία μιας κατακρήμνισης (after Borquez, 1981).

1.3 Απόκριση της Βραχώμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις

Οι διαστάσεις των κοιτασμάτων βιομηχανικής σημασίας τυπικά ξεπερνούν τα εκατοντάδες μέτρα σε τουλάχιστον 2 διαστάσεις. Κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος οι διαστάσεις του μετώπου εξόρυξης δυνάται να έχουν την ίδια τάξη μεγέθους με τις διαστάσεις του κοιτάσματος. Είναι βολικό να περιγραφεί η απόκριση της περιβάλλουσας βραχώμαζας κατά την διάρκεια των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων σε όρους μετακινήσεων στην περιφέρεια του σώματος του μεταλλεύματος, εκφραζόμενη σε συσχετισμό με την ελάχιστη διάσταση d_m εκσκαφών που πραγματοποιούνται στο κοίτασμα. Είναι επίσης χρήσιμο να θεωρήσουμε τη συμπεριφορά της βραχώμαζας κοντά και μακριά από το κοίτασμα. Με έναν τρόπο ανάλογο με τον ορισμό της ζώνης επιρροής μιας εκσκαφής, το κοντινό πεδίο ενός κοιτάσματος δύνάται να παρουσιάζεται ως το τμήμα του πετρώματος που βρίσκεται στην επιφανειακή απόσταση $3d_m$ από τα όρια του κοιτάσματος [5].



Σχήμα 4. Στοιχεία υποστηριζόμενης μεθόδου εκμετάλλευσης (after Harmin, 1982).

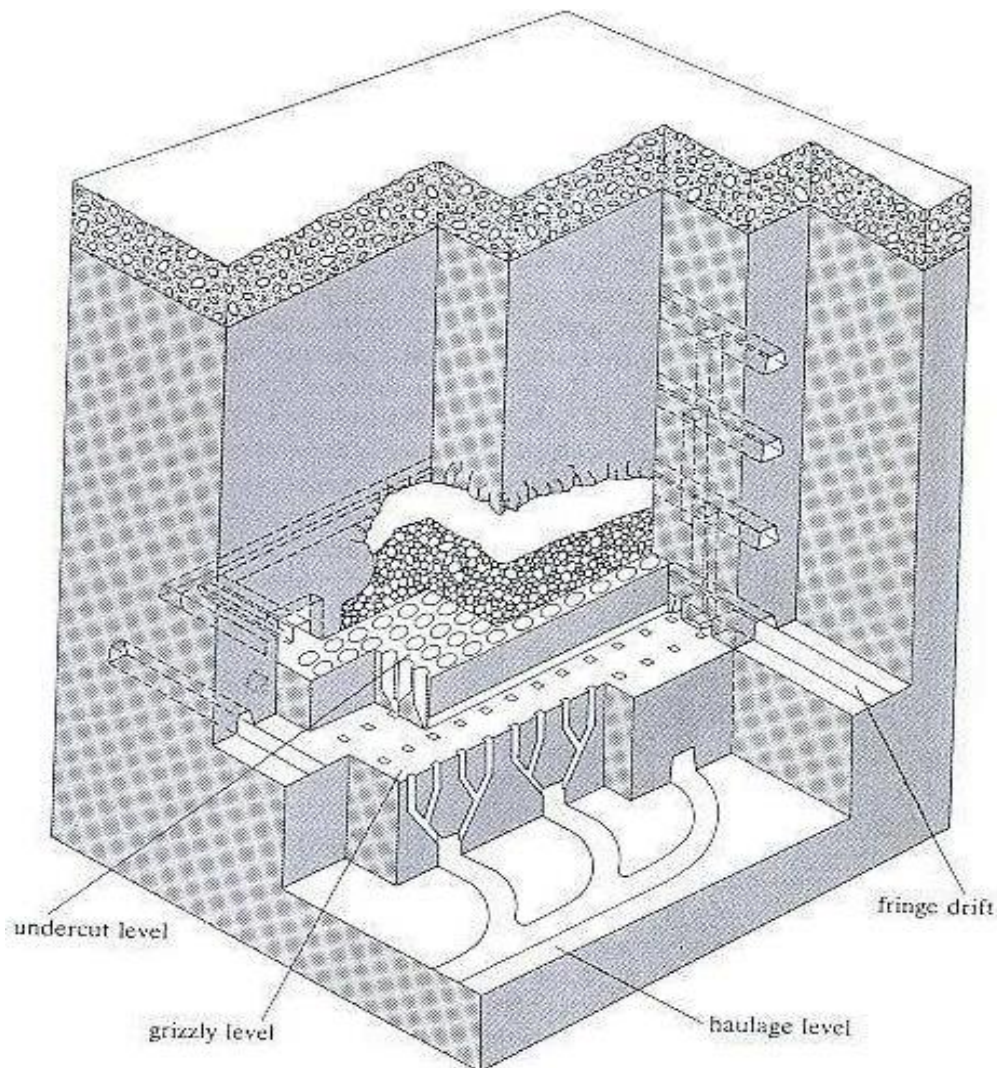
Οι διαφορετικές μέθοδοι εκμετάλλευσης σχεδιάζονται για να προκαλέσουν διάφορους τύπους και μεγέθη μετακινήσεων τόσο στο κοντινό όσο και στο μακρινό πεδίο ενός κοιτάσματος. Για παράδειγμα, η μέθοδος εκμετάλλευσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 4, είναι σχεδιασμένη να συγκρατεί τις μετακινήσεις των πετρωμάτων στο κοντινό αλλά

και στο μακρινό πεδίο του κοιτάσματος σε ελαστικές τάξεις μεγέθους. Η εμπόδιση των μετακινήσεων συνοδεύεται από την αύξηση των τάσεων στο εσωτερικό και γύρω από τις μονάδες υποστήριξης που ελέγχουν τις παραμορφώσεις των πετρωμάτων στο κοντινό πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης εντατικής κατάστασης στο κοντινό πεδίο του κοιτάσματος. Το πέτρωμα που βρίσκεται στην περιφέρεια του κοιτάσματος είναι πλήρως υποστηριζόμενο από στύλους εναπομείναντος μεταλλεύματος, ενάντια σε μετακινήσεις μεγάλης κλίμακας κατά την διάρκεια των εξορυκτικών διεργασιών του μετώπου. Μία τέτοια, πλήρως υποστηριζόμενη μέθοδος εκμετάλλευσης αντιπροσωπεύει μία εννοιολογική ακρότητα του μεγάλου αριθμού των γεωμηχανικών στρατηγικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος.

Θεμελιωδώς διαφορετική γεωμηχανική στρατηγική εφαρμόζεται στη μέθοδο εκμετάλλευσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5. Στην περίπτωση αυτή, η εκμετάλλευση ξεκινά με την δημιουργία μετακινήσεων του πετρώματος που βρίσκεται πάνω από μία εκσκαφή στο μέταλλευμα. Σε αυτή την περιοχή οι αρχικές μετακινήσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την κατακόρυφη διάσταση της εκσκαφής. Καθώς προχωράει η εκμετάλλευση το πεδίο των μετακινήσεων του άκαμπτου σώματος μεταδίδεται μέσω του κοιτάσματος στα κοντινά και μακρινά πεδία που το περιβάλλουν. Η επιτυχία αυτής της διαδικασίας βασίζεται στην χωρικά συνεχόμενη και προοδευτική μετακίνηση του κοντινού και μακρινού πεδίου κατά την εκμετάλλευση του μεταλλεύματος. Σε αυτή την μέθοδο εκμετάλλευσης με κατακρήμνιση η απόκριση του πετρώματος είναι γεωμηχανικά αντίθετη από εκείνη που προκλήθηκε κατά τη μέθοδο με χρήση υποστήριξης που περιγράφηκε νωρίτερα.

Μία εναλλακτική μέθοδος για την περιγραφή της συμπεριφοράς της βραχώμαζας σε μεθόδους εκμετάλλευσης απεικονίζεται στο Σχήμα 4 και 5, με την έννοια της καταστατικής συμπεριφοράς του μέσου που περιβάλλει την εκμετάλλευση. Μέσω του περιορισμού των μετακινήσεων της βραχώμαζας τόσο κοντά, όσο και μακριά στο κοίτασμα, η μέθοδος με υποστήριξη του Σχήματος 4 προορίζεται για την διατήρηση ψευδο – συνεχούς συμπεριφοράς του μέσου όπου φιλοξενείται η εκμετάλλευση. Η μέθοδος κατακρήμνισης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5, με την επιβολή μετακινήσεων σε μονάδες της βραχώμαζας, εκμεταλλεύεται την ασυνεχή συμπεριφορά ενός περιβάλλοντος πετρώματος όταν πραγματοποιείται αποτόνωση περιοριστικών τάσεων. Οι μέθοδοι με υποστήριξη μπορούν να πετύχουν μόνο εάν θλιπτικές τάσεις, ικανές να

διατηρήσουν την συνέχεια των ιδιοτήτων της βραχώμαζας, είναι υποφερτές από το πέτρωμα του κοντινού πεδίου. Μέθοδοι κατακρήμνισης χρησιμοποιούνται εκεί όπου χαμηλές εντατικές καταστάσεις στο κοντινό πεδίο μπορούν να επιβάλλουν ασυνεχή συμπεριφορά στο μέσο. Έτσι κάτω από ιδανικές συνθήκες εκσκαφής, οι μέθοδοι υποστηριζόμενων μετώπων θα επέβαλαν πλήρως συνεχή συμπεριφορά βραχώμαζας, ενώ αντίθετα οι μέθοδοι κατακρήμνισης θα επέφεραν πλήρως ασυνεχή συμπεριφορά.



Σχήμα 5. Στοιχεία μεθόδου εκμετάλλευσης με κατακρήμνιση (after Dravo Corporation, 1974).

Οι γεωμηχανικές διαφορές μεταξύ των μεθόδων εκμετάλλευσης με υποστήριξη και με κατακρήμνιση μπορούν να καθοριστούν επαρκώς από τα διαφορετικά τασικά πεδία και πεδία μετακίνησης που επιβάλλονται στο κοίτασμα στο κοντινό και στο μακρινό πεδίο. Πρόσθετη εξήγηση στην διαφορά των δύο βασικών μεταλλευτικών στρατηγικών μπορεί να αποκτηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη συγκέντρωση και την ανακατανομή της ενέργειας που συνοδεύει τη μεταλλευτική δραστηριότητα.

Σε μεθόδους που υποστηρίζονται, οι εργασίες εξόρυξης αυξάνουν την ελαστική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε συγκεντρώσεις τάσεων στα στοιχεία της υποστήριξης και στο κοντινό πεδίο του πετρώματος. Ο στόχος της μεταλλευτικής είναι να διασφαλίσει ότι δεν θα συμβεί η απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Μια τέτοια ξαφνική απελευθέρωση ενέργειας θα μπορούσε να περιλαμβάνει ξαφνική ρήξη των στοιχείων υποστήριξης, ταχύ κλείσιμο των μετώπων, ή ταχεία δημιουργία μεγάλης κλίμακας θραύσης στο πέτρωμα που περιβάλλει το κοιτάσμα. Τα γεγονότα αυτά φέρουν καταστροφικές αλλαγές στην γεωμετρία της στοάς, ζημιά σε παρακείμενα μεταλλευτικά ανοίγματα, και άμεσο κίνδυνο για το προσωπικό του μεταλλείου.

Για τις μεθόδους με κατακρήμνιση, ο στόχος της εξόρυξης είναι η πρόληψη της συσσώρευσης της ενέργειας, καθώς και η συνεχής διάχυση της ενέργειας που υπάρχει πριν την έναρξη της εξόρυξης προερχόμενη από το υφιστάμενο βαρυτικό, τεκτονικό και εντατικό πεδίο. Πριν από την κατακρήμνιση, το πέτρωμα στο εσωτερικό, γύρω και πάνω από ένα κοιτάσμα διαθέτει τόσο ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης όσο και βαρυτική δυναμική ενέργεια. Μεταλλευτική δραστηριότητα που προκαλεί χαλάρωση του πεδίου των τάσεων και κάθετη μετατόπιση του κοιτάσματος και του πετρώματος που το περιβάλλει, μειώνει τη συνολική ενέργεια της βραχόμαζας. Ο στόχος είναι να εξασφαλιστεί ότι, ο ρυθμός της κατανάλωσης ενέργειας στην κατακρημνισμένη μάζα, εκπροσωπούμενη από την ολίσθηση, τη σύνθλιψη και την τριβή των θραυσμάτων των πετρωμάτων, είναι ανάλογος με το ρυθμό της απόσπασης του μεταλλεύματος από την ενεργό ζώνη εξόρυξης. Αν αυτό επιτευχθεί, αποκλείεται η ανάπτυξη ασταθών δομών στο μέσο κατακρήμνισης, όπως θόλοι, γεφυρώματα και κενά. Η ογκομετρικά ομοιόμορφη διάχυση της ενέργειας στο κατακρημνισμένο μέσο είναι σημαντική για την ανάπτυξη ομοιόμορφο θρυμματισμό του μεταλλεύματος. Το σχετικό ομοιόμορφο πεδίο μετατόπισης αποτρέπει την δυναμική φόρτιση των εγκαταστάσεων και στοιχείων του πετρώματος κάτω από τη μάζα της κατακρήμνισης.

Οι αντικρουόμενες στρατηγικές εξόρυξης της πλήρης υποστήριξης και εκείνης της ελεύθερης μετακίνησης περιλαμβάνει εννοιολογικές και γεωμηχανικές ακρότητες στην επαγόμενη απόκριση της βραχόμαζας που φιλοξενεί την εξόρυξη. Στην πράξη, ένα σύστημα εξόρυξης μπορεί να βασίζεται σε διαφορετικές γεωμηχανικές έννοιες σε διαφορετικά στάδια της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος. Για παράδειγμα η εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος δύναται, να κάνει χρήση ολοκληρωτικά φυσικής υποστήριξης στην αρχική φάση του μετώπου με εναπομείναντα τμήματα του

μεταλλεύματος να λειτουργούν ως στοιχεία στύλων. Στα αρχικά στάδια ανάκτησης των στύλων μεταλλεύματος, υπάρχουν αρκετά είδη τεχνητής υποστήριξης που μπορούν να τοποθετηθούν στα εξορυσσόμενα κενά, με στόχο τον έλεγχο των τοπικών αλλά και περιφερειακών μετακινήσεων της βραχώμαζας. Στα τελικά στάδια ανάκτησης των στύλων, η καταστροφή των στύλων και η εξαγωγή του μεταλλεύματος μπορεί να συνοδεύονται με κατακρήμνιση του περιβάλλοντος πετρώματος. Είναι ξεκάθαρο πως η μετάβαση από μία γεωμηχανική βάση σε άλλη δύναται να έχει σημαντικές συνέπειες για την ακεραιότητα και την απόκριση μόνιμων ανοιγμάτων και άλλων στοιχείων μιας δομής μεταλλείου. Αυτό υποδεικνύει πως οι σημαντικότεροι παράγοντες μίας ολοκληρωμένης εξορυκτικής στρατηγικής για ένα μέταλλευμα πρέπει να καθορίζονται πριν από την πραγματοποίηση αξιοσημείωτων και αμετάκλητων δεσμεύσεων κατά τα στάδια της προπαρασκευής του μεταλλεύματος [5].

1.4 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων

Στη πιο κοινή μορφή της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων, η εξόρυξη προχωρεί προς τα πάνω σε ένα κεκλιμένο κοίτασμα. (Μια εναλλακτική, λιγότερο συχνή, μέθοδος περιλαμβάνει την προς τα κάτω εξόρυξη). Η πρόοδος της εξόρυξης συνδέεται με έναν απόλυτα ελεγχόμενο κύκλο, που περιλαμβάνει τη διαδοχική εκτέλεση των ακόλουθων δραστηριοτήτων:

- a) Τη διάτρηση και την ανατίναξη, στο οποίο ένα τμήμα του πετρώματος, τυπικά περίπου 3m πάχους, αποκολλάται από το μέτωπο της στοάς.
- b) Το ξεσκάρωμα και την υποστήριξη, που αποτελείται από την απομάκρυνση των χαλαρών πετρωμάτων από την οροφή της στοάς και τα τοιχώματα και την τοποθέτηση ελαφριάς υποστήριξης.
- c) Τη φόρτωση μεταλλεύματος και τη μεταφορά, με το μέταλλευμα να μεταφέρεται μηχανικά από το μέτωπο σε ένα λούκι και στη συνέχεια, μέσω της βαρύτητας να φτάνει σε ένα χαμηλότερο οριζόντα μεταφοράς.
- d) Τη λιθογόμωση, όταν ένα στρώμα από κοκκώδες υλικό, πάχους ίσο με αυτό του τμήματος του μεταλλεύματος που αφαιρέθηκε.

Ένα σημαντικό στοιχείο της μεθόδου είναι πως το προσωπικό εργάζεται συνεχώς στο μέτωπο και εκτελεί όλες της παραγωγικές δραστηριότητες κάτω από το στέψη της

στοάς η οποία προχωρεί κατά την εκμετάλλευση. Η επιτυχία της μεθόδου για το λόγο αυτό περιλαμβάνει την επίτευξη αξιόπιστου ελέγχου της απόκρισης του πετρώματος στην άμεση περιφέρεια της περιοχής όπου πραγματοποιούνται μεταλλευτικές εργασίες. Αυτό επιτυγχάνεται με ελεγχόμενη ανατίναξη στη στέψη του μέτωπου, με εφαρμογή μίας ποικιλίας τοπικών υποστηρικτικών και ενισχυτικών τεχνικών στο πέτρωμα και με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο έλεγχο γύρω από το μέτωπο από την χρήση λιθογόμωσης.

Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων εφαρμόζεται σε φλέβες, σε κοιτάσματα με κλίση και σε ογκώδη κοιτάσματα. Στην τελευταία περίπτωση, το μέταλλευμα διαιρείται σε ένα σύνολο υποτμημάτων μεταλλεύματος, που χωρίζονται από κάθετους στύλους, γεωμετρικά κατάλληλα για την εφαρμογή της μεθόδου. Είναι κατάλληλη για κοιτάσματα ή γεωμετρίες στοάς με κλίση εύρους 35°- 90°, και εφαρμόζεται τόσο σε αβαθή όσο και σε βαθιά κοιτάσματα. Τα ανοίγματα – πλάτη στοάς, του σώματος του μεταλλεύματος μπορεί να κυμαίνονται από 4m έως 40m, αν και 10-12m θεωρείται ως ένα λογικό ανώτατο όριο. Η χρήση ενός συστήματος υποστήριξης (λιθογόμωση) καθιστά τη μέθοδο κατάλληλη για βραχόμαζα χαμηλής αντοχής, αλλά απαιτούνται καλύτερες γεωμηχανικές συνθήκες στο μέταλλευμα.

Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων είναι μία μέθοδος σχετικά υψηλής έντασης εργασίας, που απαιτεί υψηλή επί τόπου αξία μεταλλεύματος. Ο βαθμός απόληψης του μεταλλεύματος πρέπει να είναι αρκετά υψηλός για να φιλοξενήσει κάποια αραίωση στο παραγόμενο προϊόν, κάτι που μπορεί να συμβεί όταν το υλικό λιθογόμωσης φορτώνεται με το μέταλλευμα κατά τη μεταφορά του στην επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος παρέχει ευελιξία και εκλεκτικότητα στην εξόρυξη. Αυτό επιτρέπει τον στενό έλεγχο των βαθμίδων παραγωγής, δεδομένου ότι άγονο πέτρωμα μπορεί να παραμείνει ανεκμετάλλευτο ή κατακεραματισμένο, αλλά χωρίς να εξαχθεί από την στοά. Είναι επίσης δυνατό να ακολουθήσει ακανόνιστα όρια κοιτάσματος κατά την εξόρυξη, λόγω του υψηλού βαθμού επιλεκτικότητας που σχετίζεται με τις διαδικασίες διάτρησης και ανατίναξης. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη της μεθόδου των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων σχετίζονται με τη χρήση της λιθογόμωσης. Στο εσωτερικό περιβάλλον του μεταλλείου, ο στενός έλεγχος των μετακινήσεων της βραχόμαζας παρέχει ένα κύκλωμα που δεν υπόκειται σε απώλειες θραυσμένων πετρωμάτων στο κοντινό πεδίο. Ομοίως, η διατήρηση της ακεραιότητας της βραχόμαζας σημαίνει ότι η διαπερατότητα και η υδρογεωλογία του μακρινού πεδίου του μεταλλείου μπορεί να παραμείνουν ανεπηρέαστες από την

εξόρυξη. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, για το εξωτερικό περιβάλλον του μεταλλείου, περιλαμβάνουν περιορισμένη δυνατότητα καθίζησης της επιφάνειας από τις εργασίες εξόρυξης. Μείωση στην επιφανειακή αποθήκευση των εξορυσσόμενων απορρημάτων, προκύπτει από πιθανή αντικατάσταση υψηλού ποσοστού των υλικών αυτών στις στοές εκμετάλλευσης ως υλικό πλήρωσης. Τα τέλματα του εργοστασίου εμπλουτισμού είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για λιθογόμωση, αφού το υλικό μπορεί να μεταφέρεται άμεσα, υπό μορφή πολφού, υδραυλικά στους χώρους εργασίας. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για επιπλέον ανάπτυξη για τη μεταφορά της λιθογόμωσης στα υπόγεια.

Η ποσότητα των μετώπων που αναπτύσσονται με την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων είναι μικρή, συγκριτικά με τα κενά μέτωπα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι η πηγή παραγωγής είναι επίσης και η περιοχή των εργασιών και κάποιες προσπελαστικές στοές μπορεί να αναπτύσσονται καθώς τα μέτωπα προχωρούν. Από την άλλη μεριά, τα στάδια προπαρασκευής μπορούν να συγκριθούν με εκείνα που απαιτούνται για την μέθοδο των κενών μετώπων. Η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων μπορεί να ξεκινήσει αφού ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των επιπέδων μεταφοράς, των στοών προσπέλασης, των εγκάρσιων στοών μεταλλεύματος, των ραμπών λειτουργίας και πρόσβασης και των κυκλωμάτων αερισμού [5].

1.5 Αντικείμενο της Παρούσας Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή και η μελέτη της γεωμηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας που περιβάλλει ένα κοίτασμα του οποίου η εκμετάλλευση πραγματοποιείται με την μέθοδο των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων. Συγκεκριμένα η μελέτη αυτή πραγματοποιείται μέσω προσομοιωτικών μοντέλων στο υπολογιστικό πρόγραμμα Phase2 της Rocscience. Το κοίτασμα πάνω στο οποίο βασίζονται τα μοντέλα προσομοίωσης είναι αυτό των Μαύρων Πετρών στη Βορειοανατολική Χαλκιδική που η εκμετάλλευσή του πραγματοποιείται από την μεταλλευτική εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. Αποτελεί κοίτασμα μικτών θειούχων μεταλλευμάτων μολύβδου, ψευδαργύρου και άργυρου, και βρίσκεται τμηματικά κάτω από τον οικισμό της Στρατονίκης σε ένα βάθος 200 - 300 μέτρων.

Δημιουργήθηκαν συνολικά 12 μοντέλα προσομοίωσης του μεταλλείου των Μαύρων Πετρών που συμπεριλαμβάνουν τη συνολική έκταση του κοιτάσματος και τους γεωλογικούς σχηματισμούς που το περιβάλλουν. Από τον συνολικό αριθμό των μοντέλων, 4 προσομοιώσεις αφορούν την ολοκληρωμένη αλλά και τμηματική εκμετάλλευση του κοιτάσματος με την παρουσία και μη, υποστηρικτικών μέτρων, σύμφωνα με τις υφιστάμενες συνθήκες και τις εργασίες εκμετάλλευσης. Ενώ τα 8 αποτελούν μοντέλα παραμετρικών μεταβολών σε στοιχεία που επηρεάζουν τη συνολική εκμετάλλευση του κοιτάσματος.

Προκειμένου να αναλυθεί η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας που περιβάλλει το κείτασμα και να μελετηθούν αναλυτικά οι μετακινήσεις γύρω από την περιοχή της εξόρυξης πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες πλαστικές τασικές αναλύσεις, αριθμητικής προσομοίωσης των υφιστάμενων συνθηκών της εκμετάλλευσης. Βάσει των αναλύσεων αυτών, γίνεται δυνατή η προσέγγιση του μεγέθους της ενδεχόμενης διαταραχής και των μετακινήσεων που συμβαίνουν στους περιβάλλοντες το κείτασμα σχηματισμούς σε ακτίνα γύρω από αυτό. Τέλος είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς του πληρωτικού υλικού που καλύπτει τα εξορυσσόμενα κενά αντικαθιστώντας το μετάλλευμα.

2 Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης με Γομούμενα

Μέτωπα

2.1 Εισαγωγή

Οι μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης με γομούμενα μέτωπα χαρακτηρίζονται από το ότι ο χώρος που αδειάζει με την απόληψη του μεταλλεύματος γεμίζει με πληρωτικό υλικό, κυρίως με άγονα. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση εφαρμογής συμπυκνωμένου μετώπου, που η γόμωση είναι προσωρινού χαρακτήρα και γίνεται αυτόματα από το μέταλλευμα που εξορύσσεται. Εκτός από αυτή τη περίπτωση, η γόμωση είναι μόνιμη και εκτελείται ως συγκεκριμένη και ανεξάρτητη φάση, προϋποθέτει την αποκομιδή και απόθεση άχρηστου υλικού, για την πλήρωση του κενού, πίσω από τον ελεύθερο χώρο του μετώπου. Με αυτές της συνθήκες οι μέθοδοι με γομούμενα μέτωπα είναι κατά κανόνα, μέθοδοι με υψηλό κόστος παραγωγής. Συνεπώς, η εφαρμογή τους περιορίζεται σε περιπτώσεις πλούσιων μεταλλευμάτων ή εκεί όπου δεν γίνονται αποδεκτές καθιζήσεις στην επιφάνεια, λόγω της παρουσίας επιφανειακών εγκαταστάσεων και οικισμών. Όταν η σαθρότητα του πετρώματος είναι τέτοια ώστε οι διάστασεις των εκσκαφών να είναι υποχρεωτικά πολύ περιορισμένες, επιβάλλεται η λιθογόμωση να ακολουθεί από κοντά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος και έτσι να επηρεάζεται σημαντικά η τιμή του κόστους. Αντιθέτως, όταν η σχετική ανθεκτικότητα των περιβαλλόντων πετρωμάτων και του μεταλλεύματος επιτρέπει την ύπαρξη και τη διατήρηση μεγάλων σχετικά κενών για κάποιο χρονικό διάστημα, τότε μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να γίνουν συνδυασμοί που επηρεάζουν ευνοϊκά το κόστος. Παράλληλα, εάν τέτοιες συνθήκες συμβαδίζουν με την περίπτωση που η ίδια η εξόρυξη από την μία και η προπαρασκευή από την άλλη δύναται να παρέχουν σημαντικές ποσότητες αγόνων, τότε η τιμή μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η προσκόμιση των στείρων που χρησιμοποιούνται για την γόμωση γίνεται, σχεδόν πάντα, από την πάνω στοά προσπέλασης και η τοποθέτησή τους μέσα στο κενό γίνεται είτε με την βαρύτητα, είτε με χειρωνακτική εργασία. Σε περίπτωση όμως, που η γόμωση απαιτείται να είναι εκτεταμένη και γρήγορη, η μεταφορά και η απόθεση του πληρωτικού υλικού γίνεται υδραυλικά ή πνευματικά [3].

2.2 Μέθοδος των Ξύλινων Πρισματικών Πλαισίων

2.2.1 Γενικά

Η ξύλινη υποστήριξη των μεταλλευτικών εργασιών εξακολουθεί και σήμερα ακόμα να αποτελεί ένα αποτελεσματικό σύστημα υποστήριξης, λόγω της ευέλικτης προσαρμογής της σε οποιοδήποτε τύπου υπόγειο άνοιγμα και της εύκολης εγκατάστασής της. Η ξύλινη υποστήριξη, ως βασικός τύπος υποστήριξης, αντικαταστάθηκε σταδιακά από την ήλωση και τη λιθογόμωση. Όμως, το πλήθος των παραλλαγών εφαρμογής ξύλινης υποστήριξης που μπορούν να προσαρμοστούν με επιτυχία σε όλες τις μεθόδους εκμετάλλευσης, απέδειξαν την αξιοπιστία τους εδώ και πολλά χρόνια. Στις σύγχρονες εκμεταλλεύσεις, η ξυλεία εξακολουθεί να παίζει σημαντικό ρόλο ως αποτελεσματικό μέσο υποστήριξης. Για παράδειγμα στα μεταλλικά πλαίσια ως μέσο υποστήριξης η ξυλοδεσμία αποτελεί σημαντικό στοιχείο της μεθόδου καθώς συμβάλλει στην καλύτερη επαφή των πλαισίων με το πέτρωμα στην οροφή και τα τοιχώματα.

2.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ξύλινης Υποστήριξης

Η ξυλεία, όταν χρησιμοποιείται ως μέρος του συνολικού συστήματος υποστήριξης χαρακτηρίζεται από μοναδικές δυνατότητες υποστήριξης, οι οποίες δεν περιορίζονται μόνο στην προστασία από καταπτώσεις πετρωμάτων, αλλά προσδίδουν και ένα σχετικά ασφαλές περιβάλλον εργασίας στα μέτωπα εκμετάλλευσης, ακόμη και στις δυσκολότερες συνθήκες πετρώματος.

Για την τοποθέτηση της ξύλινης υποστήριξης δεν απαιτείται η διάθεση αρχικού κεφαλαίου αγοράς εξοπλισμού κατεργασίας της ξυλείας. Παρόλα αυτά, σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν το υψηλό κόστος της ξυλείας, οι ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις σε καλά ειδικευμένο εργατικό προσωπικό για την τοποθέτηση της και ο κίνδυνος πυρκαγιάς, λόγω του εύφλεκτου χαρακτήρα της [3].

2.3 Μέθοδος των Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων

2.3.1 Χαρακτηριστικά Συστήματος και Σφαίρα Εφαρμογής

Το κύριο διακριτικό χαρακτηριστικό των συστημάτων κοπής και λιθογόμωσης είναι η πλήρωση του εξορυσσόμενου χώρου με πληρωτικό υλικό, καθώς προχωράει η εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Η γόμωση συμπεριλαμβάνεται στον κύκλο εργασιών της εκμετάλλευσης.

Τα συστήματα κοπών και λιθογομώσεων πρέπει να διαφοροποιούνται από τα συστήματα με την μετέπειτα πλήρωση των θαλάμων. Η μετέπειτα πλήρωση της εξορυσσόμενης περιοχής χρησιμοποιείται σε ανοιχτά μέτωπα, σε συστολικά και σε συνδυαστικά συστήματα εξόρυξης. Προορίζεται για να αποκλείει τις μετακινήσεις της βραχώμαζας μετά από την εξόρυξη του μεταλλεύματος και μερικές φορές για να παρέχει ευνοϊκές συνθήκες για την απόληψη των στήλων που αφήνονται ως μέτρο υποστήριξης. Στην τελευταία περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα σκληρό υλικό πλήρωσης, το οποίο ελαχιστοποιεί τις απώλειες του κοιτάσματος στην διάρρηξη. Τα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης εξασφαλίζουν υψηλό βαθμό απόληψης, ασφάλεια εργασίας κάτω από δύσκολες γεωλογικές συνθήκες, αποκλείουν την αυτοανάφλεξη του μεταλλεύματος και όταν γίνεται εξόρυξη κοιτάσματος σε μεγάλο βάθος, παρουσιάζουν ένα αποτελεσματικό μέσο για την υποστήριξη του πετρώματος. Η χρήση αυτοκινούμενου εξοπλισμού, φθηνών πληρωτικών υλικών και υδραυλικών σωληνώσεων αυξάνει δραστικά την αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών.

Το σύνολο των συστημάτων κοπής και λιθογόμωσης διαφέρουν ως προς την κατεύθυνση της στοάς, τη μέθοδο απόκτησης του υλικού λιθογόμωσης και το σχήμα (γεωμετρία) της στοάς. Με βάση τα παράπανω χαρακτηριστικά έχουν διακριθεί τα ακόλουθα συστήματα:

1. Συστήματα οριζόντιας κοπής με λιθογόμωση.
2. Συστήματα κεκλιμένης κοπής με λιθογόμωση.
3. Συστήματα για εξόρυξη λεπτών κοιτασμάτων με ξεχωριστά μέτωπα και λιθογόμωση.
4. Συστήματα κοπής με κατερχόμενη φορά με λιθογόμωση.
5. Συστήματα επιμήκους ευθύγραμμου μετώπου με λιθογόμωση.

Οι τυπικές συνθήκες για την χρήση των μεθόδων κοπής και λιθογόμωσης περιλαμβάνουν:

1. Μικρού πάχους σώματα μεταλλεύματος, από αρκετά εκατοστά έως 6 m ή περισσότερα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι για να πληρωθεί ένα μικρό μέτωπο η απαιτούμενη ποσότητα πληρωτικού υλικού μπορεί να αποκτηθεί με την δημιουργία μόνιμων και λειτουργία ανάπτυξης, καθώς και με παράλληλη κοπή των τοιχωμάτων στη περιοχή του μετώπου. Επιπροσθέτως, λεπτά κοιτάσματα με ασταθή περιβάλλοντα πετρώματα, δεν είναι δυνατόν να

εξορυχθούν με άλλη μέθοδο από εκείνης της κοπής και λιθογόμωσης, ενώ κοιτάσματα μεγάλου πάχους στις ίδιες συνθήκες μπορούν να εξορυχθούν με συστήματα κατακρήμνισης και συγκεκριμένα με τεχνικές κοπής κατακρήμνισης. Τα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης χρησιμοποιούνται σε παχιά κοιτάσματα έτσι ώστε να αποκλείονται οι μετακινήσεις των υπερκειμένων ή στην επιφάνεια της γης.

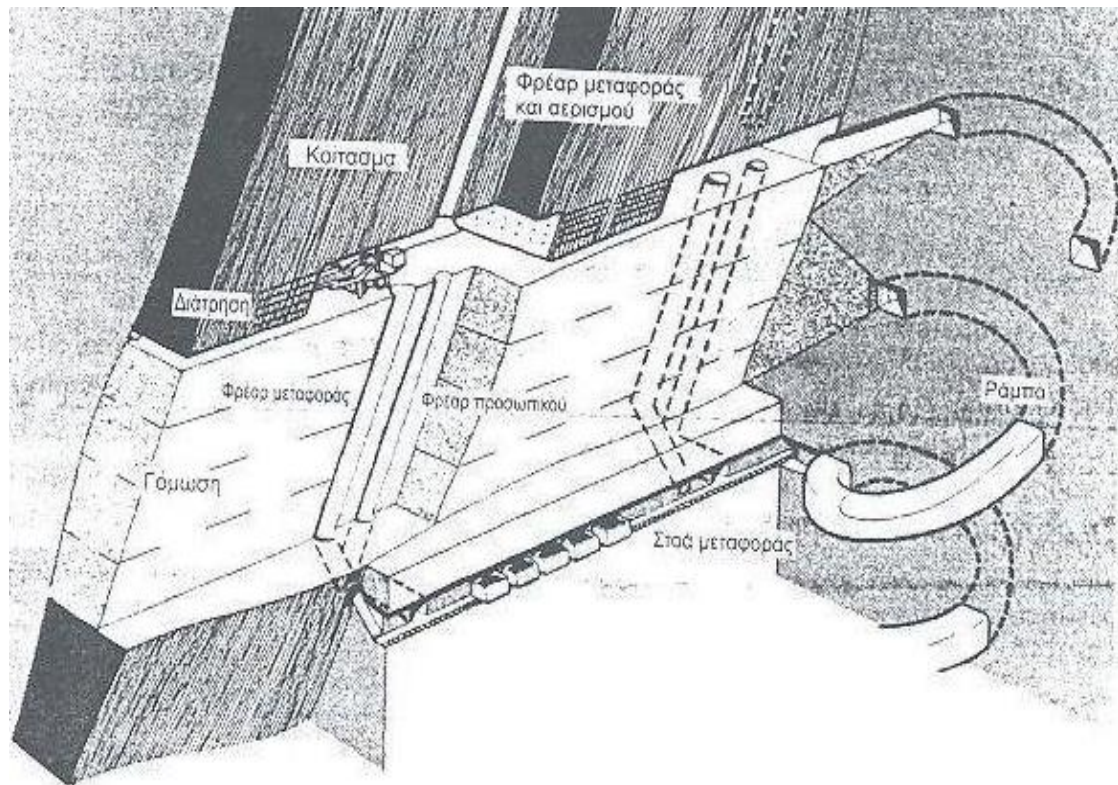
2. Απότομες βυθίσεις σωμάτων μεταλλεύματος. Η επίπεδη βύθιση περιπλέκει τη διευθέτηση της πλήρωσης στην περιοχή του μετώπου και για αυτό τα συστήματα κοπής και λιθογόμωσης χρησιμοποιούνται σπάνια σε επίπεδα βυθισμένα μεταλλεύματα.
3. Ευσταθή μεταλλεύματα. Όταν χρησιμοποιείται κανονική ξυλεία η μέθοδος σχετίζεται με τη κατηγορία μεθόδων υποστήριξης και λιθογόμωσης.
4. Ασταθές περιβάλλον πέτρωμα, κατά κανόνα. Ανθεκτικά μεταλλεύματα σε σταθερό περιβάλλον πέτρωμα μπορούν να εξορύσσονται με μεθόδους πιο παραγωγικές όπως κενού μετώπου και συμπτυσσόμενου μετώπου. Παρόλα αυτά η ευστάθεια των τοιχωμάτων δεν επηρεάζει την επιλογή των μεθόδων κοπής και λιθογόμωσης εάν η χρήση τους κρίνεται ως αναγκαία από παράγοντες όπως, η ανάγκη να υπονομευτούν τα τοιχώματα, μεγάλες ποσότητες εγκλεισμάτων ή άγονων πετρωμάτων στο κύριο σώμα του μεταλλεύματος και αποτροπή των μετακινήσεων στο περιβάλλον πέτρωμα.
5. Μεγάλη οικονομική αξία μεταλλεύματος που να υπερκαλύπτει το υψηλό κόστους της παραγωγής.

Διάφορες παραλλαγές του συστήματος χρησιμοποιούνται για διαφορετικά σχήματα και εμφανίσεις του σώματος του μεταλλεύματος. Μερικές από αυτές τις μεθόδους, για παράδειγμα συστήματα κεκλιμένων κοπών δεν δύναται να εφαρμοστούν εάν το πάχος του σώματος του μεταλλεύματος ποικίλλει απότομα, υπάρχουν τοπικές επιπεδοποιήσεις, τεκτονικές διαταραχές, μεγάλα εγκλείσματα και συγκροτήματα από άγονο πέτρωμα. Από την άλλη μεριά, συστήματα οριζόντιας κοπής είναι πολύ πρακτικά κάτω από τις συνθήκες που αναφέρονται παραπάνω. Οι περισσότερες από τις παραλλαγές του συστήματος κοπής και λιθογόμωσης επιτρέπουν το διαχωρισμό του άγονου πετρώματος σπασμένο από κοινού με το μέταλλευμα έτσι ώστε να μείνει το προηγούμενο στη περιοχή του μετώπου. Το μέταλλευμα μπορεί να σπαστεί ξεχωριστά από το άγονο πέτρωμα. Τα συστήματα αυτά μερικές φορές χρησιμοποιούνται σε

κοιτάσματα σιδηροπυρίτη, αφού οι μέθοδοι κατακρήμνισης είναι πιο επικίνδυνες για πυρκαγιές.

Η μέθοδος των εναλλασόμενων κοπών και λιθογομόσεων ήταν ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος εκμετάλλευσης για υπόγεια μεταλλεία. Για μια περίοδο η μέθοδος αυτή αντικαταστήθηκε, σε μεγάλη κλίμακα από την μέθοδο των κενών μετώπων. Η επαναχρησιμοποίησή της έλαβε χώρα, όταν πολλά μεταλλεία έφτασαν σε μεγάλα βάθη απαιτώντας μεγάλα ανοικτά κενά να παραμένουν έτσι για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης δεδομένης της απαίτησης για υψηλές περιεκτικότητες μεταλλεύματος, η μέθοδος των κενών μετώπων αποδείχθηκε ανεπιτυχής, εξαιτίας της υπερβολικής πρόσμιξης στείρων με το μέταλλευμα.

Είναι μία πολύ ευέλικτη και εύκολα προσαρμόσιμη μέθοδος για κάθε τύπο κοιτάσματος. Η τυπική εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει την αφαίρεση μιας στρώσης πάχους 2.4 - 3.0m από την κορυφή και καθώς το μέταλλευμα πέφτει στο δάπεδο, γίνεται επένδυση και κοχλίωση. Μετά την ασφάλιση της οροφής το σπασμένο μέταλλευμα απομακρύνεται μέσα από δίοδους προς το κατώτερο επίπεδο. Μετά την απομάκρυνση του μεταλλεύματος οι δίοδοι του μεταλλεύματος επεκτείνονται προς τα επάνω κατά ύψος του μεταλλεύματος που μετακινήθηκε και το μέτωπο γεμίζει με λιθογόμωση, για να αρχίσει νέος κύκλος εξόρυξης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται καλύτερα σε έντονα βυθιζόμενα κοιτάσματα με σημαντική κατακόρυφη έκταση ή σε περιοχές μεταλλεύματος που απαιτούν εκλεκτική εκμετάλλευση ή σε περιοχές μεταλλεύματος που επικρατούν συνθήκες χαμηλής αντοχής περιβαλλόντων πετρωμάτων ή σε κοιτάσματα που έχουν αξία μεταλλεύματος ικανή να αντισταθμίσει το υψηλό κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου εκμετάλλευσης [4].



Σχήμα 6. Τυπική διαμόρφωση της εκμετάλλευσης με εναλλασσόμενες κοπές και λιθογομώσεις.

2.3.2 Πεδίο Εφαρμογής

Η μέθοδος μπορεί να υιοθετηθεί για όλους σχεδόν τους τύπους των κοιτασμάτων με μια σχετικά μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη. Το κοίτασμα πρέπει να επιτρέπει την ταυτόχρονη προσπέλαση από την οροφή και το δάπεδο, καθώς και από κανονικά ενδιάμεσα διαστήματα κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση. Παρά το γεγονός ότι προσαρμόζεται στα περισσότερα κοιτάσματα, η μέθοδος εφαρμόζεται καλύτερα εκεί όπου το μέταλλευμα έχει συνέχεια και εκεί όπου οι περισσότεροι τύποι μαζικής εξόρυξης θα προκαλούσαν υπερβολική πρόσμιξη στείρων. Σε περιοχές συχνής διακοπής της μεταλλοφορίας, η δυνατότητα συνεχούς και εκτεταμένης δειγματοληψίας κατά την εξόρυξη κάθε κύκλου, καθιστά τη μέθοδο αυτή πολύ πρόσφορη. Η δυνατότητα αυτή ελαχιστοποιεί την απαίτηση για αρχική δειγματοληψία πριν από την έναρξη της παραγωγής. Το χρησιμοποιούμενο σύστημα αποκόμισης επιτρέπει την αλλαγή του μεγέθους και του σχήματος του μετώπου σύμφωνα με τις απαιτήσεις που καθορίζει η δειγματοληψία. Προφανώς το μοναδικό χαρακτηριστικό που απαιτείται να παρουσιάζει το μέταλλευμα είναι η επαρκής αντοχή, ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξή του από την κοχλίωση κατά τους κύκλους της εξόρυξης και λιθογόμωσης.

Οι παράγοντες που αποδίδουν προϊόν με ελάχιστη πρόσμιξη σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο ανοιχτών μετώπων είναι ο καλός σχεδιασμός, η συστηματική δειγματοληψία και η προσεκτική επίβλεψη.

Συνοψίζοντας, οι προϋποθέσεις πλεονεκτικής εφαρμογής της μεθόδου έχουν ως εξής:

1. Ανθεκτικότητα του μεταλλεύματος από μεγάλη εώς μέτρια. Στα σχετικά σαθρά μεταλλεύματα απαιτείται πυκνή υποστύλωση της οροφής του μετώπου, που δυσχεραίνει σημαντικά την εργασία.
2. Οποιαδήποτε σύσταση του μεταλλεύματος. Διαχωρίζονται εύκολα παρεμβολές στείρων, με διαλογή των αγόνων που αξιοποιούνται για τη λιθογόμωση. Ο διαχωρισμός διαφόρων ποιοτήτων μεταλλεύματος είναι επίσης εύκολος.
3. Μετάλλευμα μεγάλης αξίας. Η απόληψη που επιτυγχάνεται είναι σχεδόν πλήρης και συνεπώς οι απώλειες είναι ασήμαντες.
4. Οποιαδήποτε ανθεκτικότητα των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Τα ασθενή περιβάλλοντα πετρώματα προκαλούν πρόσμιξη στείρων, που ως συνέπεια απαιτεί διαλογή.
5. Αδιακρίτως ανώμαλα ή κανονικά περιβάλλοντα πετρώματα. Η ασάφεια μεταξύ μεταλλεύματος και περιβαλλόντων πετρωμάτων αντιμετωπίζεται επίσης με ευχέρεια.
6. Πάχος κοιτάσματος από 0.8 μέχρι 10 ή περισσότερα μέτρα.
7. Ελάχιστη κλίση 45°. Με κλίση κατώτερη από αυτή, η κάθοδος του μεταλλεύματος μέσα από τα φρέατα απαγωγής δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί.

Με τις παραπάνω συνθήκες, το κατεξοχήν πεδίο εφαρμογής είναι τα φλεβοειδή ή στρωματοειδή κοιτάσματα μεγάλης κλίσης με μεταλλεύματα ικανοποιητικής ανθεκτικότητας, έτσι ώστε η απαιτούμενη υποστήριξη της οροφής του μετώπου εξόρυξης να περιορίζεται σε σχετικά μικρό αριθμό στύλων από στρογγυλή ξυλεία, που στηρίζονται πάνω στη λιθογόμωση.

2.3.3 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Κατερχόμενη Φορά

Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά κατερχόμενη φορά, υπό συνθήκες διευρυνόμενου μετώπου κατά την οπισθοχώρηση (underhand cut and fill

with longhole stripping on retreat) αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρεία Inco Ltd για την εκμετάλλευση νικελιούχων κοιτασμάτων στην περιοχή του Sudbury, Canada τη δεκαετία του '50 και στη συνέχεια εφαρμόστηκε, με συνεχείς βελτιώσεις και παραλλαγές, από μεγάλες μεταλλευτικές εταιρείες όπως από την Homestake Mining Co για την εκμετάλλευση κοιτάσματος μολύβδου – αργύρου στο Colorado, USA, την Magma Copper Co για την εκμετάλλευση κοιτάσματος αργύρου – χαλκού στην Arizona, USA, την Falconbridge Nickel Mines Ltd για την εκμετάλλευση κοιτάσματος νικελίου, στο Sudbury, Canada, και την Boliden Co για την εκμετάλλευση κοιτάσματος χαλκού, ψευδαργύρου, μολύβδου, αργύρου και χρυσού στο μεταλλείο Kristineberg, Sweden.

Η μέθοδος αποτελεί κατά κοινή παραδοχή μία από τις πλέον ασφαλείς αλλά και δαπανηρές μεθόδους εκμετάλλευσης, που σπάνια εφαρμόζεται σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις, εκτός αν οι γεωλογικές συνθήκες ή άλλοι παράγοντες και περιορισμοί όπως αυξημένη ευαισθησία λόγω κατοικημένης περιοχής, εκμετάλλευση υπό υφιστάμενες λίμνες, θάλασσες κλπ. επιβάλλουν την εφαρμογή της, για να αποφευχθούν διαταράξεις των υπερκειμένων του κοιτάσματος πετρωμάτων, επιφανειακές καθιζήσεις. Σύμφωνα με την εν λόγω μέθοδο, τα κενά που δημιουργούνται από την εξόρυξη του μεταλλεύματος πληρούνται υδραυλικά με υλικό που αποτελεί μίγμα από τέλμα εμπλουτισμού, τσιμέντο και νερό. Το υλικό αυτό, μετά από επαρκή ανάμιξη μεταφέρεται υδραυλικά στα εξορυσσόμενα και έτοιμα για λιθογόμωση μέτωπα. Η γόμωση των στοών γίνεται υδραυλικά μέσω δικτύου μεταλλικών αγωγών.

Η μέθοδος εναλλασσομένων κοπών με λιθογόμωση είναι ευέλικτη προσαρμόζεται ευχερώς στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοιτάσματος και είναι ιδιαίτερα ασφαλής για περιοχές όπου το μετάλλευμα ή και τα περιβάλλοντα πετρώματα είναι μέτριας ή χαμηλής αντοχής ή ακόμα υφίστανται αυξημένες απαιτήσεις ελαχιστοποίησης της διατάραξης της περιβάλλουσας του κοιτάσματος βραχώμαζας. Με τη μέθοδο αυτή εξασφαλίζονται ασφαλείς συνθήκες εργασίας στις υπόγειες εγκαταστάσεις και ταυτόχρονα μέγιστη προστασία του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή της μεθόδου λιθογόμωσης διασφαλίζεται:

- Διατήρηση της σταθερότητας των πετρωμάτων, που υπέρκειται της μεταλλοφορίας και αποφυγή καθιζήσεων ή ρωγματώσεών τους.

- Περιορισμός στο ελάχιστο των ανακατανομών των τάσεων στα περιβάλλοντα πετρώματα.
- Ελαχιστοποίηση της ποσότητας του αέρα που κυκλοφορεί στις εξοφλημένες περιοχές του μεταλλείου.
- Αποφυγή της κατεΐσδυσης επιφανειακών νερών στο χώρο της εκμετάλλευσης και της επαφής τους με το μη απολαμβανόμενο μέταλλευμα (απώλειες εκμετάλλευσης).
- Περιορισμός στο ελάχιστο των κινήσεων των υπογείων υδάτων και της αποστράγγισής τους.
- Αποφυγή δημιουργίας συνθηκών οξειδωσης του μη απολαμβανομένου μεταλλεύματος (απώλειες εκμετάλλευσης) και κατά συνέπεια αποφυγή της υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών του μεταλλείου λόγω του φαινομένου της όξινης απορροής.
- Υψηλές ανακτήσεις 90 έως 95% σε εξορυσσόμενο μέταλλευμα, με πολύ χαμηλή αραίωση με στείρο υλικό 10%.
- Λόγω της χαμηλής αραίωσης του μεταλλεύματος, περιορίζεται η ποσότητα των στερεών καταλοίπων, που παράγονται στη συνέχεια, υπό μορφή τελμάτων, κατά την επεξεργασία - εμπλουτισμού του μεταλλεύματος.
- Τα δημιουργούμενα κενά από την εξόρυξη του μεταλλεύματος πληρούνται με ένα συνεκτικό αδρανές υλικό που αποτελείται από τέλμα εμπλουτισμού, τσιμέντο και νερό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το μεγαλύτερο μέρος των αδρομερών τελμάτων που προέρχονται από τον εμπλουτισμό της τρέχουσας παραγωγής του μεταλλεύματος ανακυκλώνεται στα υπόγεια έργα ως συστατικό του υλικού λιθογόμωσης, μειώνοντας έτσι τις ανάγκες της δραστηριότητας σε χώρους επιφανειακής απόθεσης τελμάτων εμπλουτισμού.

Σημαντικό μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου εκμετάλλευσης αποτελεί, το συγκριτικά με άλλες μεθόδους εκμετάλλευσης υψηλό κόστος ανά τόνο εξορυσσομένου μεταλλεύματος σε σχέση προς τις τιμές των παραγόμενων προϊόντων. Ο σχετικός περιορισμός του αυξημένου κόστους κατά την εφαρμογή της μεθόδου εκμετάλλευσης με λιθογόμωση επιτυγχάνεται σήμερα με την πλήρη μηχανοποίηση των επί μέρους φάσεων εκμετάλλευσης [3].

2.3.4 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων κατά Ανερχόμενη Φορά

Η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη φορά υπό συνθήκες συνήθων διαστάσεων στοάς, χρησιμοποιείται στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών, στοιχεία για το οποίο παραθέτονται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η εν λόγω μέθοδος εκμετάλλευσης υπερτερεί έναντι όλων των άλλων μεθόδων εκμετάλλευσης με λιθογόμωση από απόψεως προστασίας του περιβάλλοντος καθότι εκτός από τα πλεονεκτήματα των γενικών αρχών των μεθόδων λιθογόμωσης, τα οποία περιλαμβάνουν:

1. Διατήρηση της σταθερότητας, και αποφυγή των καθιζήσεων ή ρωγματώσεων των πετρωμάτων που υπέρκεινται του μεταλλεύματος.
2. Περιορισμό στο ελάχιστο των ανακατανομών των τάσεων στα πετρώματα που περιβάλλουν τη μεταλλοφορία.
3. Ελαχιστοποίηση της ποσότητας του αέρα που κυκλοφορεί στις εξοφλημένες περιοχές του μεταλλείου.
4. Αποφυγή της κατεΐσδυσης επιφανειακών νερών στο χώρο της εκμετάλλευσης και της επαφής τους με το μη απολαμβανόμενο μέταλλευμα.
5. Περιορισμό των κινήσεων των υπογείων υδάτων και της αποστράγγισής τους.
6. Αποφυγή δημιουργίας συνθηκών οξειδωσης του μη απολαμβανομένου μεταλλεύματος και κατά συνέπεια αποφυγή της υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών του μεταλλείου λόγω του φαινομένου της όξινης απορροής.
7. Περιορισμό της ποσότητας των στερεών καταλοίπων που παράγονται κατά τη διεργασίες εμπλουτισμού του μεταλλεύματος.
8. Αξιοποίηση των τελμάτων που προέρχονται από τον εμπλουτισμό του μεταλλεύματος με ανακύκλωσή του στα υπόγεια έργα ως κύριο συστατικό του σώματος της λιθογόμωσης.

Επίσης, παρουσιάζει και μία σειρά από επιπρόσθετα θετικά χαρακτηριστικά μεταξύ των οποίων αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Λόγω της αλληλουχίας εκτέλεσης των εργασιών όρυξης των στοών εκμετάλλευσης, απαιτείται άμεση πλήρωση των κενών με υλικό λιθογόμωσης, προκειμένου να διαμορφωθεί το δάπεδο εργασίας για το μηχανικό εξοπλισμό

εξόρυξης του μεταλλεύματος από τον αμέσως ανώτερο υψομετρικά όροφο. Ως αποτέλεσμα, λόγω της παραγωγικής διαδικασίας δεν μπορούν να διατηρηθούν τα ανοίγματα της εκμετάλλευσης χωρίς λιθογόμωση για μεγάλο χρονικό διάστημα καθότι δεν δύναται να συνεχισθεί η εκμετάλλευση του επόμενου υπερκείμενου ορόφου.

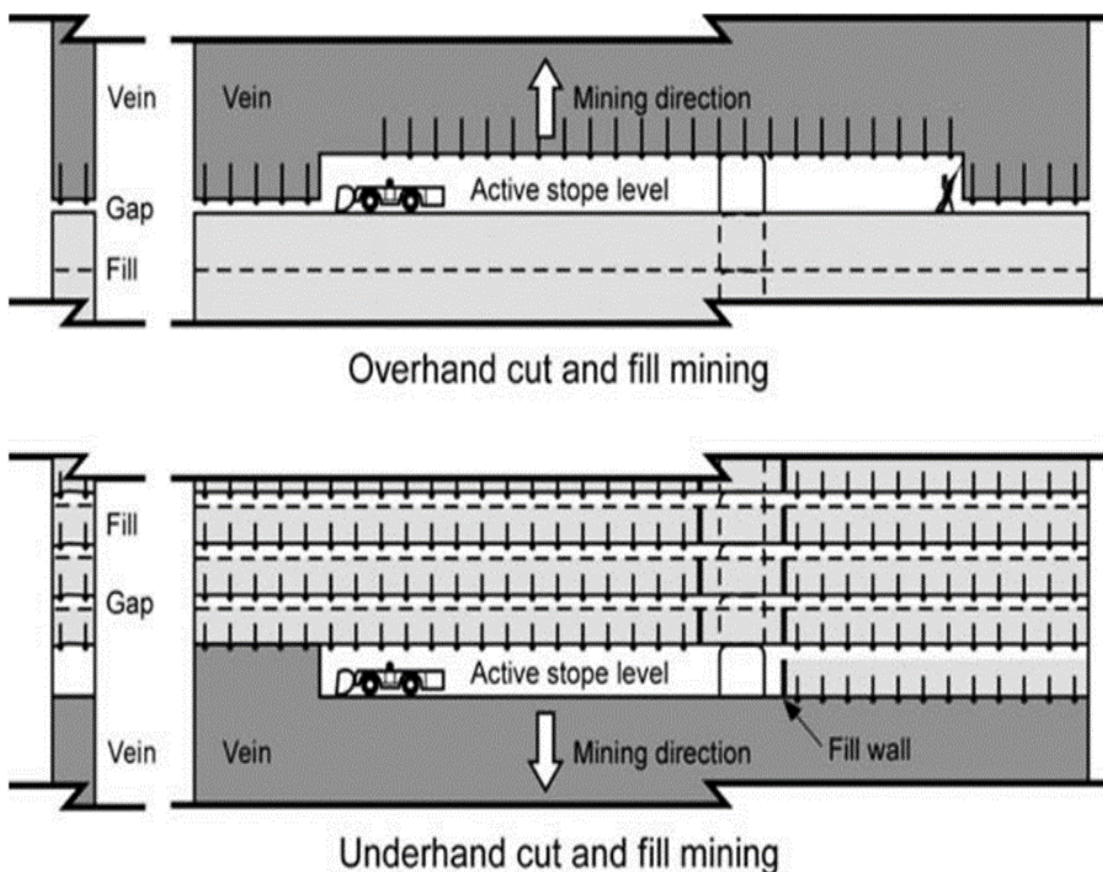
- Λόγω του σχεδιασμού της μεθόδου, επιτυγχάνεται απόλυτη ποσοτική (100%) πλήρωση των κενών της εκμετάλλευσης με υλικό λιθογόμωσης, το οποίο αποτελεί στη συνέχεια το δάπεδο εργασίας για την απόληψη του μεταλλεύματος του υψομετρικά ανώτερου ορόφου.
- Λόγω της μείωσης των διαστάσεων των θαλάμων εκμετάλλευσης (συνθήκες συνήθων διαστάσεων στοάς), μειώνεται δραστικά η πιθανότητα κατάρρευσης του κενού που δημιουργείται από την εξόρυξη του μεταλλεύματος. Λόγω των μικρών διαστάσεων των θαλάμων εκμετάλλευσης βελτιώνονται σημαντικά οι συνθήκες φυσικής ευστάθειας των θαλάμων αυτών και μειώνεται η ανάπτυξη της «άτονης» ζώνης υπεράνω των ανοιγμάτων και οι συγκλίσεις αυτών. Παράλληλα, διασφαλίζεται ομαλότερη τασική αναδιανομή γύρω από την υπόγεια εκσκαφή με αποτέλεσμα τη δραστική μείωση φαινομένων υπερφόρτισης της βραχώμαζας λόγω συγκέντρωσης τάσεων.

2.3.5 Διαφορές Μεθόδων

Η ανάπτυξη της ανερχόμενης μεθόδου εναλλασσομένων κοπών και λιθογομώσεων υπό συνθήκες συνήθων διαστάσεων στοάς είναι αντίστοιχη της κατερχόμενης αλλά με τις παρακάτω διαφορές:

1. Η γενική φορά απόληψης των ορόφων εκμετάλλευσης γίνεται από τους χαμηλότερους προς τους ανώτερους υψομετρικά ορόφους.
2. Εκτός από το χαμηλότερο υψομετρικά όροφο από τον οποίο θα εκκινήσει η εκμετάλλευση, στους υπερκείμενους ορόφους το μέταλλευμα θα εξορύσσεται υπό ευνοϊκότερες συνθήκες, λόγω της ύπαρξης μίας επιπλέον ελεύθερης επιφάνειας.
3. Χάρη στην αλληλουχία εκτέλεσης των εργασιών στην εν λόγω μέθοδο, το υλικό λιθογόμωσης πληρώνει το 100% του κενού χώρου που δημιουργείται από την εξόρυξη του μεταλλεύματος, σε αντίθεση με το 82,5% του κενού χώρου που εκτιμάται να πληρώνεται στη μέθοδο κατά κατερχόμενη φορά.

4. Η πλήρης λιθογόμωση του εξοφλημένου ορόφου γίνεται από τη στοά περιχάραξης του υπερκείμενου ορόφου με χρήση κατάλληλου πολφού λιθογόμωσης. Μετά από την πάροδο εύλογου χρονικού διαστήματος από την ολοκλήρωση της λιθογόμωσης, ο οποίος απαιτείται για να στερεοποιηθεί το υλικό λιθογόμωσης, το υλικό αυτό αποτελεί το δάπεδο πάνω στο οποίο θα εργασθεί και θα κινηθεί ο μηχανικός εξοπλισμός για την εκμετάλλευση του μεταλλεύματος από τον υπερκείμενο όροφο.



Σχήμα 7. Μέθοδοι εκμετάλλευσης εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη και κατερχόμενη φορά.

2.3.6 Σχεδιασμός Εκμετάλλευσης

Εφόσον έχει αποφασιστεί ότι η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων είναι αποτελεσματικότερη για την εκμετάλλευση συγκεκριμένου κοιτάσματος, πρέπει στη συνέχεια να εκτιμηθεί η δυνατότητα εξασφάλισης υλικού λιθογόμωσης χαμηλού κόστους, καθώς και η επιλογή ενός αποτελεσματικού συστήματος για την μεταφορά του υλικού. Παρόλο που το υδραυλικά μεταφερόμενο

απόρριμα των εγκαταστάσεων εμπλουτισμού είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό, αυτό δεν είναι πάντα πρακτικό λόγω της θέσης της εγκατάστασης ή και της ποιότητας του απορρίματος. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί αν χρησιμοποιηθεί η λιθογόμωση σε ξηρή μορφή. Ο τύπος του υλικού λιθογόμωσης και ο τύπος του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί για την απόθεσή του, θα καθοριστούν από το εάν απαιτείται ένα δάπεδο ή ένα κάλυμμα για να περιοριστεί στο ελάχιστο η πρόσμιξη στείρου κατά την αποκόμιση του μεταλλεύματος.

Η έγκαιρη επιλογή του μηχανικού εξοπλισμού είναι σημαντική, καθώς ο εξοπλισμός καθορίζει συνήθως το ύψος του έργου ανάπτυξης που απαιτείται για να φθάσει ένα μέτωπο σε παραγωγή και το μέγεθος των ανοιγμάτων που αυτό απαιτεί. Οι διαστάσεις και η συνέχεια της μεταλλοφορίας καθορίζει συνήθως τον τύπο του εξοπλισμού φόρτωσης. Η χρήση δεσμευμένου εξοπλισμού μέσα στα μέτωπα μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα απαιτούμενα έργα ανάπτυξης. Εάν η συνέχεια του κοιτάσματος είναι τέτοια ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα ράμπας για την κυκλοφορία του εξοπλισμού, το κόστος ανάπτυξης θα αυξηθεί αλλά η επίτευξη συνεχούς εξόρυξης θα ελαχιστοποιήσει την κυκλική φύση της παραγωγής.

Το ύψος του τμήματος εκμετάλλευσης εξαρτάται συνήθως από την αντοχή του τοιχώματος του κοιτάσματος και από τον αριθμό των κοχλιώσεων που απαιτούνται. Αφού καθοριστούν τα προηγούμενα μεγέθη, πρέπει να γίνει η επιλογή του κατάλληλου διατηρητικού εξοπλισμού. Ο αριθμός και το μέγεθος των διόδων του μεταλλεύματος εξαρτάται από τον τύπο και το μέγεθος του εξοπλισμού παραγωγής που έχει επιλεγεί καθώς και τον τύπο του υλικού της λιθογόμωσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Οι εργαζόμενοι πραγματοποιούν όλες τις εργασίες μέσα στο μέτωπο και είναι αναγκαία η πρόβλεψη για αποτελεσματικό αερισμό [3].

2.3.7 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων είναι αυτά που ακολουθούν:

1. Υψηλός βαθμός απόληψης του μεταλλεύματος, συνήθως άνω του 95%.
2. Συνεχής και εκτεταμένη δειγματοληψία του όγκου του μεταλλεύματος καθώς αυτό εξορύσσεται.

3. Ελάχιστη ανάπτυξη πριν από την έναρξη της εκμετάλλευσης.
4. Εκλεκτική εκμετάλλευση, που μπορεί να εφαρμοστεί για την μείωση της πρόσμιξης στείρων.
5. Μεγάλη προσαρμοστικότητα που καθιστά δυνατή την εκμετάλλευση σε έντονα βυθιζόμενα κοιτάσματα.
6. Μικρά ανοίγματα που ελαχιστοποιούν την πρόσμιξη και τα τοιχώματα.
7. Άμεση μετάβαση σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο εκμετάλλευσης.
8. Σχετικά μικρό κόστος επένδυσης σε μηχανικό εξοπλισμό.
9. Ελάχιστη διατάραξη της ισορροπίας του πετρώματος της οροφής και περιορισμός των καθιζήσεων στο ελάχιστο.
10. Υψηλή παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του κοιτάσματος.

Τα παραπάνω αντισταθμίζονται από τα εξής μειονεκτήματα:

1. Κυκλική παραγωγή του μεταλλεύματος.
2. Προϋποθέτει εργασία μεγάλης έντασης και εξειδικευμένο προσωπικό.
3. Μικρές εκτάσεις μηχανοποίηση, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.
4. Το προσωπικό πρέπει να εργάζεται σε πρόσφατα ανατιναγμένο και διαταραγμένο πέτρωμα, με κάποια προβλήματα ασφάλειας.
5. Υψηλό κόστος παραγωγής, που αντισταθμίζεται μόνο από υψηλής αξίας μέταλλευμα.
6. Απαιτείται υψηλός βαθμός ελέγχου της οροφής.
7. Ο αερισμός είναι δύσκολος και δαπανηρός [3].

2.4 Μέθοδοι Λιθογόμωσης

2.4.1 Σχεδιασμός Λιθογόμωσης Μεταλλείου

Ο σχεδιασμός του υλικού λιθογόμωσης για διαδικασίες στο μέτωπο πρέπει να εξετάζει δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, η επί τόπου πληρωτική μάζα πρέπει να πληρεί διάφορα κριτήρια για αυτό-υποστήριξη όπως κάθετα ή οριζόντια ανοίγματα για να επιτραπεί η εκσκαφή παρακείμενων πετρωμάτων. Δεύτερον, πρέπει να υπολογίζεται ο ρόλος της λιθογόμωσης ως ένα λειτουργικό, δομικό στοιχείο μέσα στο μεταλλείο. Είναι δυνατό να σχεδιαστεί λιθογόμωση για να εξυπηρετεί συγκεκριμένες λειτουργίες όπως πρόβλεψη της στήριξης στα όρια της στοάς ή πλευρικό περιορισμό των στύλων για την

βελτίωση των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης. Ο σχεδιασμός της λιθογόμωσης για τη διασφάλιση ευσταθούς απόδοσης κάτω από τις συνθήκες λειτουργίας που επέβαλε η εξαγωγή των παρακείμενων πετρωμάτων περιλαμβάνει ανάλυση των τάσεων και των μετακινήσεων στη μάζα πλήρωσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιότητες της λιθογόμωσης, τη γεωμετρία της, τη δομή του πετρώματος και ανοίγματα του υλικού πλήρωσης εκτεθειμένα από εκσκαφή πετρωμάτων. Η μελέτη από Barrett et al. (1978) έδειξε πως για υλικά λιθογόμωσης με στοιχεία τσιμέντου, μπορεί να είναι αναγκαίο να προσομοιωθεί η αλληλουχία της πλήρωσης του μετώπου όπως επίσης και η αλληλουχία της εξαγωγής του παρακείμενου πετρώματος για τον εντοπισμό πιθανών ζωνών αστοχίας στο υλικό που θα πληρώσει τα εξορυσσόμενα κενά.

Όσον αφορά το δομικό ρόλο της λιθογόμωσης, η έκθεση του Blight (1984) περιγράφει την αλληλεπίδραση τόσο της μαλακής, όσο και της δύσκαμπτης λιθογόμωσης με τους στύλους του μεταλλείου. Δείχνει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία προέρχονται όταν έχουμε παραμόρφωση των στύλων ενάντια στην αντίσταση που παρέχεται από παρακείμενα περιορισμένη λιθογόμωση.

Τα πλεονεκτήματα της λιθογόμωσης για έλεγχο επί του εδάφους σε υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, έχουν καταγραφεί από τον Jager et al. (1987). Έδειξαν πως η λιθογόμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην θέση τοπικών στύλων ευστάθειας χωρίς να αυξάνεται ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας και για τοπική στήριξη κοντά στο μέτωπο και τις στοές προσπέλασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις σημαντικά πλεονεκτήματα προσφέρει η χρήση μαλακού υλικού πλήρωσης. Παρόλο που η δομική αξία της λιθογόμωσης σε μεταλλεία με βαθιά επίπεδα έχει γίνει κατανοητή, δεν είναι ξεκάθαρο εάν παρόμοια οφέλη μπορούν να επιτευχθούν σε διεργασίες σχετικά μικρότερου βάθους όπου οι μετακινήσεις δύναται να είναι μικρότερες. Οι έρευνες για την αλληλεπίδραση μεταξύ στύλων και λιθογόμωσης πραγματοποιήθηκαν από τους Swan και Board (1989) και έχουν μεγάλο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό τους σε συμβατικές μεθόδους μετώπου και στύλων. Εξετάστηκε η επίδοση στύλων εύθραυστου πετρώματος, υποστηριζόμενων από μαλακή λιθογόμωση κάτω από συνθήκες χαμηλού περιορισμού. Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα για την μοντελοποίηση των συνθηκών φόρτισης που υπόκειται επί τόπου ένας στύλος και έγιναν αριθμητικές προσομοιώσεις για στύλους περιορισμένους από μαλακό υλικό πλήρωσης και καταγραφή παραμορφωτικής συμπεριφοράς.

Γομώνοντας τα εξορυσσόμενα κενά με απορρήματα του εμπλουτισμού, άμμο ή άγωνα πετρώματα δημιουργούνται καλές προοπτικές για τον περιορισμό των συγκλίσεων και την παροχή περιφερειακής αλλά και τοπικής υποστήριξης. Η λιθογόμωση έχει δύο σημαντικές αρετές. Πρώτον, η παρουσία της μειώνει τις επιτρεπόμενες συγκλίσεις, περιορίζει τον τελικό όγκο συγκλίσεων και τις μετατοπίσεις που προκαλούνται από την αύξηση της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Δεύτερον, η βραχώμαζα πρέπει να επιδράσει πάνω στη λιθογόμωση για επέλεθει η παραμόρφωσή της και κατά τη διαδικασία αυτή μπορούν να απορροφηθούν μεγάλα ποσά ενέργειας (Salamon, 1983). Παρόλο που τα πλεονεκτήματα που πιθανώς να σχετίζονται με τη χρήση λιθογόμωσης ταυτοποιήθηκαν το 1960 (Cook, N.G.W. et al., 1966), η μέθοδος δεν τέθηκε σε εφαρμογή εξαιτίας του υψηλού κόστους και διαφόρων λειτουργικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα υπήρχε η πεποίθηση πως θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί η απαιτούμενη δυσκαμψία στο υλικό ώστε η λιθογόμωση να είναι αποτελεσματική στον περιορισμό των συγκλίσεων και στην επαρκή μείωση του βαθμού απελευθέρωσης της ενέργειας (Heunis, 1980) [5].



Εικόνα 1. Διατηρητικό μηχάνημα Jumbo κινείται παράλληλα σε λιθογομωμένη στοά (στα αριστερά), η οποία λειτουργεί ως οδηγός της νέας στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών.

Προσομοιώσεις σε υπολογιστές που πραγματοποιήθηκαν από τον Jager et al. (1987) και από άλλους υπέδειξαν πως η λιθογόμωση από μόνη της παρέχει την τοπική υποστήριξη που απαιτείται σε βάθη λιγότερο από 3km. Κάτω από τα 3km τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της λιθογόμωσης είναι να μειώνει τις τάσεις που δρουν στη σταθεροποίηση των στύλων ή να ενεργοποιεί τα κενά μεταξύ των στύλων και ως εκτούτου ο ρυθμός της εξόρυξης να αυξάνεται. Έχουν καταγραφεί βελτιωτικά μέτρα, σε μεταλλεία της Νότιας Αφρικής από τη χρήση της μεθόδου λιθογόμωσης. Αυτά είναι: βελτιωμένη πρόσβαση και συνθήκες τοιχωμάτων, μειώσεις στο πλάτος του μετώπου, μειώσεις σε εκρηκτικές ύλες όταν η λιθογόμωση είναι κοντά στο μέτωπο, μειώσεις στον αριθμό των ατυχημάτων που προκαλούνται από πτώσεις πετρωμάτων και βελτιωμένη παραγωγή. Αυτή η αρχική εμπειρία έδειξε πως η λιθογόμωση πρέπει να τοποθετείται με χαμηλό πορώδες και όσο πιο κοντά γίνεται στο μέτωπο. Η διαδικασία

της πλήρωσης πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με καλό, προσωρινό σύστημα υποστήριξης και πρέπει να ενσωματωθεί στο κύκλο των εξορυκτικών εργασιών (Jager et al., 1987) [5].

Οι κυριότεροι λόγοι χρήσεως της λιθογόμωσης είναι οι ακόλουθοι:

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

Είναι αναγκαία επίσης για την υποστήριξη των τοιχωμάτων στα μέτωπα εργασίας καθώς και των στύλων μεταλλεύματος, που αφήνονται ενδιάμεσα στα μέτωπα για υποστήριξη της οροφής [3].



Εικόνα 2. Λιθογομωμένη στοιά με χαρακτηριστικό χρώμα του υλικού λιθογόμωσης στο μεταλλείο Μαύρων Πετρών.

2.4.2 Λιθογόμωση με Στείρα

Η χρήση λιθογόμωσης με στείρα είναι τόσο παλαιά όσο και η εξόρυξη μεταλλεύματος, για τον λόγο του ότι, είναι ευκολότερη η απόθεση στείρων από την ανάπτυξη σε εξορυγμένα μέτωπα, προκειμένου να αποφευχθεί η απομάκρυνση τους από το μεταλλείο. Ο αρχικός σκοπός της πλήρωσης των κενών με στείρα, είναι η υποστήριξη των χώρων αυτών από εξορυγμένο μετάλλευμα ώστε να προληφθεί η καθίζηση της επιφάνειας, η δημιουργία καταπτώσεων, η πίεση στις θέσεις εργασίας ή η ακαριαία διάρρηξη του στείρου πετρώματος [3].

2.4.3 Πηγές Υλικών Λιθογόμωσης

Ένα υλικό πλήρωσης πρέπει να πληρεί έναν αριθμό προϋποθέσεων: πρέπει να είναι φθινό, εύκολα μεταφερόμενο, πυρασφαλές και να συρρικνώνεται σε μικρό βαθμό. Μερικές φορές ζητούνται επιπρόσθετες απαιτήσεις. Για παράδειγμα το υλικό λιθογόμωσης δεν πρέπει να είναι συμπαγές εάν πρόκειται να προωθηθεί από ένα επίπεδο σε ένα άλλο όσο το μέτωπο βαθαίνει. Αντιθέτως, για να ανακτήσουμε τους στύλους του μεταλλεύματος μεταξύ των πληρωμένων θαλάμων τότε το υλικό πλήρωσης πρέπει να είναι συμπαγές και σταθερό. Για την επίτευξη αυτού του αποτελέσματος προστίθονται μερικές φορές στο υλικό ουσίες τσιμεντοποίησης. Εάν το υλικό μεταφέρεται μέσω του νερού (υδραυλική πλήρωση), το νερό απομακρύνεται αμέσως μετά την τοποθέτηση.

Το υλικό λιθογόμωσης περιλαμβάνει άμμο, θραυσμένο πέτρωμα από το μεταλλείο ή από την επιφάνεια, πετρώματα από σωρούς της επιφάνειας, απορρήματα από τις διαδικασίες εμπλουτισμού και σκωρίες μεταλλουργίας. Εάν το υλικό πλήρωσης είναι σκληρό τότε η χρήση του ελαχιστοποιεί τις απώλειες στη εξόρυξη. Επίσης χρησιμοποιείται σε συνδιασμό επιφανειακών, υπόγειων εξορύξεων κοιτασμάτων, στην ανάκτηση πολύτιμων μεταλλευμάτων διατηρώντας πιο λιτά μεταλλεύματα για μετέπειτα επί τόπου εξόρυξη, σε κοιτάσματα που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος με αυξημένο κίνδυνο χτυπημάτων δόνησης, σε κοιτάσματα όπου εκγειμονούν κίνδυνοι πυρκαγιάς και επίσης σε κοιτάσματα που βρίσκονται κάτω από προστατευόμενες εγκαταστάσεις, έργα και δεξαμενές νερού. Η σύνθεση και το κόστος του σκληρού υλικού λιθογόμωσης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υλικών, στη γύρω περιοχή της εκμετάλλευσης, με επαρκή αντοχή, η μέθοδος παρασκευής του και η μέθοδος μεταφοράς του υλικού για τη πλήρωση του κενού χώρου [4].

Πηγές για στείρα υλικά λιθογόμωσης είναι:

1. Επιφανειακά ορυχεία κοντά στο μεταλλείο.
2. Στείρο πέτρωμα από ανάπτυξη υπογείων έργων.
3. Χαλίκια από ποτάμια.
4. Αποθέσεις παγετώνων.
5. Αποσαθρωμένα πετρώματα.
6. Άμμος από θίνες.
7. Απορρίματα - άγωνα μεταλλείου.
8. Απορρίματα εγκαταστάσεων επίπλευσης.
9. Απορρίματα εγκαταστάσεων προπαρασκευής άνθρακα.
10. Σκωρίες μεταλλουργικών εργοστασίων ή ιπτάμενη τέφρα.

Επίσης οι ακόλουθες κατηγορίες και χαρακτηριστικά υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν λιθογόμωση:

1. Αυστηρά διαβαθμισμένο στείρο πέτρωμα με ελάχιστο ή χωρίς λεπτόκοκκο υλικό.
2. Διαβαθμισμένο υλικό που περιέχει τσιμέντο και σωστή αναλογία ύδατος για μεγαλύτερη αντοχή.
3. Αδρανές υλικό που περιέχει θειούχες ενώσεις (π.χ. πυρίτη, πυροτίτη) ή άλλα μεταλλεύματα που βοηθούν στη σταθεροποίηση της λιθογόμωσης.
4. Μίγματα στείρου πετρώματος ή χαλικιών και λεπτόκοκκα από άλεση απορρίματα για τη δημιουργία καλύτερης διαβάθμισης μεγέθους, που θα γεμίσουν το μεγαλύτερο κενό στο μίγμα. Τμήμα του λεπτομερούς υλικού μπορεί να αφαιρείται μέσω κυκλώνων για καλύτερη μεταφορά και πλήρωση.
5. Μίγματα σκωρίας χαλυβουργείων ή ιπτάμενης τέφρας με υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες, που σταθεροποιούν τη λιθογόμωση.

2.4.3.1 Πλεονεκτήματα στείρων ως υλικό λιθογόμωσης

Μια χαμηλού κόστους πηγή στείρου υλικού σε κοντινή απόσταση με το μεταλλείο βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό τα οικονομικά μεγέθη της εκμετάλλευσης. Η προπαρασκευή του υλικού πλήρωσης είναι συνήθως λιγότερο δαπανηρή από άλλους τύπους λιθογόμωσης, και αυτό οφείλεται στην απλούστερη εγκατάσταση.

- Η χρήση πετρώματος από την ανάπτυξη υπογείων εργασιών μειώνει το κόστος της απόθεσης με μετακίνηση του από το μεταλλείο και βοηθά επίσης στο περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην επιφάνεια.
- Η προσθήκη τσιμέντου ή άλλου συνδετικού παράγοντα μπορεί να δημιουργήσει μια ισχυρή σταθεροποιημένη γόμωση.

2.4.3.2 Μειονεκτήματα στείρων ως υλικό λιθογόμωσης

Αντίθετα, η γόμωση με σείρα μπορεί να οδηγεί σε μια σχετικά χαλαρή, μη συμπιεσμένη γόμωση, που δεν μπορεί να αντισταθεί ικανοποιητικά στις καταπτώσεις εάν το υλικό δεν είναι διαβαθμισμένο, έτσι ώστε τα λεπτά υλικά να καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος των κενών. Ένα υλικό γόμωσης το οποίο δεν έχει σταθεροποιηθεί επαρκώς, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ανασφαλείς κατακρημνίσεις ή καταπτώσεις, εάν εκτίθεται μεγάλη επιφάνεια του. Επιπροσθέτως ένα εξαιρετικά υγρό υλικό πλήρωσης μέσα στα φρέατα διέλευσης του, μπορεί να δράσει ως υδραυλικό με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν επικίνδυνα προβλήματα διαρροών.

2.4.4 Πνευματική Γόμωση

Σε υπόγεια μεταλλεία άνθρακα που χρησιμοποιούν μεθόδους πνευματικής μεταφοράς, έχει εφαρμοστεί για πολλά χρόνια η διάκινηση του εξορυγμένου στείρου πετρώματος από την ανάπτυξη και τις παραγωγικές διαδικασίες των μεταλλείων, καθώς και άλλων απορριμάτων ή ανεπιθύμητων υλικών, μέσω αυτής της τεχνικής. Παρόμοιος εξοπλισμός έχει χρησιμοποιηθεί για λιθογόμωση σε μεταλλεία με σκληρό πέτρωμα και πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε σε ένα μεταλλείο χρυσού της Ν. Αφρικής, όπου το πέτρωμα από την ανάπτυξη του μεταλλείου απόκειται σε εξοφλημένα μέτωπα για να μειώσουν την τυχόν κατάπτωση του πετρώματος. Η πνευματική μεταφορά μπορεί να ξεπεράσει πολλά προβλήματα που προκύπτουν κατά την υδραυλική λιθογόμωση σε επίπεδα μέτωπα, στα οποία τα κενά μπορούν να πληρωθούν τελείως με υψηλού βαθμού συμπίεση. Τα σείρα από την ανάπτυξη του μεταλλείου μπορούν να προστεθούν στο πνευματικό σύστημα, περιορίζοντας έτσι το κόστος μεταφοράς στην επιφάνεια. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο σε υλικό με υγρασία για να σχηματισθεί σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Παρά το γεγονός ότι πνευματική μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την υδραυλική γόμωση, υπάρχουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα:

1. Η υπερβολική απαιτούμενη ισχύς για μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις

2. Το πρόβλημα φθοράς των αγωγών, λόγω της υψηλής ταχύτητας του αέρα κατά μήκος τους, απαιτείται περιστροφή των αγωγών και συχνή αντικατάστασή τους.

2.4.5 Υδραυλική Γόμωση

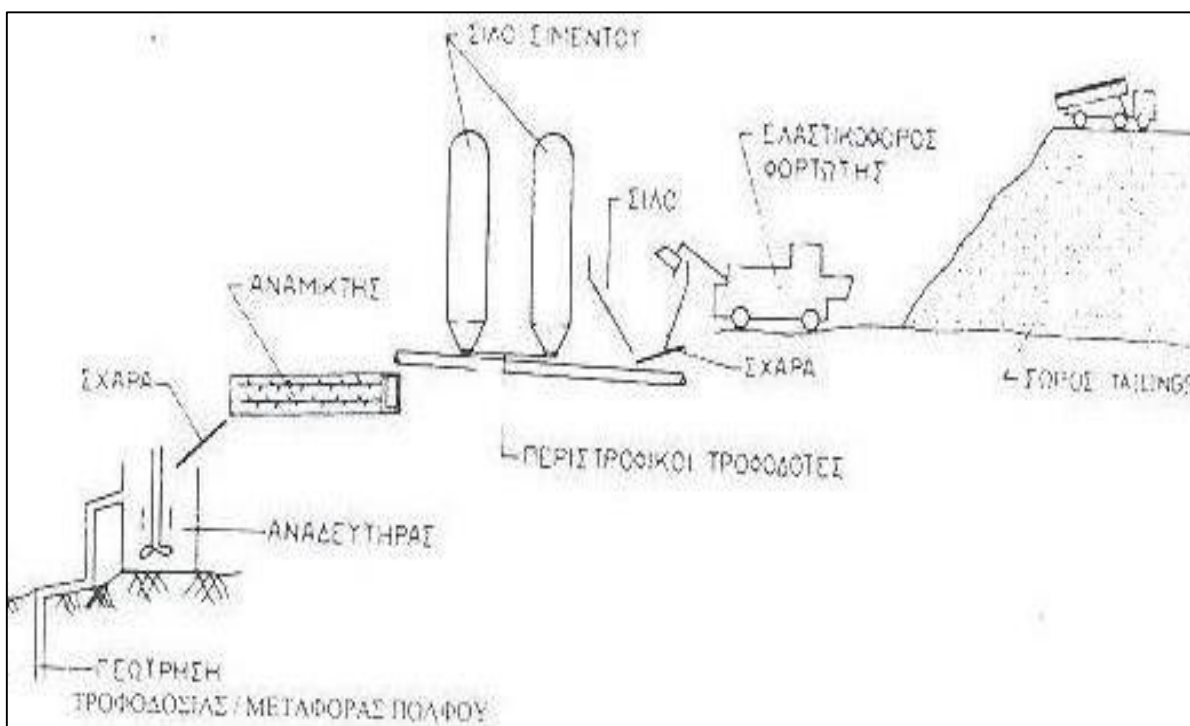
Όπως αναφέρθηκε, η αρχή της μεθόδου της υδραυλικής γόμωσης τσιμεντοπολφού είναι η αποκατάσταση της φυσικής υποστήριξης των υπογείων ανοιγμάτων με πλήρωση των κενών με άλλο υλικό, που αναπτύσσει σοβαρή αντοχή στην συμπίεση. Η προσθήκη μικρών ποσοτήτων τσιμέντου επιτείνει την ανάπτυξη των αντοχών αυτών. Προκύπτει έτσι πως τα βασικά γνωρίσματα του υλικού γόμωσης είναι τα εξής:

1. Χημική σύσταση του υλικού όσο το δυνατόν πιο αδρανής για να μη καταστρέφεται η συνένωση του με το τσιμέντο.
2. Κοκκομετρική σύσταση που να πληρεί τους κανόνες της υδραυλικής μεταφοράς.
3. Ύπαρξη του υλικού αυτού σε μεγάλες ποσότητες, εύκολη εξασφάλιση του και κυρίως σε χαμηλό κόστος.

Είναι σήμερα πολύ καλά γνωστή η δυσμενής επίδραση που μερικά ενεργά ορυκτά μπορεί να επιφέρουν στις ενώσεις που σχηματίζει το τσιμέντο κατά την ανάπτυξη των αντοχών του, π.χ. ύπαρξη άμορφου SiO_2 προσβάλλει τις ασβεστολιθικές ενώσεις του τσιμέντου καταστρέφοντας την δομή του. Πολλά ορυκτά επίσης, με μακροχρόνια παραμονή σε συνθήκες υψηλής υγρασίας που συνήθως υπάρχει στα μεταλλεία, εξαλλοιώνονται και μηχανικώς καταρρέουν. Τετοια υλικά πρέπει να αποφεύγονται.

Το υλικό γόμωσης πρέπει να μην προκαλεί προβλήματα στην υδραυλική μεταφορά. Τα υλικά με ανθεκτικούς και φθοροποιούς κρυστάλλους σύντομα καταστρέφουν τις σωληνώσεις. Η κοκκομετρία του υλικού πρέπει να είναι ομαλή χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στο μέγεθος. Η μεγαλύτερη διάσταση του κόκκου πρέπει να είναι μικρότερη του $1/3$ της διαμέτρου των σωληνώσεων ώστε να είναι δυνατή και εύκολη η μεταφορά του τόσο προς τα κάτω όσο και προς τα πάνω. Η υδραυλική γόμωση μπορεί να περιγραφεί ως μια ρευστή φάση (πολφός) που ποικίλει γενικά από 35 έως 75% σε περιεκτικότητα στερεών τεμαχιδίων. Υπάρχουν βέβαια μεταβολές ως προς τα ανώτερα και τα κατώτερα αυτά όρια. Το ρευστό μπορεί να προωθηθεί με διάφορους τύπους αντλιών στο μέτωπο ή να διατεθεί με ροή βαρύτητας μέσω δικτύου γεωτρήσεων και

σωληνώσεων. Η παρασκευή της γόμωσης είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται σε επιφανειακές εγκαταστάσεις. Εκεί αναμειγνύεται το υλικό γόμωσης με νερό και τσιμέντο, ρυθμίζονται οι αναλογίες τους και ο ρυθμός τροφοδοσίας του μίγματος [3].



Σχήμα 8. Επιφανειακές εγκαταστάσεις προετοιμασίας υδραυλικής γόμωσης.

2.4.5.1 Πλεονεκτήματα

Η υδραυλική λιθογόμωση παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Επιτυγχάνεται καλύτερη υποστήριξη των τοιχωμάτων, καθώς η υδραυλική λιθογόμωση μπορεί να καλύψει ανωμαλίες στα τοιχώματα και την οροφή.
2. Η πίεση γενικά μειώνεται στην περιοχή εργασίας όταν η βελτιωμένη υποστήριξη μειώνει τις καταπτώσεις των τοιχωμάτων. Το αποτέλεσμα βελτιώνεται όταν το υλικό γόμωσης είναι καλά διαβαθμισμένο, ώστε τα λεπτομερή τεμαχίδια να πληρώνουν τα κενά. Ακόμα μεγαλύτερη αντοχή επιτυγχάνεται με την προσθήκη τσιμέντου ή άλλου συνδετικού υλικού.
3. Καλύτερος έλεγχος του αερισμού, καθώς αναπτύσσεται καλύτερη στεγανότητα.
4. Όταν χρησιμοποιείται με τσιμέντο ως κάλυμμα δαπέδου σε εκμετάλλευση με τη μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων, δημιουργείται σταθερή

και καθαρή επιφάνεια εργασίας. Αποφεύγεται έτσι η πρόσμιξη μεταλλεύματος και γόμωσης κατά την φόρτωση του μεταλλεύματος.

5. Δημιουργείται άριστη επιφάνεια εργασίας για τον μηχανικό εξοπλισμό της εκμετάλλευσης.
6. Μειώνονται οι επιφανειακές αποθέσεις και συνεπώς ελέγχεται το περιβαλλοντικό πρόβλημα.

2.4.5.2 Μειονεκτήματα

Οι μέθοδοι υδραυλικής λιθογόμωσης εμφανίζουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

1. Εάν η πυκνότητα του πολφού δεν διατηρείται μεταξύ 65-70%, η ύπαρξη πλεονάζοντος ύδατος προκαλεί διαρροή των λεπτόκοκκων υλικών από τη γόμωση, δημιουργεί προβλήματα καθαρότητας, πληρώνει τα έγκοιλα με λάσπη, προκαλεί φθορά στις αντλίες, λασπώνει τις οδούς μεταφοράς, φθείρει τον εξοπλισμό και γενικά δημιουργούνται προβλήματα διαχείρισης της λάσπης στις υπόγειες εργασίες.
2. Περίσσεια ύδατος έχει ως αποτέλεσμα ασθενή, στρωματοποιημένη λιθογόμωση με τσιμέντο και απώλεια τσιμέντου όταν ξεπλένεται από το χώρο απόθεσης της λιθογόμωσης. Συσσωματώσεις και εμφράξεις μπορούν να δημιουργηθούν εάν υπάρχει διαρροή νερού με διαλυμένο τσιμέντο μέσα σε φρέαρ που περιέχει μετάλλευμα.
3. Υπάρχει κίνδυνος πλημμυλούς γόμωσης όταν δεν εξασφαλίζεται σωστή αποστράγγιση.
4. Είναι δύσκολη η απομάκρυνση της λάσπης από τον πυθμένα φρεάτων ή εγκοίλων.
5. Εάν το υλικό γόμωσης είναι πολύ πυκνό τότε δύναται να οδηγήσει σε έμφραξη των αγωγών [3].

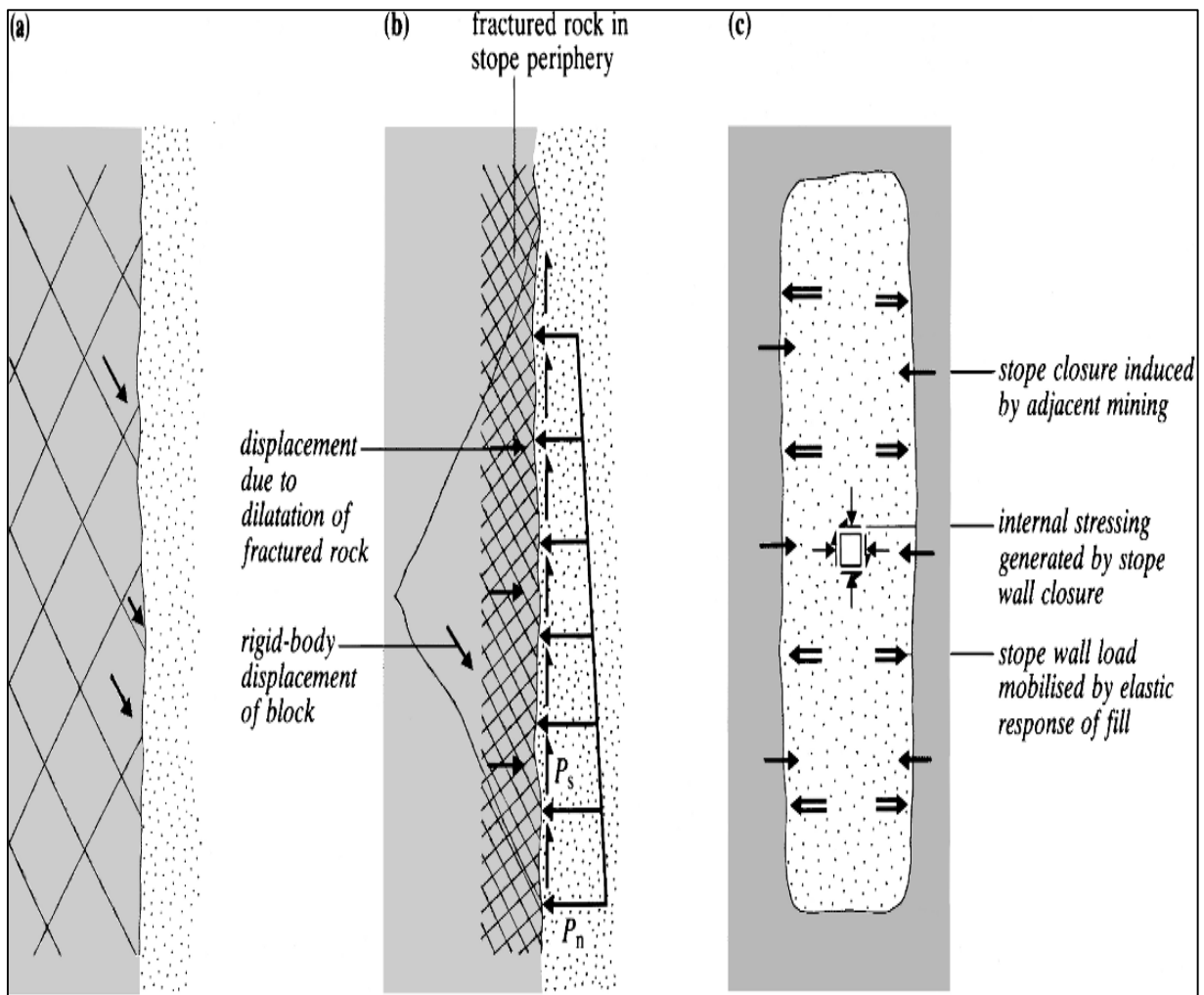


Εικόνα 3. Στοά πληρωμένη υδραυλικά, με το υλικό λιθογόμωσης όπου φαίνονται δύο αντλίες μεταφοράς του υλικού.

3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή

Η τεχνητή υποστήριξη στη δομή ενός μεταλλείου προορίζεται για τον έλεγχο τόσο της τοπικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων του μετώπου, όσο και των μετακινήσεων του κοντινού πεδίου. Χρησιμοποιούνται δύο κύρια μέτρα ελέγχου του πετρώματος. Δυνητικά ασταθή πετρώματα κοντά στο όριο της εκσκαφής μπορούν να ενισχυθούν με στοιχεία, όπως ήλους, αγκύρια και ενέματα. Αυτός ο τύπος ελέγχου δημιουργεί ένα τοπικά υγιές όριο μετώπου εντός του οποίου δύναται να προχωρήσει κανονικά η παραγωγική δραστηριότητα. Το δεύτερο, και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, τεχνητό μέσο στήριξης είναι η λιθογόμωση, η οποία τοποθετείται στα κενά μέτωπα του μεταλλείου. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να καθοριστεί συγκεκριμένη γεωμετρία στοών και αλληλουχία εργασιών για να επιτρέψει την εξόρυξη του μεταλλεύματος και το κοκκώδες μέσο πλήρωσης να εκπληρώσει τις δυνατότητες υποστήριξης. Τρεις μηχανισμοί μπορούν να προταθούν για να επιδείξουν τις δυνατότητες υποστήριξης της λιθογόμωσης. Αυτοί απεικονίζονται στο Σχήμα 9. Με την επιβολή κινηματικού περιορισμού στην μετατόπιση των βασικών τμημάτων στο όριο μιας στοάς, η λιθογόμωση μπορεί να αποτρέψει την προοδευτική αποσύνθεση χωρικά της βραχώμαζας στο εγγύς-πεδίο, σε συνθήκες χαμηλών τάσεων. Δεύτερον, τόσο οι ψευδο-συνεχής όσο και οι άκαμπτου σώματος μετατοπίσεις του πετρώματος που βρίσκεται στα τοιχώματα της στοάς, ενεργοποιούν την παθητική αντίσταση του υλικού πλήρωσης. Η υποστηρικτική πίεση που επιβάλλεται στην επαφή της γόμωσης με το πέτρωμα μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία υψηλών τοπικών επιπέδων τάσεων στην περιφέρεια της στοάς. Τέλος, εάν η μάζα πλήρωσης είναι σωστά περιορισμένη, μπορεί να δράσει ως ένα συνολικό στοιχείο υποστήριξης στη κλίμακα του μεταλλείου. Δηλαδή, οι μετατοπίσεις λόγω της εκσκαφής στη διεπαφή γόμωσης – πετρώματος, προκαλούν παραμορφώσεις στο σώμα της πληρωτικής μάζας και αυτές αποτυπώνονται ως μείωση της εντατικής κατάστασης σε όλη την περιοχή του κοντινού πεδίου του μεταλλείου. Αυτοί οι τρεις μηχανισμοί παρουσιάζουν την απόκριση της γόμωσης ως επιφανειακό, τοπικό και συνολικό στοιχείο υποστήριξης του μεταλλείου. Ο τρόπος της υποστηρικτικής δράσης σε κάθε περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι σχετίζεται τόσο με το βαθμό παραμόρφωσης της βραχώμαζας όσο και με τις ιδιότητες του υλικού γόμωσης.



Σχήμα 9. Τρόποι υποστήριξης λιθογόμωσης μεταλλείου: (α) κινηματικός περιορισμός στην επιφάνεια των όγκων σε εκτονωμένο πέτρωμα, (β) υποστηρικτικές δυνάμεις που ενεργοποιούνται τοπικά σε ρωγματωμένα πετρώματα, (γ) σφαιρική υποστήριξη λόγω συμπίεσης του υλικού πλήρωσης από τα τοιχώματα.

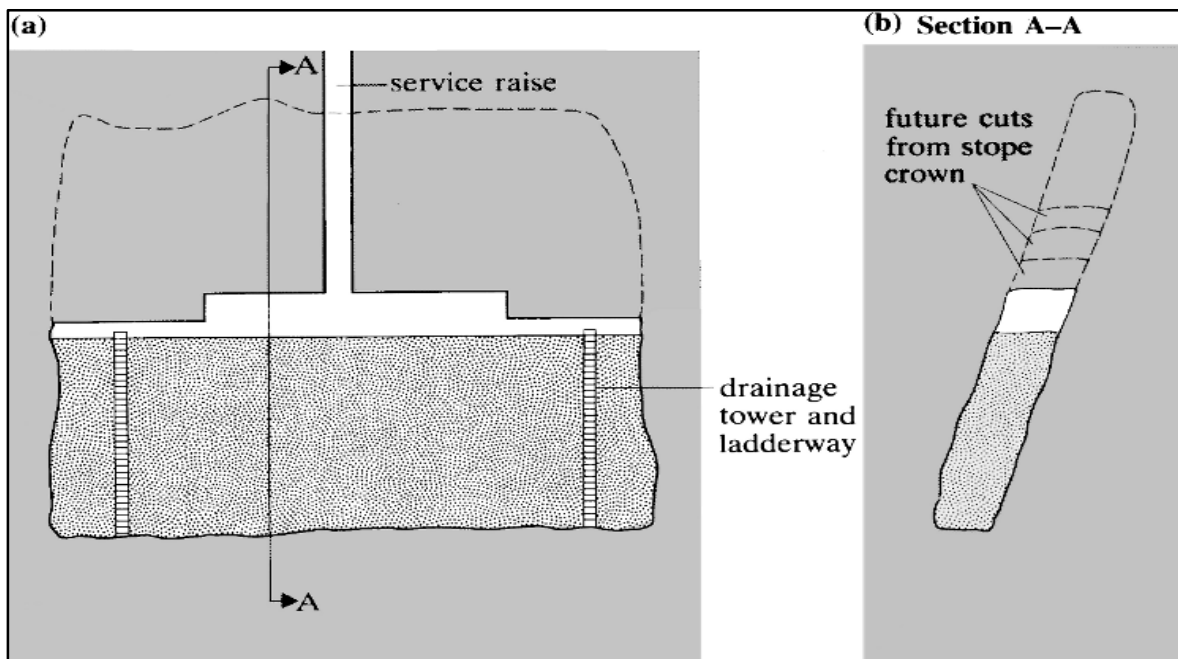
Δύο μέθοδοι εξόρυξης, μπορεί να εκμεταλλεύονται τεχνικές για την ενίσχυση του πετρώματος στην περιφέρεια της στοάς. Οι στέψεις μετώπων με την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων με κατερχόμενη φορά υπόκεινται συχνά σε ρωγμές εξαιτίας των εξορυκτικών εργασιών, ή σε δυσμενή τεκτονική γεωλογία που σχετίζεται με τοπική αστάθεια. Τα τοιχώματα μεγάλων ανοιχτών μετώπων πληρούν τις προδιαγραφές για τοπική ενίσχυση, όταν απαιτείται από την κατάσταση των τάσεων και την αντοχή της βραχώμαζας ή τη γεωλογία του πετρώματος στο όριο της στοάς. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα της χρήσης μεγάλου μήκους καλωδίων οπλισμού στα όρια μεγάλου πλάτους στοών. Η λιθογόμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο υποστήριξης στη μεταλλευτική με δύο τρόπους. Στις συμβατικές μεθόδους εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων (με ανερχόμενη ή κατερχόμενη φορά), το υλικό πλήρωσης εισάγεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια της σταδιακής επέκτασης της στοάς.

Η λειτουργική αποτελεσματικότητα του υλικού πλήρωσης σχετίζεται με την ικανότητά του να παράγει μια σταθερή επιφάνεια εργασίας αμέσως μετά την τοποθέτηση του στη στοά. Όταν η λιθογόμωση χρησιμοποιείται σε εργασίες ανοιχτού μετώπου, η τοποθέτηση της σε μια συγκεκριμένη στοά καθυστερεί έως ότου ολοκληρωθεί η παραγωγή του μεταλλεύματος. Η επιτυχής επίδοση της μάζας πλήρωσης κατά τη διάρκεια της απόληψης των στήλων μεταλλεύματος, περιλαμβάνει την διατήρηση, στο κοίτασμα ελεύθερων στήλων - τοιχωμάτων λιθογόμωσης, ικανών να αντέχουν στατικά και παροδικά φορτία που συνδέονται με παρακείμενες μεταλλευτικές δραστηριότητες. Και στις δύο περιπτώσεις, η λειτουργία και η χρηστικότητα του πληρωτικού υλικού μπορεί να περιγραφθούν ποσοτικά. Είναι απαραίτητο η λιθογόμωση να σχεδιαστεί για την κάλυψη καθορισμένων λειτουργιών και απαιτήσεων ασφαλείας. Έχει ήδη παρατηρηθεί ότι η λιθογόμωση που χρησιμοποιείται στη μεταλλευτική είναι συχνά ένα κοκκώδες συνεκτικό μέσο. Το ύψος της μάζας πλήρωσης σε μία στοά δύναται να υπερβεί αρκετά εκατοντάδες μέτρα. Είναι επίσης γνωστό ότι η αντοχή σε διάτμηση ενός κοκκώδους μέσου προσδιορίζεται απευθείας από την πίεση του νερού των πόρων. Ως εκ τούτου, μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στο σχεδιασμό πλήρωσης και εφαρμογή της στην μεταλλευτική έτσι ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη σημαντικής πίεση στους πόρους του σώματος της λιθογόμωσης. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί το πιθανότερο για καταστροφική ροή της λιθογόμωσης κάτω από υψηλή υδροστατική κεφάλη, εάν η υψηλή τάση των πόρων οδηγήσει σε πλήρη απώλεια της αντοχής σε διάτμηση και σε μετέπειτα ρευστοποίηση του μέσου. Αυτό που απαιτείται πρακτικά είναι, με αυστηρή εδαφομηχανική έννοια, η οποιαδήποτε φόρτωση λιθογόμωσης να πραγματοποιείται σε συνθήκες αποστράγγισης [5].

3.2 Μέθοδος Εναλλασσόμενων Κοπών και Λιθογομώσεων

Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων σε στενά κοιτάσματα, όπως περιγράφεται παρακάτω, έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο βαθμίδων μεγάλου μήκους στοάς με λιθογόμωση. Ωστόσο, πολλές απόψεις της παρακάτω συζήτησης από πλευράς βραχομηχανικής της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων εφαρμόζονται και σε αυτή την περίπτωση. Επίσης η συμβατική μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων θα συνεχίσει να παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ως μέθοδος σε ειδικές εφαρμογές λόγω της υψηλής εκλεκτικότητας και της χαμηλής αραίωσης. Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων κυρίως πραγματοποιείται σε σχετικά στενά, απότομα βυθιζόμενα κοιτάσματα, όπου το

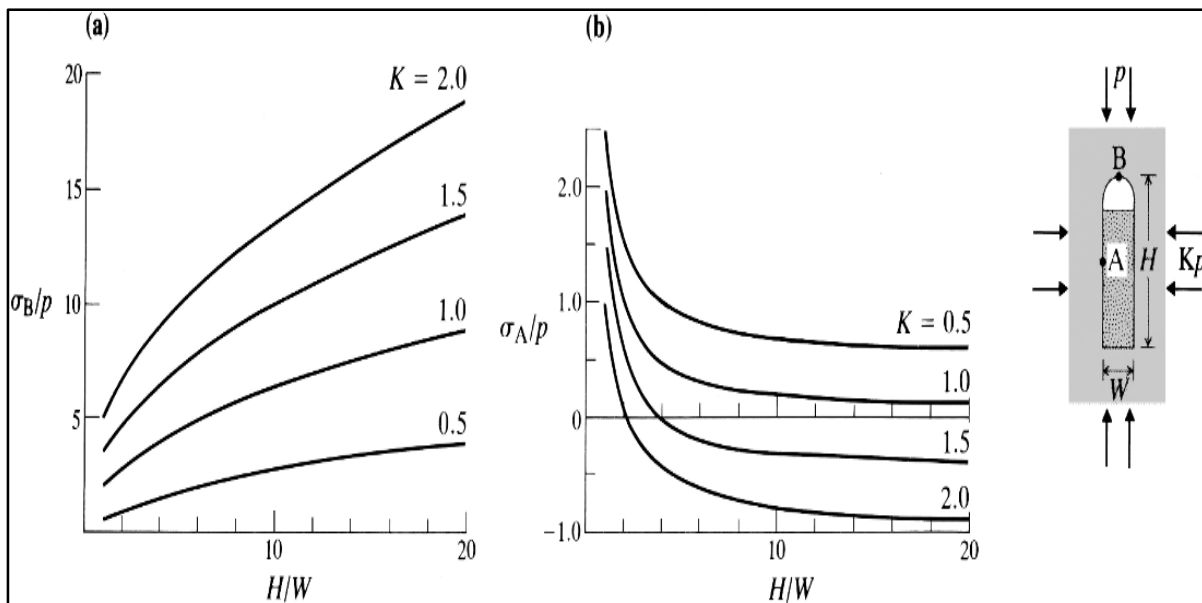
πέτρωμα στα όρια της στοάς δεν μπορεί να παραμείνει ευσταθές, ώστε να είναι κατάλληλη μία εκμετάλλευση με κενά μέτωπα . Είτε η εκμετάλλευση έχει ανερχόμενη (up-dip advance) ή κατερχόμενη φορά (down-dip advance), η μέθοδος περιλαμβάνει την σταδιακή ανάπτυξη μιας εκσκαφής σχήματος σχισμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Το υλικό πλήρωσης τοποθετείται στα εξορυσσόμενα κενά μετά από κάθε προχώρηση του μετώπου. Επειδή το ανθρώπινο δυναμικό εργάζεται κάτω από βραχώδεις επιφάνειες (στη μέθοδο με ανερχόμενη φορά) ή λιθογομωμένες μάζες (στη μέθοδο με κατερχόμενη φορά) οι οποίες αναγεννώνται σε κάθε κύκλο εξόρυξης, η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον αποτελεσματικό έλεγχο της βραχώμαζας. Ως εκ τούτου η γεωμηχανική της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης.



Σχήμα 10. Σχηματική όψη της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων που απεικονίζει την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης μιας εκσκαφής.

Μερικά χρήσιμα στοιχεία στην γεωμηχανική της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων μπορεί να αποκτηθεί από την ελαστική ανάλυση της εντατικής κατάστασης γύρω από μία στοά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέλιξη των τάσεων στη στέψη και τα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής, κατά τη διάρκεια της κάθετης επέκτασης της. Οποιαδήποτε ρεαλιστική πίεση υποστήριξης σε μία επιφάνεια εκσκαφής έχει μικρό αντίκτυπο στη κατανομή των ελαστικών τάσεων στη βραχώμαζα, ενώ είναι δυνατόν σε αυτή την διερευνητική ανάλυση να αμεληθεί η παρουσία της λιθογόμωσης στην εξορυσσόμενη και πληρωμένη ζώνη. Η κατανομή της έντασης μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα γύρω από μια σειρά από εκσκαφές με τη γεωμετρία

που απεικονίζεται στο Σχήμα 11, χρησιμοποιώντας μια ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης.



Σχήμα 11. Τάσεις στη στέψη και στα τοιχώματα που αναπτύσσονται γύρω από το μέτωπο εκμετάλλευσης με την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων σε διάφορες γεωμετρίες και συνθήκες τασικών πεδίων.

Η στοά εκλαμβάνεται να έχει στέψη, έχει ημι-κυκλικής διατομής. Καθώς εξελίσσεται η μέθοδος κάθετα στο επίπεδο του κοιτάσματος, η κατάσταση της τάσης στο περιβάλλον πέτρωμα μπορεί να σχετίζεται άμεσα με την αλλαγή σε σχετικές διαστάσεις (δηλαδή αναλογίας ύψους/πλάτους) της εκσκαφής. Σημείο ιδιαίτερης αξίας που υποδηλώνει την κατάσταση της τάσης στο όριο της στοάς είναι το σημείο A, στο κέντρο του πλευρικού τοιχώματος της στοάς, και το σημείο B, στο κέντρο της στέψης της εκσκαφής. Έτσι ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης μπορούν να ληφθούν από τις εξισώσεις:

$$\sigma_A / p = 1 - K + 2q$$

$$\sigma_B / p = K - 1 + K(2H / \rho_B)^{1/2}$$

και εφόσον $\rho_B = W / 2$,

$$\sigma_B / p = K - 1 + K[2H/(W/2)]^{1/2} = K-1+2K(H/W)^{1/2}$$

Όπου $q = W / H$, k είναι ο λόγος οριζόντιων προς κατακόρυφων τάσεων και σ_A , σ_B είναι οι τάσεις στα σημεία A και B.

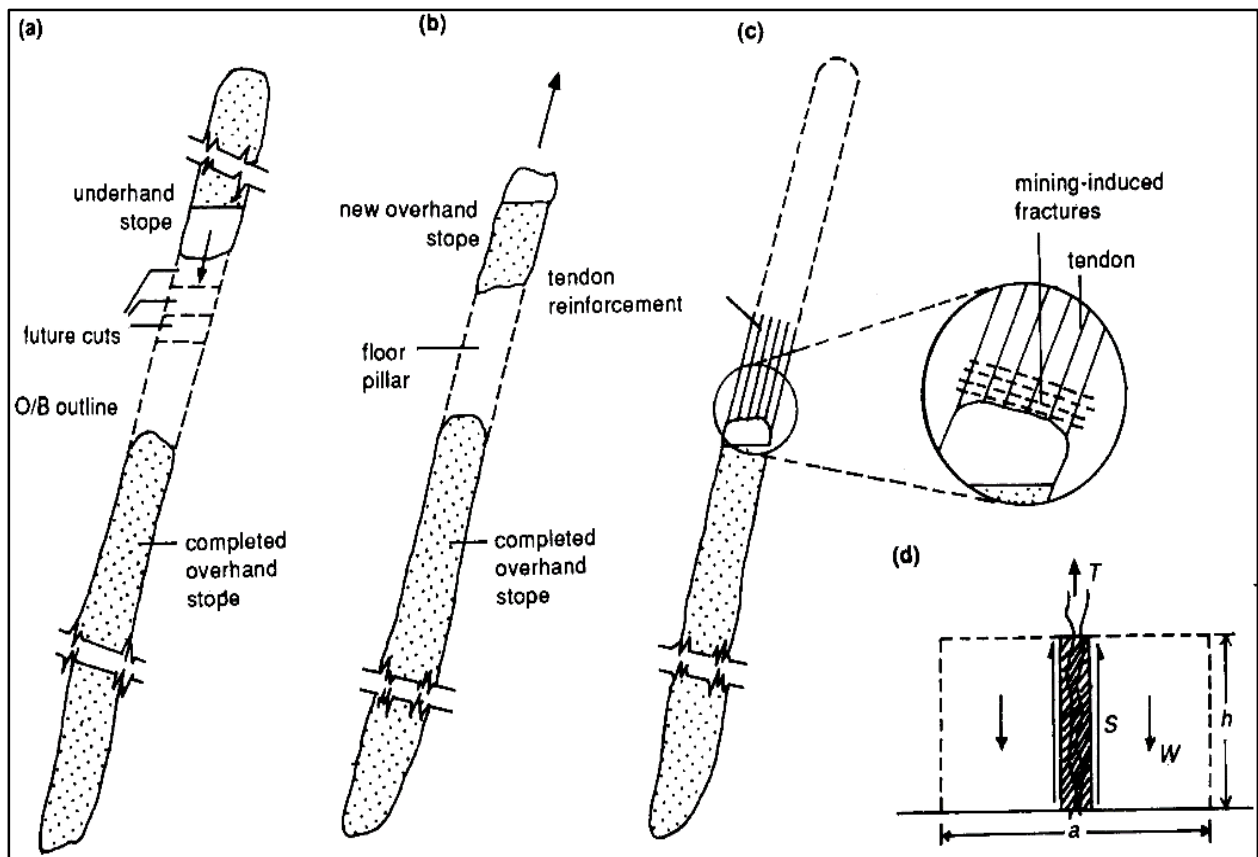
Στην πρώτη εξίσωση υπολογίζεται η τάση του πλευρικού τοιχώματος της στοάς από το σχήμα της εγγεγραμμένης έλλειψης, ενώ στη δεύτερη εξίσωση υπολογίζεται η τάση στη στέψη της στοάς, θεωρώντας ότι ορισμένες τοπικές καμπυλότητες αναπτύσσονται στο σημείο εκείνο. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα κατώτερο όριο εκτίμησης των τάσεων στη στέψη. Η εγγεγραμμένη έλλειψη θα προβλέπει μια σημαντικά υψηλότερη τάση στη στέψη της στοάς και θα υπερεκτιμά την πραγματική της τιμή.

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των τάσεων της στέψης και των πλευρικών τοιχωμάτων, για ένα φάσμα αναλογιών ύψους/πλάτους της εκσκαφής, δίνονται στο παραπάνω σχήμα (a) και (b). Δεδομένου ότι η τιμή του k είναι συχνά μεγαλύτερη από τη μονάδα, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα από αυτά τα στοιχεία. Πρώτον, χαμηλές τάσεις, οι οποίες είναι συχνά εφελκυστικές, δημιουργούνται στα πλευρικά τοιχώματα της εκσκαφής. Δεδομένου ότι μια ασυνεχής ή θρυμματισμένη βραχώμαζα θα αποτονωθεί και γενικά θα αποσυντεθεί σε ένα πεδίο εφελκυσμού, είναι σαφές από τις τάσεις των πλευρικών τοιχωμάτων ο λόγος για τον οποίο τα στενά κοιτάσματα είναι συχνά υποψήφια για μια υποστηριζόμενη μέθοδο εκμετάλλευσης βασισμένη στη χρήση λιθογόμωσης. Η προφανής λειτουργία του τοποθετημένου υλικού πλήρωσης είναι να αποτρέψει χωρικά την προοδευτική αποσύνθεση, στις χαμηλές τοπικές τάσεις, του πετρώματος των τοιχωμάτων της στοάς. Αυτό το συμπέρασμα υποστηρίζεται από πιο εκτεταμένη υπολογιστική ανάλυση της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων, συμπεριλαμβανομένων των αναλύσεων των Pariseau et al. (1973) και Hustrulid και Moreno (1981).

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από το Σχήμα 11 αφορά το γεωμηχανικό περιβάλλον στο οποίο λαμβάνει χώρα η ενεργή εξόρυξη με τη μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων, δηλαδή γύρω από το στέψη της στοάς. Στις συνήθεις αναλογίες ύψους/πλάτους της στοάς και τάσεων πεδίου, κατά την οποία προχωρά η εξόρυξη, πρέπει να αναμένεται οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσης της στέψης να υπερβαίνουν το 10. Η συνέπεια αυτή μπορεί να εκτιμηθεί από το ακόλουθο παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι η εξόρυξη προχωρεί σε ένα μέσο όπου οι κάθετες και οριζόντιες τάσεις πεδίου είναι 14 MPa και 21 MPa αντίστοιχα. (Αυτό μπορεί να είναι περίπου 500m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους). Το Σχήμα 11.a δείχνει ότι σε μια στοά με αναλογία πλάτους/ύψος το 10, η τάση στη στέψη της στοάς θα είναι 140 MPa. Από πολύ λίγες ασυνεχείς βραχώμαζες θα μπορούσε να αναμένεται να έχουν μια επιτόπου μονοαξονική θλιπτική αντοχή αυτού του μεγέθους. Τοπική ρωγμάτωση θα

συμβεί στη στέψη της στοάς. Είναι επίσης σαφές ότι, δεδομένου ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στο σημείο της στέψης αυξάνει με την αύξηση της αναλογίας ύψους/βάθους, η γεωμηχανική της ενεργής περιοχής εξόρυξης θα επιδεινωθεί, καθώς η στοά προχωρά προς τα πάνω επίπεδα. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό θέμα στη συμβατική μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη μιας περιοχής τοπικής θλιπτικής ρωγματώσης στη στέψη της εκσκαφής κατά την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και γομώσεων δεν συνεπάγεται αυτομάτως ότι θα συμβεί η κατάρρευση της στέψης. Ωστόσο, η ανάπτυξη της ρωγμάτωσης αυξάνει τη δυνατότητα τοπικών πτώσεων τεμάχων πετρώματος, και αυτή η κατάσταση μπορεί να επιδεινωθεί από δυσμενή γεωλογία στα πετρώματα που περιβάλλουν το μέταλλευμα. Παρατηρήσεις επαγόμενων ρωγματομένων μοτίβων της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων στη στέψη της στοάς και ο ρόλος τους στη σταθερότητα της, έχουν γίνει από τους Brady και Brown σε μεγάλο αριθμό μεταλλείων [5].

Η γενική εικόνα που προκύπτει από αυτή τη συζήτηση, είναι εκείνη της αυξημένης ανάγκης για υποστήριξη και ενίσχυση της στέψης καθώς εξελίσσεται η εκσκαφή ανερχόμενα. Σε μέτωπα με χαμηλό λόγο H/W (ύψους/πλάτους) η στέψη της εκσκαφής δύναται να απαιτεί ελάχιστη ή και μηδενική υποστήριξη. Όταν υπάρχει ανάπτυξη ρωγματώσεων ως συμβάν τοπικής αστάθειας στην στέψη, τότε δύναται να γίνει χρήση ηλών ή κοχλιών για τη διασφάλιση των χαλαρών και ασταθών όγκων του πετρώματος. Η δημιουργία διεισδυτικών ρωγματώσεων στη στέψη, και η αλληλεπίδρασή τους με τη δομή του πετρώματος, δύναται να δημιουργήσει συνθήκες κάτω από τις οποίες δεν μπορεί να διασφαλιστεί η σταθερότητα της στέψης.



Σχήμα 12. Στρατηγικές εξόρυξης για να ανταπεξέρθουν σε συνθήκες έντονης υποβάθμισης στην στέψη μετώπου στην μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων: (a) εγκατάλειψη του μετώπου, και εκμετάλλευση κατά κατερχόμενη φορά από υψηλότερο επίπεδο, (b) ανάπτυξη νέου μετώπου με ανερχόμενη φορά σε υψηλότερο επίπεδο, αφήνοντας στύλο πατώματος, (c) η καθήλωση της στέψης του μετώπου, (d) διάγραμμα ελεύθερου σώματος για ανάθεση υποστηρικτικού σχεδίου.

Υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων εξόρυξης που επιτρέπουν την περαιτέρω εκμετάλλευση του μεταλλεύματος. Για παράδειγμα, μπορεί να σταματήσει η εφαρμογή της μεθόδου κατά ανερχόμενη φορά, και να αρχίσει η αντίστοιχη μέθοδος με κατερχόμενη φορά από ένα υψηλότερο επίπεδο, όπως φαίνεται στο ανώτερο σχήμα, τμήμα (a). Εναλλακτικά αφήνεται στύλος μεταλλεύματος πάνω από τη στέψη του μετώπου και η εκμετάλλευση συνεχίζεται με την μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη φορά, όπως απεικονίζεται στο (b) τμήμα του σχήματος. Η εκμετάλλευση του στύλου που παραμένει ως δάπεδο, πραγματοποιείται σε μεταγενέστερο στάδιο με χρήση διαφορετικής μεθόδου. Τέλος, μία πιο πρακτική εναλλακτική είναι η ενίσχυση της στέψης με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπει την προχώρηση της εκμετάλλευσης σε ζώνες έντονης ρωγμάτωσης, πάνω από την ενεργή περιοχή των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων. Αυτό απεικονίζεται στο τμήμα (c) του Σχήματος 12 [5].

3.3 Υποστήριξη Υπόγειων Έργων

3.3.1 Έλεγχος των Στρωμάτων

Η στήριξη και η ενίσχυση των πετρωμάτων είναι τα βασικά αλλά όχι τα μόνα μέτρα που εξασφαλίζουν την σταθεροποίηση των υπογείων ανοιγμάτων. Η επίτευξη των παραπάνω στόχων μπορεί να πραγματοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή, του μεγέθους, του σχήματος και της διεύθυνσης της εκσκαφής, αλλά και της αλληλουχίας των φάσεων εξόρυξης, και της εφαρμοζόμενης μεθόδου των ανατινάξεων. Εώς και πριν από 50 χρόνια ο τρόπος δράσης της στήριξης ενός υπόγειου ανοίγματος θεωρούταν απλουστευτικά ως η υποστήριξη του υπερκείμενου χαλαρωμένου πετρώματος έναντι των δυνάμεων της βαρύτητας. Η επίτευξη του σκοπού αυτού επιτυγχάνοταν αρχικά με ξύλινους ορθοστάτες, και αργότερα με μεταλλικούς ορθοστάτες ή φορείς από σκυρόδεμα. Η διαστασιολόγησή της επιδίωκε στην εξασφάλιση της ανάληψης των υπερκείμενων φορτίων ή εφόσον ήταν αναγκαίο των φορτίων λόγω διόγκωσης. Για το λόγο αυτό ονομάστηκε και υποστήριξη.

Η θεώρηση της διάδρασης πετρώματος – υποστήριξης αναπτύχθηκε το 1960, που παρουσιάστηκε με τη μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών του πετρώματος. Βασικό στοιχείο της σύλληψης είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης της παραμένουσας αντοχής του πετρώματος, μετά τη διαρροή του, προς όφελος της οικονομικής εκτέλεσης του έργου. Δεδομένου ότι η παραμένουσα αντοχή του πετρώματος δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνει με τον πλευρικό περιορισμό, η υποστήριξη θα είχε βασικότερο σκοπό τη δημιουργία συνθηκών περιορισμού και μικρότερο αυτόν της ανάληψης των κλασικών φορτίων υποστήριξης από αυτήν. Τον περιορισμό του πετρώματος επιτυγχάνουν πολύ αποτελεσματικά η επένδυση των παρειών του υπόγειου ανοίγματος με σκυρόδεμα και η ήλωση του πετρώματος, τεχνικές που αναπτύχθηκαν μέσα στον 20^ο αιώνα. Την χρησιμοποίηση της αντοχής του πετρώματος, μετά την διαρροή του, εκμεταλλεύονταν στα μεταλλεία, χωρίς σημαντικό θεωρητικό υπόβαθρο, ήδη από τότε που εφαρμοζόταν η υποχωρούσα υποστήριξη. Οι νέες αντιλήψεις σε συνδιασμό με την επινόηση νέων ή βελτιωμένων συστημάτων στήριξης, καθώς και εξοπλισμού τοποθέτησης, έδωσαν τη δυνατότητα διάνοιξης των σύγχρονων υπόγειων έργων.

Βασικός σκοπός της διαδικασίας της στήριξης είναι η ενεργοποίηση και συντήρηση της εσωτερικής αντοχής του πετρώματος, έτσι ώστε να καταστεί αυτό αυτοϋποστηριζόμενο. Ο όρος υποστήριξη επομένως θα μπορούσε να διαφυλαχθεί για

τις περιπτώσεις εκείνες που χρησιμοποιούνται δομικά στοιχεία που φέρουν μερικά ή ολικά το βάρος μεμονομένων τεμαχίων, ή ζώνες χαλαρωμένου πετρώματος. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν οι όροι προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη, καθώς της δεύτερης προηγούνταν η πρώτη από δομική ξυλεία συνήθως και η οποία αφαιρούνταν για να τοποθετηθεί η δεύτερη εφόσον το άνοιγμα θα έπρεπε να παραμείνει σε λειτουργία για αρκετό χρόνο. Σήμερα, παρόλο που και πάλι χρησιμοποιούμε δύο στάδια υποστήριξης, το δεύτερο στάδιο έρχεται να προστεθεί στη πρώτο. Έτσι αντί για προσωρινή υποστήριξη θα πρέπει γενικά να χρησιμοποιείται ο όρος αρχική ή άμεση υποστήριξη.

Η υποστήριξη διαχωρίζεται σε ενεργητική και σε παθητική. Η ενεργητική υποστήριξη εφαρμόζει ένα συγκεκριμένο φορτίο κατά τον χρόνο της εφαρμογής της. Παραδείγματα είναι οι τανυόμενοι κοχλίες ή καλώδια και οι διαστελλόμενες επενδύσεις, που χρησιμοποιούνται για να στηρίξουν ήδη χαλαρωμένες μάζες. Η παθητική υποστήριξη ή οπλισμός αναπτύσσει φορτίο συμπαρασυρόμενη σε μετατόπιση με την βραχομάζα που βρίσκεται σε επαφή. Τέτοια υποστήριξη προσφέρουν τα χαλύβδινα τόξα, από ξύλινα υποστύλωμα και από αγκύρια ή ήλους ή καλώδια ολικής πάκτωσης. Ο όρος έλεγχος στρωμάτων χρησιμοποιείται συνήθως για την περιγραφή των τεχνικών της υποστήριξης ή του οπλισμού στα ανθρακωρυχεία. Ο όρος είναι επιτυχής καθώς ενέχει την έννοια του περιορισμού των μετακινήσεων αντί της υποστήριξης. Η υποστήριξη με τη στενή έννοια αποτελεί μέρος των μέτρων για τον έλεγχο των στρωμάτων [2].

3.4 Μέθοδοι Υποστήριξης

3.4.1 Άμεση Επένδυση από Σκυρόδεμα

Η άμεση επένδυση από σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με την εκτόξευσή του επάνω στα τοιχώματα των υπόγειων εκσκαφών. Το σκυρόδεμα που έχει τοποθετηθεί με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται εκτοξευόμενο ή ψεκασμένο σκυρόδεμα. Ο όρος shotcrete (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) δόθηκε για πρώτη φορά το 1930 από την Αμερικάνικη Ένωση Σιδηροδρόμων. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κατά την ACI 506R-85 “Οδηγός Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος”, ονομάζεται το σκυρόδεμα που μεταφέρεται μέσα σε σωλήνες και εκτοξεύεται υπό πίεση αέρα με μεγάλη ταχύτητα επάνω σε μία επιφάνεια. Η αποτελεσματικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην αποφυγή της

χαλάρωσης του πετρώματος έχει πιστοποιηθεί σε πληθώρα γεωλογικών συνθηκών, ενώ ενδείκνυται σε χαλαρό πέτρωμα αλλά και σε μη ομοιόμορφες διατομές εκσκαφής [2].

3.4.2 Δράσεις του Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα που εκτοξεύεται από το ακροφύσιο σε μία τραχεία επιφάνεια πετρώματος, αρχικά πληρώνει τις κενές περιοχές, όπως για παράδειγμα ρωγμές, σχισμές ή διακλάσεις με το να συνδέει τα χαλαρά ή μερικώς στηριζόμενα θραύσματα και παρεμποδίζει την περαιτέρω αποσύνθεση που μπορεί να προκληθεί. Η συγκόλληση εξαρτάται από την πλέξη των σωματιδίων του σκυροδέματος στην τραχεία επιφάνεια του πετρώματος. Αρχικά σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοκονίας με κόκκους άμμου μικρότερους από 0.2mm. Αυτό το λεπτόκοκκο υλικό εισχωρεί στους πόρους και στις ρωγμές και προσφέρει μία βάση για την εκτόξευση και συμπύκνωση του υπόλοιπου πάχους. Κατά τη δημιουργία του αρχικού στρώματος τα χονδρόκοκκα αδρανή αναπηδούν και πέφτουν στο δάπεδο. Είναι προφανές πως η πρόσφυση είναι καλύτερη σε πρόσφατα θραυσμένο, καθαρισμένο και τραχύ πέτρωμα, παρά σε λεία επιφάνεια πλαστικού ή μετάλλου. Αντίθετα, πτωχή πρόσφυση παρουσιάζουν τα διαβρωμένα, θραυόμενα, εύθρυπτα, λεπιωτά, λασπώδη ή αργιλικά πετρώματα. Ο καθαρισμός της επιφάνειας του πετρώματος μπορεί να γίνει με ψεκασμό μείγματος νερού και πεπιεσμένου αέρα από το ακροφύσιο του εκτοξευτήρα.

Ζημιά στο σκυρόδεμα μπορεί να προκληθεί από τη διήθηση νερού. Αυτό μπορεί να παρακαμφθεί με την διάτρηση οπών και τοποθέτηση σωλήνων συνδεδεμένων με το σύστημα στράγγισης. Η εκτόξευση σκυροδέματος γίνεται συχνά αμέσως μετά τη δημιουργία της νέας επιφάνειας. Για την εξασφάλιση της γρήγορης πήξης χρησιμοποιούνται επιταχυντικά πρόσμιχτα. Η απώλεια που προκαλείται στην τελική αντοχή αντισταθμίζεται από την αυξημένη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα [2].

Οι βασικές δράσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως επένδυση είναι:

1. Στατική ενίσχυση: (α) Η παρεμπόδιση ή ελαχιστοποίηση της χαλάρωσης του πετρώματος με την ισχυροποίηση της μάζας της οποίας γεμίζονται τα κενά, (β) με την μεταφορά του φορτίου του πετρώματος σε γειτονικό ευσταθές πέτρωμα με δυνάμεις διάτμησης ή συγκόλλησης, και (γ) με λειτουργία κελύφους.

2. Σφράγιση του πετρώματος: Σε οξειδούμενο ή χαλαρωμένο πέτρωμα, η στεγάνωσή του παρεμποδίζει την περαιτέρω χαλάρωση λόγω της έκθεσής του σε υγρό αέρα ή υπόγεια νερά.
3. Προστασία από πήξη – τήξη του νερού: Ο έλεγχος του κύκλου δημιουργίας νερού- πάγου, με την ανακατεύθυνση, τη στράγγιση ή το σταμάτημα της ροής.



Εικόνα 4. Στοά υποστηριζόμενη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete).

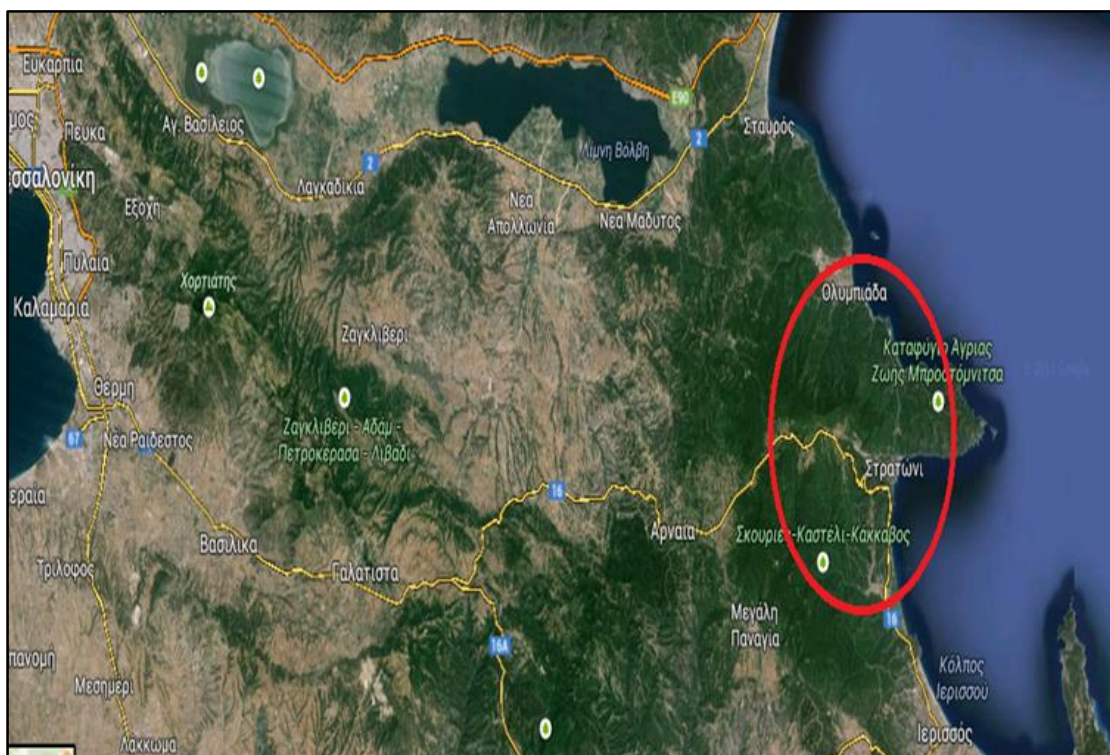


Εικόνα 5. Στοά υποστηριζόμενη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών.

4 Μεταλλείο Μαύρων Πετρών

4.1 Ελληνικός Χρυσός Α. Ε.

Η εκμετάλλευση του κοιτάσματος των Μαύρων Πετρών πραγματοποιείται από την Ελληνικός Χρυσός, Ανώνυμος Εταιρεία Μεταλλείων και Βιομηχανίας Χρυσού που ιδρύθηκε το Δεκέμβριο του 2003, με την απόκτηση του ενεργητικού της εταιρείας TVX Hellas A.E από το Ελληνικό Δημόσιο. Το συγκρότημα των Μεταλλείων της Ελληνικός Χρυσός Α.Ε βρίσκεται στη Βορειοανατολική Χαλκιδική, περίπου 110km ανατολικά της Θεσσαλονίκης. Η μεταλλευτική δραστηριότητα στη περιοχή ξεκινάει από την αρχαιότητα και περιλαμβάνει την εκμετάλλευση κοιτασμάτων θειούχων μεταλλευμάτων, ψευδαργύρου και αργυρούχου μολύβδου, σιδηρομεταλλευμάτων και μαγγανιούχων μεταλλευμάτων [6].



Εικόνα 6. Περιοχή όπου δραστηροποιείται η εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε στη ΒΑ Χαλκιδική.

4.2 Μεταλλείο των Μαύρων Πετρών

Οι Μεταλλευτικές Εγκαταστάσεις Στρατωνίου της Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. βρίσκονται στα Δ.Δ. Στρατονίκης και Στρατωνίου του Δήμου Αριστοτέλη, του Νομού Χαλκιδικής και αφορούν στη εκμετάλλευση και κατεργασία κοιτασμάτων μικτών θειούχων μεταλλευμάτων μολύβδου και ψευδαργύρου. Στην περιοχή μεταξύ Στρατωνίου – Στρατονίκης βρίσκονται το μεταλλείο των «Μαύρων Πετρών» και το εξοφλημένο

μεταλλείο «Μαντέμ Λάκκος». Οι εγκαταστάσεις συνολικά περιλαμβάνουν ένα εργοστάσιο εμπλουτισμού και ένα λιμάνι με εγκαταστάσεις φόρτωσης των παραγόμενων συμπυκνωμάτων στα πλοία. Επιπλέον, υπάρχουν δύο μονάδες κατεργασίας νερού, μία εντός των εγκαταστάσεων του εργοστασίου εμπλουτισμού στο Στρατόνι και μια δεύτερη στις εγκαταστάσεις του μεταλλείου των Μαύρων Πετρών για τη καλύτερη δυνατή διαχείριση των νερών του μεταλλείου.

Το μεταλλείο των Μαύρων Πετρών επαναλειτουργεί από τον Οκτώβριο του 2005. Το κοίτασμα μικτών θειούχων (μόλυβδος, ψευδάργυρος και άργυρος) βρίσκεται τμηματικά κάτω από τη Στρατονίκη σε ένα βάθος 200 - 300 μέτρα. Συνολικά, τα αποθέματα των Μαύρων Πετρών ανέρχονται σε 1 εκατ. τόνους μέταλλευμα με 8,3% ψευδάργυρο, 6,0% μόλυβδο, 170 γραμμάρια ανά τόνο άργυρο. Η εκμετάλλευση του Μαντέμ Λάκκου ολοκληρώθηκε το 2002 και έχει δώσει το όνομα του στην περιοχή.



Εικόνα 7. Μεταλλείο Μαύρων Πετρών, προσπελαστική στοά, κύκλωμα αερισμού.

Το μεταλλείο διαθέτει μονάδα λιθογόμωσης στη θέση Σπεράντζα, σε υψόμετρο +347m, 250m περίπου ΝΑ της στοάς +360m, στην οποία επιστρέφουν τα τέλματα του εργοστασίου εμπλουτισμού για να αποτελέσουν το βασικό προϊόν του υλικού, μαζί με τσιμέντο και νερό. Πρόκειται για μια σύγχρονη μονάδα παρασκευής μίγματος

λιθογόμωσης η λειτουργία της οποίας ελέγχεται με τη χρήση προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών. Περιλαμβάνει πρόγραμμα ελέγχου του ρεύματος του αναδευτήρα για τον καλύτερο έλεγχο της ποιότητας του μίγματος και ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης της πίεσης κατά μήκος του δικτύου για την καλύτερη παρακολούθηση της ροής του μίγματος προς τα υπόγεια μεταλλευτικά έργα. Η διοχέτευση του προϊόντος της λιθογόμωσης γίνεται από την +360m, που αποτελεί την ψηλότερη είσοδο του μεταλλείου. Αξίζει να σημειωθεί πως το ψηλότερο μέτωπο όπου εκτελούνται εργασίες είναι το +300m και η Στρατωνίκη βρίσκεται στα +460m.

Το εντοπισμένο κοιτάσμα των Μαύρων Πετρών είναι σχετικά ήπιας κλίσης περίπου 35°. Οι επαφές με το στείρο είναι ανώμαλες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος ποικίλουν. Το πέτρωμα της οροφής και του δαπέδου του κοιτάσματος θεωρείται σχετικά συμπαγές, ενώ το μέταλλευμα μέτριας αντοχής, γεγονός που επιβάλλει τη μακροπρόθεσμη υποστήριξη των κενών εκμετάλλευσης [6].

4.3 Μετάλλευμα

Η μικτή θειούχα μεταλλοφορία του Μεταλλείου Μαύρων Πετρών αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, γαληνίτη και σφαλερίτη. Δευτερεύοντα ορυκτά είναι οι τετραεδρίτης, χαλκοπυρίτης, βουρνοτίτης, μπουλανζεριτής, αρσενοπυρίτης, μαρκασίτης, πυρροτίνης και εναργίτης. Μεταξύ των ορυκτών της στείρας παραγένεσης τα κυριότερα είναι ασβεστίτης, σερικήτης, χαλαζίας και ροδοχρωσίτης. Απαντάται επίσης χρυσός, γενικώς υπομικροσκοπικών διαστάσεων (<1μm), που επειδή δεν είναι άμεσα ανακτήσιμος, χαρακτηρίζεται ως δυσκατέργαστος. Η μέση σύσταση του κοιτάσματος των Μαύρων Πετρών είναι Ag 190 gr/t, Zn 10,40% και Pb 7,40%.

Συγκεκριμένα, η μεταλλοφορία στην περιοχή των Μαύρων Πετρών συνίσταται από φακούς Pb-Zn-Ag και εντοπίζεται κατά μήκος του ρήγματος Στρατωνίου – Βαρβάρας και εντός του ορίζοντα του μαρμάρου, με διεύθυνση Ανατολή – Δύση και κλίση 35° προς Νότο. Ο ορίζοντας των Μαύρων Πετρών καταλαμβάνει το νοτιότερο άκρο του αντικλίνου. Το μεταλλοφόρο σώμα των Μαύρων Πετρών είναι ουσιαστικά ένα ενιαίο στρωματοειδές σώμα που φιλοξενείται εντός του στρωματογραφικά ανώτερου από τους δύο ορίζοντες μαρμάρου, κοντά στην επαφή του μαρμάρου με τον υπερκείμενο τεκτονικό αμφιβολίτη, ο οποίος στην επαφή του με τη μεταλλοφορία παρουσιάζεται έντονα εξαλλοιωμένος, καολίνης. Η θειούχος μεταλλοφορία συνδέεται γενετικά με τους απλίτες της περιοχής, που είναι έντονα σερικιτιωμένοι- καολινοποιημένοι

λεπτόκοκκοι έως μεσόκοκκοι πηγματίτες. Το μάρμαρο μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το κοίτασμα είναι παχυστρωματώδες, χονδρόκοκκο, γαλαζωπό ή λευκό, τοπικά δολομιτωμένο και κατακερματισμένο, ενίοτε δε καρστικοποιημένο. Κάτω από τον ορίζοντα των μαρμάρων έχουμε τους γνευσίους της στρώσης, κυρίως αμφιβολιτικούς και τοπικά σχιστόλιθους. Απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες ποικίλου μεγέθους διασχίζουν τα παραπάνω μεταμορφωμένα πετρώματα. Τη μεταλλοφορία συνοδεύει η έντονη υδροθερμική εξαλλοίωση των απλιτών, πηγματιτών, αμφιβολιτών και των τμημάτων των γειτονικών γνευσίων που έχουν εξαλλοιωθεί σε μορφή καολίνη [6].

4.4 Υλικό Λιθογόμωσης

Η Ελληνικός Χρυσός εκτελεί εργασίες λιθογόμωσης για να κλείσουν οι υπόγειες στοές με σκοπό να εξασφαλίσει την ασφάλεια στο χωριό της Στρατονίκης που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το μεταλλείο. Τονίζεται ότι σε κάθε περίπτωση, στόχος του σχεδιασμού της μεθόδου εκμετάλλευσης εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων με ανερχόμενη φορά, αποτελεί η στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό πλήρωση των στοών, σε συνδυασμό με την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών ασφαλείας. Με την ανωτέρω μέθοδο εκμετάλλευσης, 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. Επομένως, τα αίτια λόγω των οποίων δύναται να προκαλούνται ενδεχομένως οχλήσεις ή επιπτώσεις στην επιφάνεια του εδάφους και των κατοικιών που βρίσκονται επί αυτής από την εκμετάλλευση του εντοπισμένου κοιτάσματος Μαύρων Πετρών αντιμετωπίζονται με αποτελεσματικό και αξιόπιστο τρόπο. Τα κενά, διευρυνόμενα μέτωπα που δημιουργούνται με τη μέθοδο της ανερχόμενης λιθογόμωσης από την εξόρυξη του μεταλλεύματος γομώνονται υδραυλικά με υλικό που αποτελείται από αδρομερές τέλμα εμπλουτισμού (70%), τσιμέντο (10%) και νερό (20%). Το υλικό αυτό, μετά από επαρκή ανάμιξη μεταφέρεται υδραυλικά στα προς λιθογόμωση μέτωπα με παροχή έως 40m³/h. Ουσιαστικά αποτελεί μέρος του αδρομερούς και χρησιμοποιείται μετά την ανάμιξη με τσιμέντο ως υλικό λιθογόμωσης των στοών μεταλλείων για πρόληψη δημιουργίας όξινης απορροής και ταυτόχρονα σταθεροποίησης του εδάφους. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που διαθέτει το υλικό αυτό αναγράφονται στους πίνακες που ακολουθούν [6].



Εικόνα 8. Διατηρητικό μηχάνημα και φορτωτής κινούνται στο μέτωπο για εργασίες δίπλα σε λιθογομωμένη στοά στο μαγαλείο Μαύρων Πετρών.

Πίνακας 1. Ποσοστά συμμετοχής υλικών στο σώμα της λιθογομώσης.

| Ανδρομερές Κλάσμα Εμπλουτισμού | Νερό | Τσιμέντο |
|--------------------------------|------|----------|
| 70% | 20% | 10% |



Εικόνα 9. Υλικό λιθογόμεωσης σε πληρωμένη στοά. Χαρακτηριστικό χρώμα και μορφή του σώματος της λιθογόμεωσης.

4.5 Κοιτασματολογικά Στοιχεία – Γεωλογικοί Σχηματισμοί της Περιοχής

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην περιοχή του Μεταλλείου Μαύρων Πετρών 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 έκαστης στοάς, θα διοχετεύεται, με υδραυλικό σύστημα μεταφοράς, το υλικό λιθογόμωσης προς πλήρωση του δημιουργούμενου υπόγειου ανοίγματος [6].

4.5.1 Προσδιορισμός Γεωτεχνικών Παραμέτρων Σχεδιασμού

Προκειμένου να γίνει η γεωτεχνική αξιολόγηση της βραχώμαζας και να καθοριστούν οι γεωτεχνικές παράμετροι για τους ανωτέρω γεωλογικούς σχηματισμούς, για το σώμα της μεταλλοφορίας και για τη λιθογόμωση, αξιολογήθηκαν από τους μελετητές της ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ, όλα τα διαθέσιμα δεδομένα, που αφορούν στις γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του μεταλλείου, καθώς επίσης και η εκτενής και πολύχρονη εμπειρία που έχει αποκτηθεί από την εκμετάλλευση. Με βάση τα διαθέσιμα γεωλογικά στοιχεία, έγινε βαθμονόμηση των γεωλογικών σχηματισμών με βάση το Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (Geological Strength Index, GSI). Για τον καθορισμό του GSI ελήφθησαν υπόψη τα λιθολογικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών και της κατάστασης της βραχώμαζας και των ασυνεχειών που αναπτύσσονται σε αυτήν.

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 [6].

Πίνακας 2. Τιμές παραμέτρων υπολογισμού των γεωτεχνικών τιμών των γεωλογικών σχηματισμών και του υλικού λιθογόμωσης με την εφαρμογή της μεθοδολογίας GSI [6].

| Γεωλογικός Σχηματισμός | GSI | m_i | σ_{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 | 60 | 10 | 4 |

Πίνακας 3 Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 200m [6].

| Γεωλογικός Σχηματισμός | GSI | σ_{ci} (MPa) | m_i | γ (KN/m ³) | c (MPa) | ϕ (°) | E (GPa) | Λόγος Poisson ν | ρ_o (MPa) | σ_{cm} (MPa) | σ_{cm}/ρ_o |
|---|-----|---------------------|-------|-------------------------------|-----------|------------|-----------|---------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| Θεώρηση πάχους υπερκειμένων 200m | | | | | | | | | | | |
| Τεκτονικός αμφιβολίτης | 40 | 100 | 26 | 28 | 1,01 | 47 | 4,21 | 0,25 | 5,6 | 15,61 | 2,78 |
| Στρώμα μαρμάρου | 35 | 50 | 12 | 28 | 0,55 | 33 | 2,25 | 0,35 | | 4,55 | 0,81 |
| Μετάλλευμα | 35 | 50 | 22 | 28 | 0,67 | 38 | 2,25 | 0,35 | | 6,21 | 1,10 |
| Βιοτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος | 45 | 100 | 20 | 28 | 1,05 | 47 | 5,60 | 0,25 | | 15,67 | 2,79 |
| Καολίνης | 15 | 1 | 6 | 28 | 0,04 | 5 | 0,10 | 0,35 | | 0,03 | 0,005 |
| Λιθογόμωση | 60 | 4 | 10 | 18 | 0,25 | 26 | 2,5 | 0,35 | | 0,67 | 0,019 |

Πίνακας 4. Τιμές γεωτεχνικών παραμέτρων για κάθε γεωλογικό σχηματισμό και για το υλικό λιθογόμωσης για πάχος υπερκειμένων 300m [6].

| Γεωλογικός Σχηματισμός | GSI | σ_{ci} (MPa) | m_i | γ (KN/m ³) | c (MPa) | ϕ (°) | E (GPa) | Λόγος Poisson ν | p_o (MPa) | σ_{cm} (MPa) | σ_{cm}/p_o |
|---|-----|---------------------|-------|-------------------------------|-----------|------------|-----------|---------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| Θεώρηση πάχους υπερκειμένων 300m | | | | | | | | | | | |
| Τεκτονικός αμφιβολίτης | 40 | 100 | 26 | 28 | 1,30 | 44 | 4,21 | 0,25 | 8,4 | 15,61 | 1,85 |
| Στρώμα μαρμάρου | 35 | 50 | 12 | 28 | 0,70 | 30 | 2,25 | 0,35 | | 4,55 | 0,54 |
| Μετάλλευμα | 35 | 50 | 22 | 28 | 0,85 | 35 | 2,25 | 0,35 | | 6,21 | 0,74 |
| Βιοτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος | 45 | 100 | 20 | 28 | 1,35 | 44 | 5,60 | 0,25 | | 15,67 | 1,86 |
| Καολίνης | 15 | 1 | 6 | 28 | 0,05 | 5 | 0,10 | 0,35 | | 0,03 | 0,003 |
| Λιθογόμωση | 60 | 4 | 10 | 18 | 0,32 | 23 | 2,5 | 0,35 | | 0,67 | 0,079 |

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων, που δίδονται στον ανωτέρω πίνακα, συνιστούν εύρος τιμών, σύμφωνα με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά την κατασκευή των στοών προσπέλασης και την εκμετάλλευση του μεταλλείου των Μαύρων Πετρών, βάσει του οποίου αξιολογήθηκε η γεωμηχανική συμπεριφορά κατά τη διάνοιξη των υπογείων στοών. Τα γεωτεχνικά αυτά στοιχεία που αφορούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς εντός και εκτός της εκμετάλλευσης, στη συνέχεια θα ενταχθούν στο Phase και θα αποτελέσουν τα βασικά στοιχεία για τις προσομοιώσεις που θα πραγματοποιηθούν.

Στο παράθυρο προσδιορισμού των ιδιοτήτων των υλικών γίνεται ο ορισμός κάθε ιδιότητας από τον παραπάνω Πίνακα 3. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται το μέτρο ελαστικότητας E , το ειδικό βάρος γ , ο λόγος Poisson, η αντοχή σε θλίψη, οι διάφοροι παράμετροι m , s και a , και ο δείκτης GSI. Ενώ η προσομοίωση πραγματοποιείται σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας Generalized Hoek – Brown με πλαστικό τύπο υλικών. Οι ιδιότητες όλων των σχηματισμών που συμμετέχουν στις προσομοιώσεις παραθέτονται στο προσάρτημα της παρούσας διπλωματικής.

4.5.2 Κριτήριο Αστοχίας κατά Hoek και Brown

Στον σχεδιασμό των μοντέλων προσομοίωσης που θα ακολουθήσουν για την ανάλυση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται η χρήση του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown. Σύμφωνα με τις έρευνες των Hoek και Brown (1980), η μέγιστη κύρια τάση σε τριαξονική καταπόνηση για μία ευρεία κατηγορία πετρωμάτων δίνεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

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

Όπου σ_c είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέρατου πετρώματος και η παράμετρος m εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί [1].

Πίνακας 5. Συντελεστές κριτηρίου Hoek και Brown για ακέραιο πέτρωμα (Bieniawski, 1984).

| Παράμετρος m | Πετρώματα |
|--------------|---|
| 7 | Ανθρακικά (π.χ. ασβεστολιθικά, δολομίτες, μάρμαρα) |
| 10 | Μεταμορφωμένα αργιλικά (π.χ. σχιστολιθικά πετρώματα. |
| 15 | Με ισχυρούς κρυστάλλους και χωρίς σχιστότητα (π.χ. ψαμμίτες, χαλαζίτες) |
| 17 | Λεπτόκοκκα πυριγενή (π.χ. ανδεσίτης, δολερίτης, διαβάσης, ρυόλιθος) |
| 25 | Χονδρόκοκκα πυριγενή και μεταμορφωμένα (π.χ. αμφιβολίτες, γάββροι, γνεύσιοι, γρανίτες, νορίτης) |

Το γενικευμένο κριτήριο των Hoek και Brown για ασυνεχείς βραχομάζες ορίζεται από την σχέση (Hoek, 2000):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right]^\alpha \quad (2)$$

όπου,

- m_b = η τιμή της σταθεράς m(του υλικού) για τη βραχομάζα (m_i η αντίστοιχη για υγιές πέτρωμα),
- s & α = σταθερές των χαρακτηριστικών της βραχομάζας,
- σ_{ci} = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υγιούς πετρώματος,
- σ_1' & σ_3' = οι αξονική και η πλευρική ενεργή τάση αντίστοιχα.

Το κριτήριο αυτό μπορεί να παρασταθεί σε άξονες τ , σ με την εξής διαδικασία. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση παράγονται ζεύγη σ_1' , σ_3' , τα οποία θεωρούνται ισοδύναμα με αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών, και έτσι μπορεί να κατασκευαστεί η περιβάλλουσα των κύκλων αυτών. Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (Hoek, 2000):

$$\tau = A \sigma_{ci} \left[\frac{\sigma_1' - \sigma_3' m}{\sigma_{ci}} \right]^B \quad (3)$$

όπου A και B σταθερές και σ_n' η ενεργή ορθή τάση και σ_{tm} η αντοχή σε 'εφελκυσμό' της βραχώμαζας. Η αντοχή σε 'εφελκυσμό' της βραχώμαζας εκφράζει ουσιαστικά την αλληλοσύνδεση και συναρμογή των τεμαχών του πετρώματος, όταν δεν είναι ελεύθερα να διογκωθούν, και δίνεται από τη σχέση (Hoek, 2000):

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left[mb - \sqrt{mb^2 + 4s} \right] \quad (4)$$

στην περίπτωση χρήσης του κριτηρίου για ακέραιο, συμπαγές πέτρωμα, από την σχέση (2) προκύπτει η εξίσωση (1). Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρεται στον Hoek (2000), είναι προτεινόμενο και δυνατό να επιτευχθεί μία σύνδεση των συντελεστών του κριτηρίου Hoek και Brown για το ακέραιο και το ασυνεχές πέτρωμα με τον δείκτη ταξινόμησης GSI, σύμφωνα με τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$mb = mie^{\left[\frac{GSI-100}{28}\right]} \quad (5)$$

ενώ οι συντελεστές s και a δίνονται από τις σχέσεις:

Για $GSI > 25$

$$s = e^{\left[\frac{GSI-100}{9}\right]} \quad (6)$$

$$a = 0.5$$

Για $GSI < 25$

$$s = 0$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (7)$$

5 Προετοιμασία Αριθμητικών Μοντέλων

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για τη διερεύνηση της γεωμηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα Phase2 της Rocscience. Με τη βοήθεια του προγράμματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της γεωμηχανικής συμπεριφοράς της βραχόμαζας στο κοίτασμα των «Μαύρων Πετρών» στην Βορειοανατολική Χαλκιδική που εκμεταλλεύεται η εταιρεία Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. Στο εν λόγω μεταλλείο γίνεται η εκμετάλλευση κοιτάσματος μικτών θειούχων μεταλλευμάτων μολύβδου, ψευδαργύρου και αργύρου σε περιεκτικότητες που δίδονται στη συνέχεια. Προϊόντα της εκμετάλλευσης αποτελούν ο σιδηροπυρίτης, ο γαληνίτης και ο σφαλερίτης. Οι υπόλοιποι σχηματισμοί που αναπτύσσονται στη περιοχή της εκμετάλλευσης είναι μάρμαρο, βιοτικικός - αμφιβολιτικός γνεύσιος, τεκτονικός αμφιβολίτης και αποτελούν την περιβάλλουσα το κοίτασμα βραχομάζα. Η υφιστάμενη μέθοδος που χρησιμοποιείται στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών είναι η «μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη φορά υπό συνθήκες συνήθων διαστάσεων στοάς». Το γεγονός αυτό σημαίνει πως μαζί με το μέταλλευμα και τους διάφορους σχηματισμούς που αναπτύσσονται στο μεταλλείο θα γίνει χρήση υλικού λιθογόμωσης. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τόσο του μεταλλεύματος, όσο και των διαφόρων σχηματισμών, καθώς και του υλικού λιθογόμωσης που είναι αναγκαία για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων παραθέτονται στη συνέχεια.

5.1 Υπολογιστικό Πρόγραμμα Phase της Rocscience (RS²)

Το πρόγραμμα H/Y Phase2 είναι ένας διδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα Phase2, περιλαμβάνουν:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξονοσυμμετρικά προβλήματα
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ.)

- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού (με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων).

Προετοιμασία Μοντέλου: Η προετοιμασία του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2 πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD. Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξη κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο βάρος των στοιχείων είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας είτε και τα δύο ταυτόχρονα.

Στάδια Εκσκαφής –Υποστήριξης: Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας προσομοιώνονται στο Phase2 μέσω σταδίων προσομοίωσης όπου είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους, και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης.

Ιδιότητες υλικών γεωμάζας: Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκάρσιως ισότροπο ή ορθότροπο.

Προκειμένου να αναλυθεί η πλαστική συμπεριφορά υλικών διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας. Πιο σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχομάζας είναι τα κριτήρια Mohr-Coulomb, Hoek-Brown και Drucker-Prager. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών πλαστικής συμπεριφοράς:

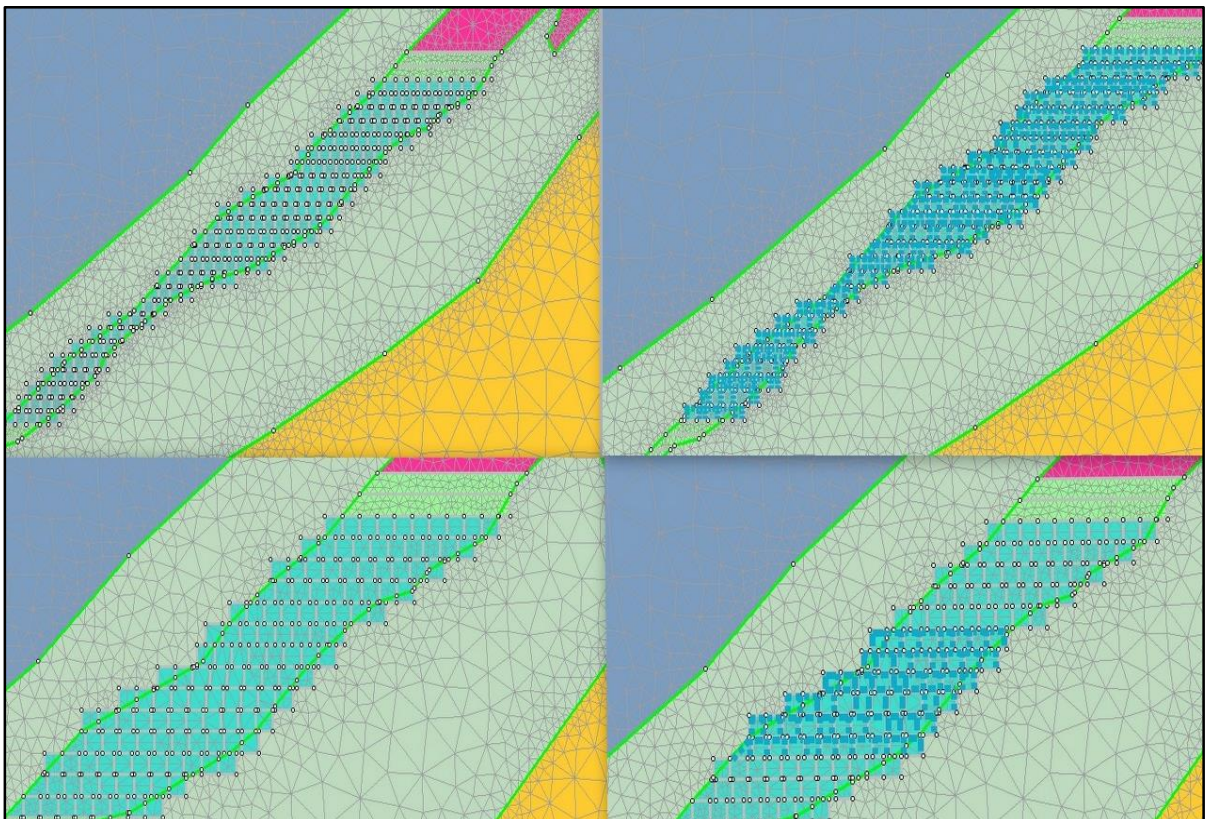
- Ελαστικά – τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές,

- Ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης.

5.2 Προσομοίωση στο Phase - Βασικά Μοντέλα

Προκειμένου να αναλυθεί η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας που περιβάλλει το κοίτασμα και να μελετηθούν αναλυτικά οι μετακινήσεις γύρω από την περιοχή της εκμετάλλευσης πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας κατάλληλες πλαστικές τασικές αναλύσεις, αριθμητικής προσομοίωσης των υφιστάμενων συνθηκών και των εργασιών εκμετάλλευσης. Βάσει των αναλύσεων αυτών γίνεται δυνατή η προσέγγιση του μεγέθους της ενδεχόμενης διαταραχής και των μετακινήσεων των σχηματισμών που περιβάλλουν το κοίτασμα. Ειδικότερα, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αξιολογήθηκαν πλαστικές τασικές αναλύσεις τόσο στην κλίμακα του μεταλλείου συνολικά, όσο και στην κλίμακα κάποιων διαδοχικών επιμέρους ορόφων εκμετάλλευσης του κοιτάσματος με δύο μοντέλα προσομοίωσης σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 10. Τα τέσσερα βασικά μοντέλα, στα τελικά στάδια εκμετάλλευσης. Στην πάνω σειρά: εκμετάλλευση χωρίς και με υποστήριξη. Στη κάτω σειρά: ομάδα διαδοχικών ορόφων χωρίς και με υποστήριξη.

Όσον αφορά την κλίμακα του μεταλλείου, με την πλαστική τασική ανάλυση καθίσταται δυνατή η προσέγγιση των συνθηκών που ενδέχεται να διαμορφωθούν στην περιβάλλουσα το κοίτασμα βραχομάζα, με τη συνέχιση της εκμετάλλευσης και κατά την ολοκλήρωσή της, σύμφωνα με την εφαρμογή της μεθόδου εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη φορά. Η προσομοίωση στο σύνολο του μεταλλείου, πραγματοποιήθηκε με δύο μοντέλα το πρώτο σε δυσμενείς συνθήκες χωρίς την εφαρμογή συστήματος υποστήριξης αλλά μόνο την πλήρωση των κενών με υλικό λιθογόμωσης και το δεύτερο με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (liner) αμέσως μετά την εκσκαφή και πριν την λιθογόμωση.

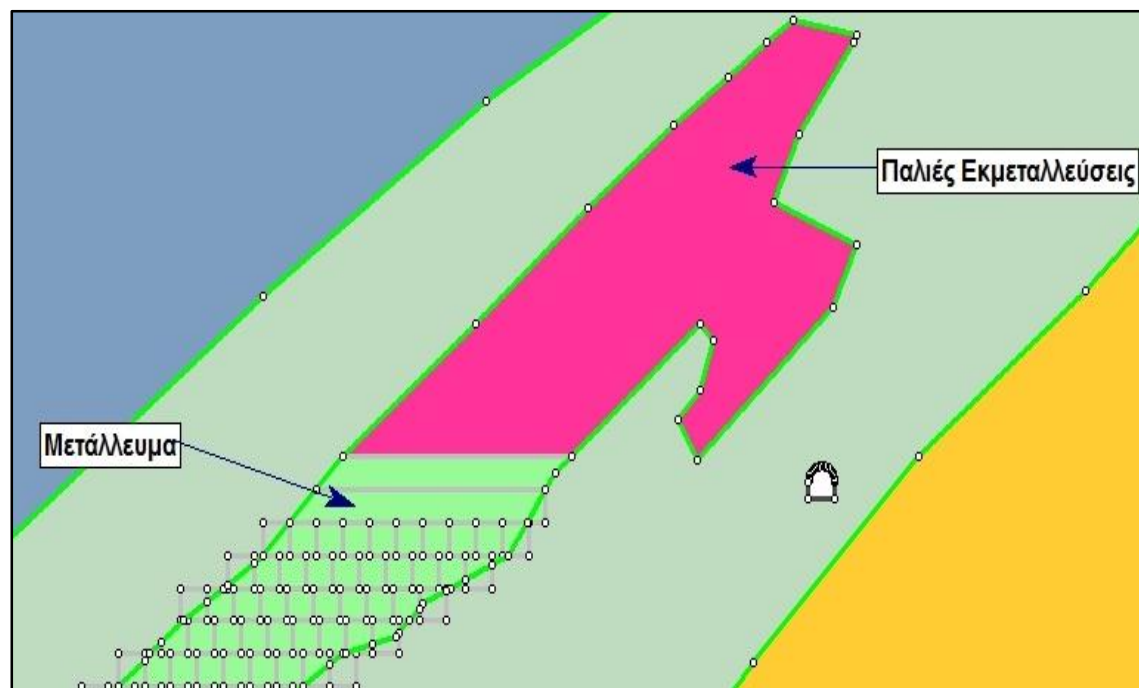
Αντίστοιχα, με την πλαστική τασική ανάλυση στην κλίμακα ομάδας ορόφων εκμετάλλευσης είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η διαταραχή που μπορεί να προκληθεί στην περιβάλλουσα των στοών εκμετάλλευσης, βραχομάζα με τη προχώρηση των εργασιών, λαμβάνοντας υπόψη αρχικά τη δυσμενή κατάσταση μη εφαρμογής μέτρων υποστήριξης των εν λόγω στοών, αλλά την προοδευτική λιθογόμωση τους σε κατάλληλο χρονικό πλαίσιο κατά την διάρκεια του κύκλου των εργασιών της εκμετάλλευσης και έπειτα σε άλλο μοντέλο με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέτρο υποστήριξης.

Για τον σχεδιασμό των βασικών μοντέλων προσομοίωσης τα στάδια που χρειάστηκαν για να ολοκληρωθεί το εκάστοτε μοντέλο διαφέρουν. Είναι 27 για την εκμετάλλευση χωρίς μέτρα υποστήριξης, 49 για την εκμετάλλευση με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, 25 για την εκμετάλλευση ομάδας διαδοχικών ορόφων χωρίς υποστήριξη και 37 για την ομάδα διαδοχικών ορόφων με υποστήριξη με χρήση liner. Οι διάφορες παραλλαγές που θα ακολουθήσουν με μεταβολές στις ιδιότητες του υλικού λιθογόμωσης θα βασιστούν στο πρώτο μοντέλο, οπότε τα στάδια θα είναι ίδια με εκείνο δηλαδή 27.

Για την εκμετάλλευση του κοιτάσματος σχεδιάστηκαν 25 όροφοι, στους οποίους περιλαμβάνονται στοές πλάτους 4m και ύψους 4m σε όλη την έκταση της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος. Η εκμετάλλευση των ορόφων γίνεται κατά ανερχόμενη φορά δηλαδή όταν ολοκληρωθεί η πλήρωση ενός ορόφου με υλικό λιθογόμωσης, τότε πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία στον υψομετρικά ανώτερο όροφο και ο λιθογομωμένος όροφος λειτουργεί ως νέο δάπεδο. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση των οροφών.

Σε κάθε στάδιο οι διαμήκεις στοές ορύσσονται παράλληλα μεταξύ τους και σε αξονικές αποστάσεις 12m, εφόσον καθίσταται δυνατό για το εκάστοτε πάχος του κοιτάσματος, (η οποία απόσταση μπορεί να αποτελείται από μέταλλευμα ή λιθογομωμένη στοά), αφενός προς εξασφάλιση των συνθηκών ευστάθειας και αφετέρου ώστε να παρέχεται περιθώριο παρέλευσης ικανού χρόνου απαραίτητου για την απόκτηση της απαιτούμενης αντοχής στο υλικό λιθογόμωσης, που φτάνει τα 4MPa σε διάρκεια 28 ημερών. Έπειτα διενεργείται εξόρυξη στην αμέσως επόμενη στοά εκμετάλλευσης. Η διαφορά στο ύψος που πρέπει να έχει ένας όροφος όπου εκτελούνται εργασίες με τον επόμενο εξορυσσόμενο όροφο είναι 8m, ενώ αποφεύγεται η εκσκαφή στοών στην ίδια κατακόρυφο για εξομάλυνση των τάσεων.

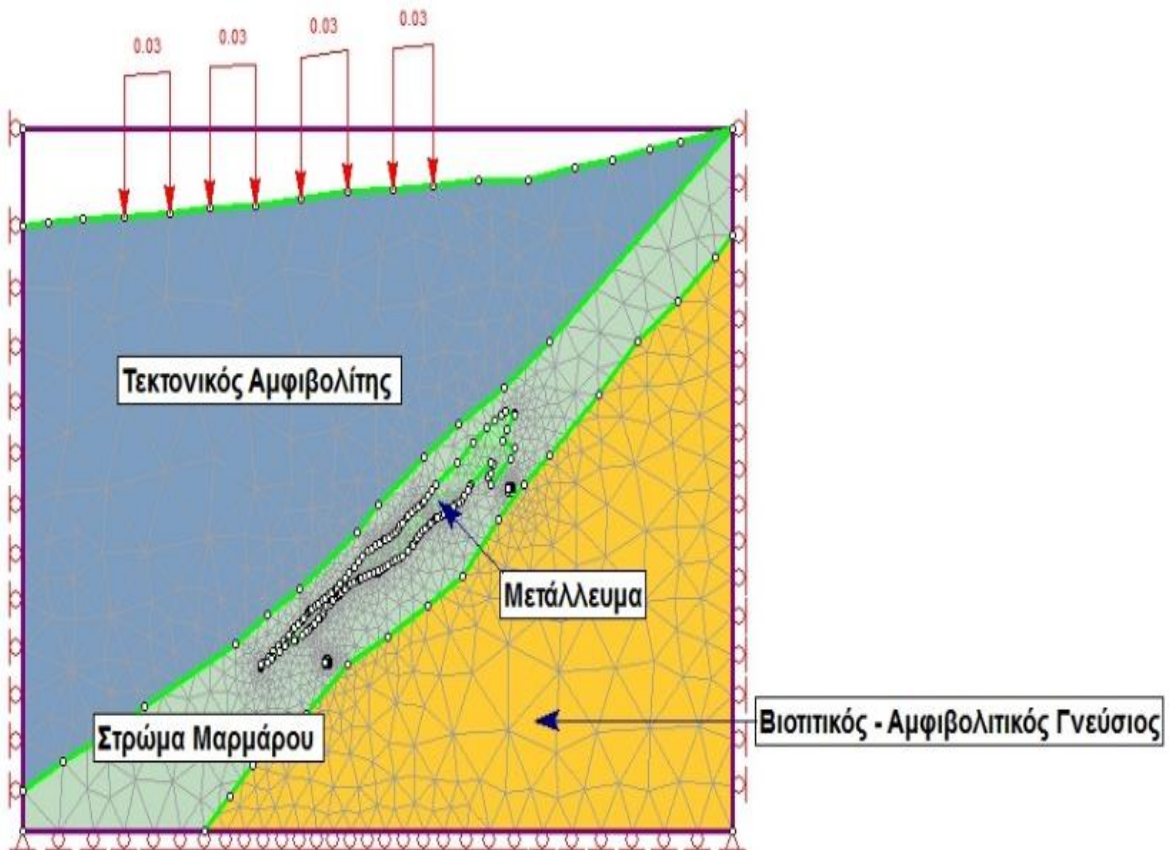
Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο ύπαρξης αρχαίων ή και παλαιότερων μη γνωστών εκμεταλλεύσεων, θεωρήθηκε δυσμενώς ότι στο ανώτερο τμήμα του κοιτάσματος έχει διενεργηθεί εκμετάλλευση και το τμήμα αυτό έχει πληρωθεί είτε με υλικό κατακρήμνισης, είτε με υλικό λιθογόμωσης. Οι ιδιότητες του υλικού αυτού είναι ίσες του 50% αυτών του στρώματος μαρμάρου.



Εικόνα 11. Ανώτερο υψομετρικά τμήμα του κοιτάσματος. Παλιότερες εκμεταλλεύσεις.

5.2.1 Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα του Μεταλλείου, χωρίς στοιχεία υποστήριξης

Στο συγκεκριμένο ομοίωμα θεωρήθηκε η τομή που αντιστοιχεί στην τετμημένη $X=+24950$, δηλαδή σε θέση δομημένης περιοχής. Στην εν λόγω θέση και στην άμεση περιοχή της, δεν έχουν εκδηλωθεί σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία καθιζήσεις στην επιφάνεια ή άλλης μορφής επιπτώσεις λόγω της έως σήμερα εκμετάλλευσης. Επιπροσθέτως, προκειμένου να προσδιορισθούν οι τυχόν επιδράσεις στην περιβάλλουσα βραχόμαζα, λόγω της συνέχισης της εκμετάλλευσης, με τη μέθοδο εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη γενική φορά, αναπτύχθηκε κατάλληλος αριθμός σταδίων στη προσομοίωση, στα οποία θεωρούνται οι προβλεπόμενες εργασίες εκμετάλλευσης, δηλαδή η διενέργεια όρυξης στοών εκμετάλλευσης σε διαδοχικούς ορόφους και ακολούθως η πλήρης λιθογόμωση των δημιουργούμενων κενών. Μέσω αυτού του ομοιώματος, προσομοιώνονται οι συνθήκες που είναι δυνατόν να διαμορφωθούν στην κλίμακα του μεταλλείου. Σε κάθε όροφο, διενεργείται η εκμετάλλευση ανάλογα με το πάχος του κοιτάσματος, είτε με διαμήκεις, κατά την παράταξη, στοές εκμετάλλευσης, είτε με εγκάρσιες, κατά την κλίση, στοές εκμετάλλευσης, οι οποίες ξεκινούν από τις στοές βάσης του κοιτάσματος και αναπτύσσονται μέχρι τα όρια της οροφής του. Στο μοντέλο αυτό όπου έχουμε πλήρη εκμετάλλευση των ορόφων μεταλλεύματος χωρίς χρήση υποστήριξης, τα στάδια προχωράνε με εκσκαφή και στη συνέχεια πλήρωση του κενού, μέχρι το σημείο που το μέταλλευμα στους ορόφους να αντικατασταθεί με το υλικό λιθογόμωσης. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 27 στάδια με ανερχόμενη φορά.



Εικόνα 12. Μορφή κοιτάσματος πριν την εκμετάλλευση και οι διάφοροι σχηματισμοί που το περιβάλλουν και το φορτίο από τον οικισμό της Στρατονίκης.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα όρια του κοιτάσματος και οι γεωλογικοί σχηματισμοί που το περιβάλλουν. Στο ανώτερο τμήμα έχουμε τεκτονικό αμφιβολίτη (σκούρο μπλέ), γύρω από το κοίτασμα αναπτύσσεται στρώμα μαρμάρου (γκρί χρώμα), κάτω από το κοίτασμα υπάρχει βιοιτικός – αμφιβολιτικός γνέυσιος (κίτρινο) και στο ανώτερο τμήμα του μεταλλεύματος έχουμε παρουσία παλαιότερων εκμεταλλεύσεων. Στην επιφάνεια φαίνεται και το φορτίο που επιφέρει στο μεταλλείο ο οικισμός της Στρατονίκης που βρίσκεται ακριβώς από πάνω του. Στη συνέχεια με τις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται καλύτερα το μετάλλευμα, οι όροφοι και οι στοές της εκμετάλλευσης και οι σχηματισμοί που την απαρτίζουν.

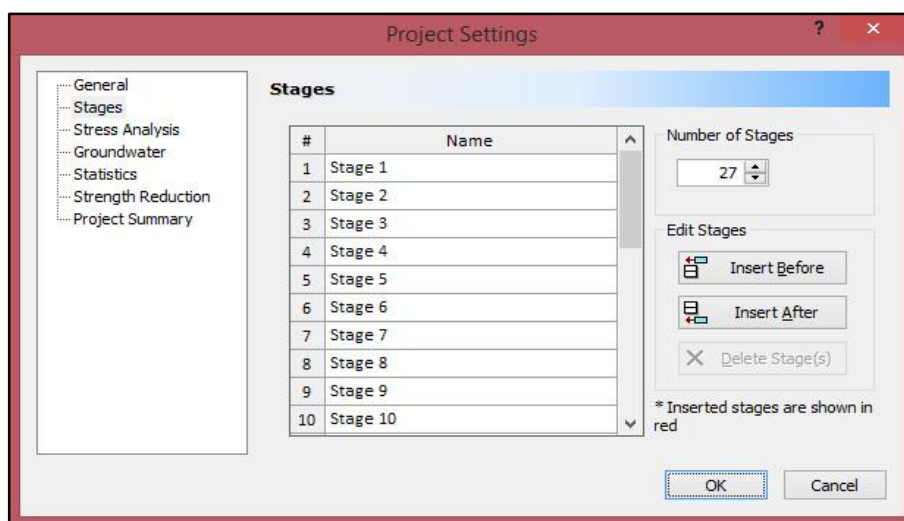
5.2.2 Αναλυτικός Σχεδιασμός Μοντέλου Προσομοίωσης

Αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα Phase²8.0 στον υπολογιστή και επιλέξουμε να δημιουργήσουμε ένα νέο μοντέλο, πραγματοποιούμε μια σειρά από ενέργειες όπως περιγράφονται παρακάτω.

5.2.2.1 Ρυθμίσεις Μοντέλου (Project Settings)

Όποτε δημιουργούμε ένα μοντέλο σε στάδια, πρώτα πρέπει να ορίσουμε τον αριθμό των σταδίων στο μενού των Ρυθμίσεων, αφού αυτό θα επηρεάσει τις επακόλουθες επιλογές του μοντέλου. Στα μοντέλα που θα δημιουργήσουμε το πρώτο στάδιο είναι το αρχικό γεωστατικό πεδίο και ο συνολικός αριθμός των μοντέλων ποικίλει. Το συγκεκριμένο μοντέλο που αφορά το ομοίωμα του μεταλλείου χωρίς υποστήριξη η εκμετάλλευση θα πραγματοποιηθεί σε 27 στάδια.

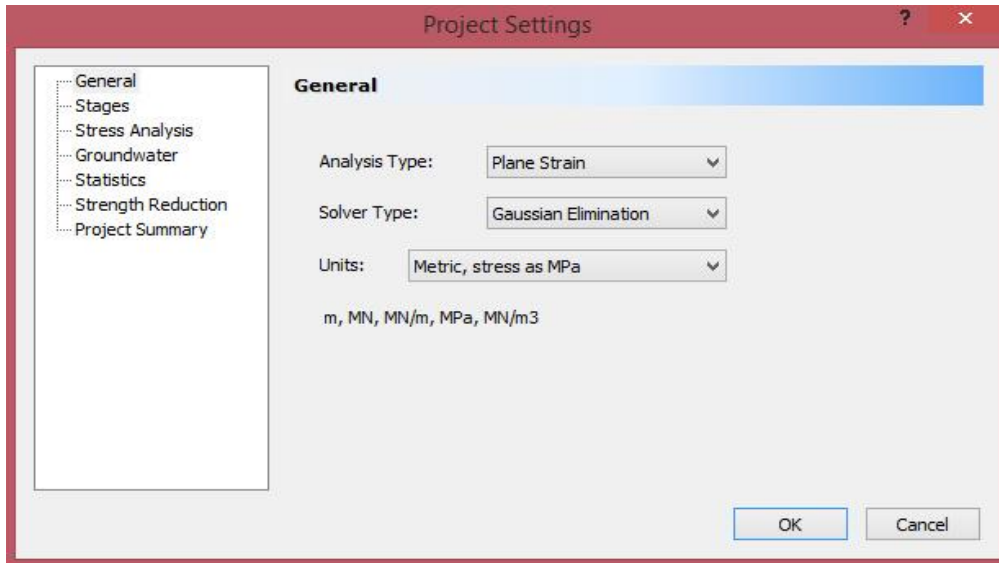
Επιλέγουμε: **Analysis** → **Project Settings** → **Stages**



Σχήμα 13. Αριθμός σταδίων εκσκαφής.

Επιπλέον στις ρυθμίσεις μοντέλου επιλέγουμε και κάποια γενικά στοιχεία σχετικά με το μοντέλο. Πρέπει να τονίσουμε την αναγκαιότητα του στην επιλογή της μονάδας να έχει οριστεί Metric, stress as MPa. Αυτό καθορίζει τις μονάδες μήκους, δύναμης, αντοχής και βάρους που θα χρησιμοποιηθούν στην διάρκεια προσομοίωσης της εκσκαφής. Ως τύπο ανάλυσης επιλέγουμε επίπεδη παραμόρφωση (plane strain).

Επιλέγουμε: **Analysis** → **Project Settings** → **General**



Σχήμα 14. Γενικά στοιχεία του προγράμματος.

5.2.2.2 Δημιουργία Ορίων Εκσκαφής (Boundaries)

Για την δημιουργία των ορίων της εκσκαφής χρειάζονται να προστεθούν τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Προσθήκη Εκσκαφής: Τα όρια της εκσκαφής πάντα αντιπροσωπεύουν το τελικό στάδιο μιας εκσκαφής για μοντέλα όπου η εκσκαφή γίνεται σε περισσότερα από ένα στάδια.

Επιλέγουμε: **Boundaries** → **Add** → **Excavation** και στη συνέχεια εισάγουμε τις συντεταγμένες. Χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τον σχεδιασμό των στοών προσπέλασης.

2. Προσθήκη Εξωτερικού Ορίου: Με τον τρόπο αυτό ορίζουμε την γεωμετρία της τομής στο εσωτερικό της οποίας θα εισάγουμε το κοίτασμα και τους διάφορους σχηματισμούς που το περιβάλλουν και όπου θα σχεδιαστεί το μεταλλείο με τις στοές εκμετάλλευσης (παραλληλόγραμμο σχήμα).

Επιλέγουμε: **Boundaries** → **Add** → **External**.

3. Προσθήκη Υλικού: Ο σχεδιασμός των διαφόρων σχηματισμών που απαρτίζουν την εκσκαφή όπως είναι ο τεκτονικός αμφιβολίτης, το στρώμα μαρμάρου, το μέταλλευμα (κοίτασμα), ο βιοτιτικός – αμφιβολιτικός γνεύσιος γίνεται με την βοήθεια σημείων σε άξονες X και Y.

Επιλέγουμε: **Boundaries** → **Add** → **Material**.

4. Προσθήκη Σταδίων Εκμετάλλευσης: Στο σημείο αυτό χωρίζουμε το κοίτασμα σε ορόφους εκμετάλλευσης και έπειτα σε στοές με γεωμετρία 4m ύψους και

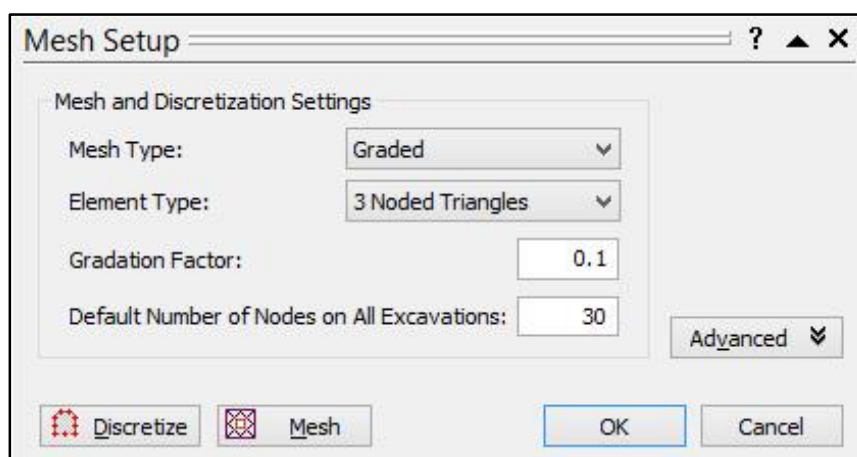
4m πλάτους. Όπως αναφέρθηκε, στα μοντέλα για την εκμετάλλευση του κοιτάσματος σχεδιάστηκαν 25 όροφοι.

Επιλέγουμε: **Boundaries** → **Add** → **Stage**.

5.2.2.3 Δημιουργία Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων (Meshing)

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δύο βήματα. Αρχικά γίνεται διακριτοποίηση των ορίων της εκσκαφής και στη συνέχεια η δημιουργία του πλέγματος.

1. Διακριτοποίηση ορίων εκσκαφής (Discretize): Πριν την παραγωγή του πλέγματος μπορούμε να καθορίσουμε τις διάφορες παραμέτρους δημιουργίας του. Επιλέγουμε: **Mesh** → **Setup**



Σχήμα 15. Επιλεγμένο πλέγμα.

Τώρα θα διακριτοποιήσουμε τα όρια. Επιλέγουμε: **Mesh**→**Discretize**. Η διακριτοποίηση των ορίων θα διαμορφώσει το πλαίσιο για το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Υποδεικνύεται από κόκκινους σταυρούς πάνω στα όρια. Παρατηρούμε ότι διακριτοποιούνται όλα τα σύνορα του μοντέλου, ενώ στην περιοχή που εμφανίζονται οι πληροφορίες, στο κάτω μέρος του παραθύρου του προγράμματος, δίνεται ο συνολικός αριθμός των διακριτοποιήσεων για κάθε τύπο συνόρου

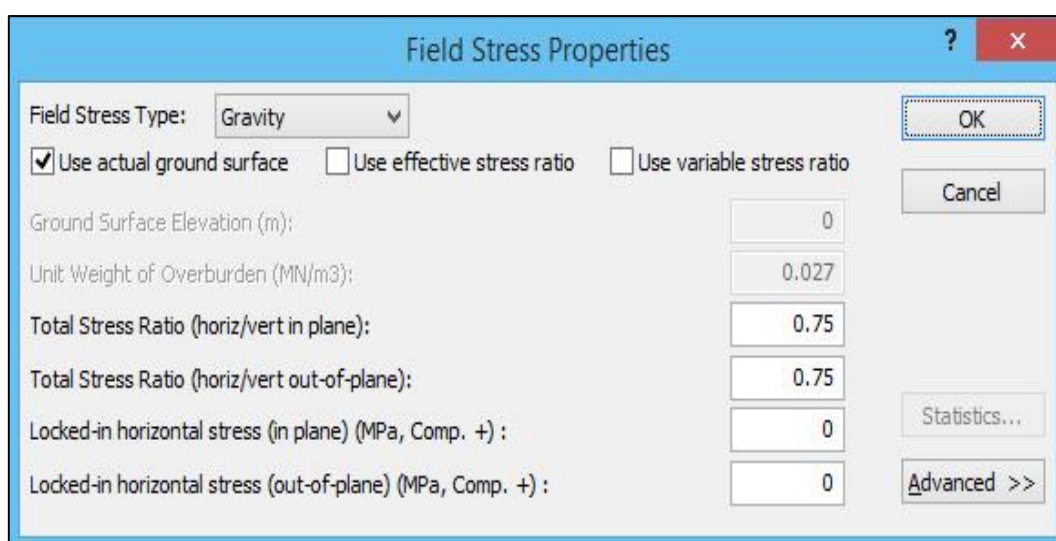
2. Δημιουργία πλέγματος (Mesh): Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται με βάση τη διακριτοποίηση που έχει γίνει, χωρίς άλλη επέμβαση από το χρήστη. Στην περιοχή εμφάνισης πληροφοριών εμφανίζεται ο συνολικός αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων.

5.2.2.4 Συνοριακές Συνθήκες (Boundary onditions)

Όταν δημιουργείται το πλέγμα, όλοι οι κόμβοι του εξωτερικού ορίου είναι προκαθορισμένο να έχουν μηδενική μετατόπιση. Αυτό εμφανίζεται ως ένα τριγωνικό σύμβολο που βλέπουμε σε κάθε κόμβο του εξωτερικού ορίου. Εφόσον ένα τμήμα του εξωτερικού ορίου του μοντέλου βρίσκεται στην επιφάνεια, πρέπει να ορίσουμε ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. Επιλέγουμε: **Restraints** → **Free** και με το ποντίκι επιλέγουμε τα τμήματα του εξωτερικού ορίου που βρίσκονται στην επιφάνεια.

5.2.2.5 Τασικό πεδίο (Field stress)

Στο πρόγραμμα Phase2 το τασικό πεδίο μπορεί να καθοριστεί μέσω των κυρίων τάσεων ή μέσω της βαρύτητας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε επιλέξει την δεύτερη περίπτωση (Gravity). Επιλέγουμε: **Loading** → **Field stress** εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο όπου διαμορφώνουμε τις επιλογές που μας παρέχει ανάλογα με τις ανάγκες μας. Το k , ο λόγος των οριζόντιων προς των κατακόρυφων τάσεων, στο συγκεκριμένο μοντέλο παίρνει την τιμή 0.75.



Σχήμα 16. Τασικό πεδίο εκσκαφής

5.2.2.6 Ιδιότητες των Υλικών

Το κομμάτι των ιδιοτήτων αφορά αρχικά στον καθορισμό των ιδιοτήτων των σχηματισμών όπως τη βραχώμαζα που περιβάλλει το κοίτασμα, το μέταλλευμα και το υλικό της λιθογόμωσης το οποίο θα αντικαταστήσει το μέταλλευμα. Επίσης στα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέσο υποστήριξης είναι αναγκαίο ο καθορισμός των ιδιοτήτων του. Όλες οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στα διάφορα μοντέλα δίδονται στους πίνακες που προηγήθηκαν στο κεφάλαιο 4.5. Επιλέγουμε: **Properties** → **Define materials** και δημιουργούμε τα 5 υλικά το μέταλλευμα, το στρώμα μαρμάρου, τον βιοτιτικός – αμφιβολιτικός γνεύσιος, τον τεκτονικός αμφιβολίτης, τις παλιές εκμεταλλεύσεις και το υλικό λιθογόμωσης, αλλάζοντας τις πληροφορίες που έχουμε για το καθένα και αλλάζοντας το όνομα. Οι τελικές καρτέλες παραθέτονται στο προσάρτημα της παρούσας εργασίας και έχουν την παρακάτω μορφή :

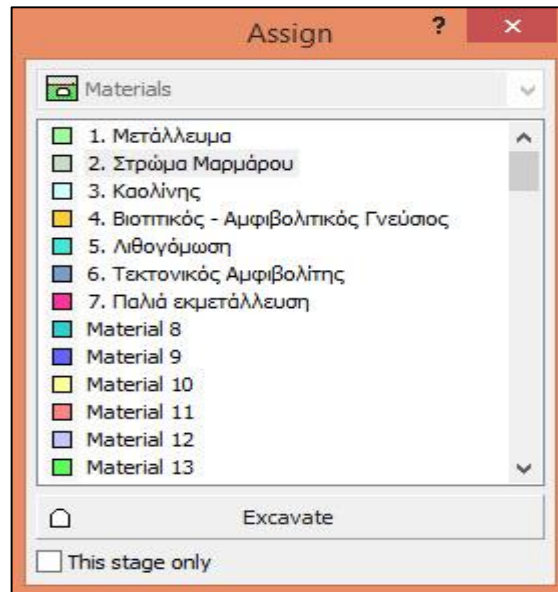
The screenshot shows the 'Define Material Properties' dialog box for material '1. Μετάλλευμα'. The dialog is organized into several sections:

- Material Identification:** Name: 1. Μετάλλευμα, Material Color: (green), Initial Element Loading: Field Stress & Body Force, Unit Weight: 0.028 (MN/m3).
- Elastic Properties:** Elastic Type: Isotropic, Poisson's Ratio: 0.35, Young's Modulus (MPa): 2250, Young's Modulus (resid) (MPa): 20000, E1 (MPa): 20000, E2 (MPa): 20000, E3 (MPa): 20000, ν12: 0.2, ν13: 0.2, ν23: 0.2.
- Strength Parameters:** Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown, Material Type: Plastic, Intact Comp. Strength (MPa): 50, Dilatation Parameter: 0, mb Parameter (peak): 2.15893, mb Parameter (resid): 2.15893, s Parameter (peak): 0.00073, s Parameter (resid): 0.00073, a Parameter (peak): 0.51595, a Parameter (resid): 0.51595.
- Advanced Properties:** Stage Properties (unchecked), Datum Dependent (unchecked), Unsaturated Shear Strength (Phi b: 0, Air Entry (MPa): 0).

At the bottom, there are buttons for 'Copy To...', 'Statistics...', 'Show only properties used in model' (checked), 'OK', and 'Cancel'.

Σχήμα 17. Παράθυρο προσδιορισμού ιδιοτήτων των σχηματισμών που συναντώνται στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών.

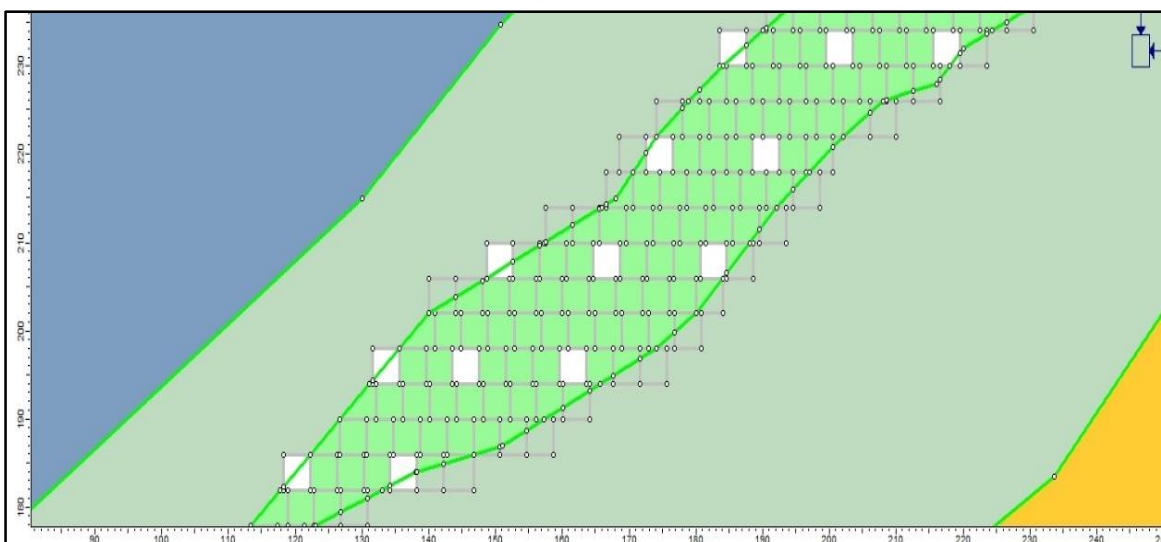
Έπειτα ακολουθεί η ανάθεση των υλικών αυτών στα διάφορα στάδια της διάνοιξης μας βάση του μοντέλου εκσκαφής. Επιλέγουμε: **Properties** → **Assign Properties** και παρουσιάζεται το παρακάτω παράθυρο.



Σχήμα 18. Ανάθεση των σχηματισμών και διάνοιξη των στοών εκμετάλλευσης.

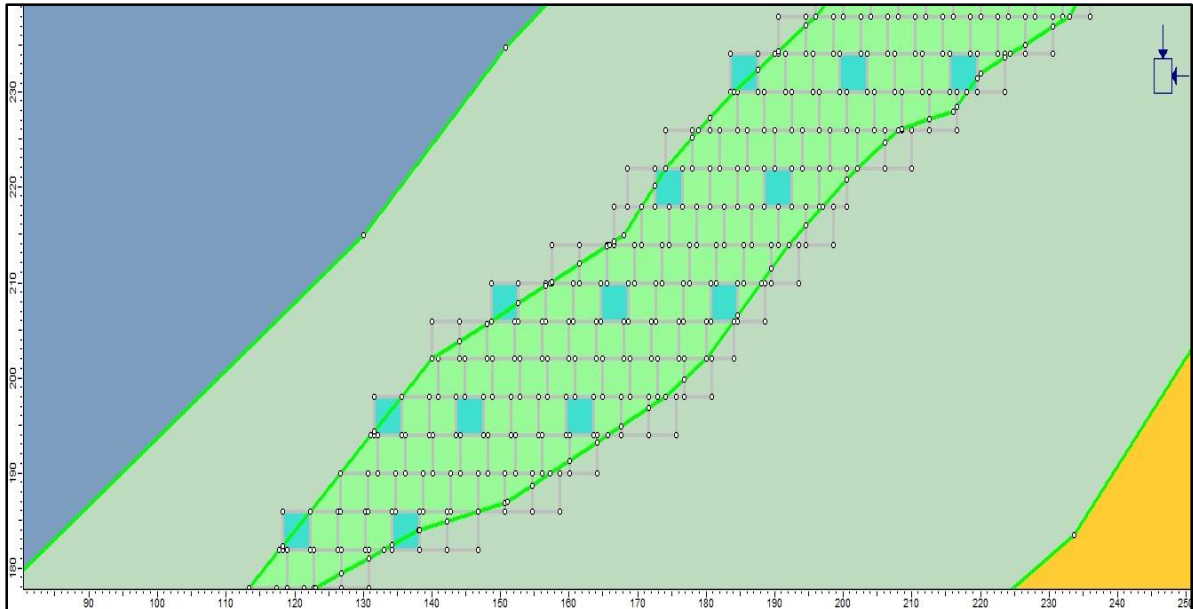
5.2.2.7 Σχεδιασμός

Κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου επιλέγουμε **Excavate** για να προσομοιώσουμε την όρυξη των στοών σταδιακά σύμφωνα με την μέθοδο εκμετάλλευσης των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων κατά ανερχόμενη φορά. Η εκσκαφή ξεκινά από κάτω προς τα πάνω και σε κάθε υψομετρικό όροφο αδειάζουμε μία στοά και η αμέσως επόμενη απέχει 12m δηλαδή 3 στοές των 4m πλάτους και σε ύψος απέχει 2 ορόφους δηλαδή 8m ενώ αποφεύγεται η όρυξη στοών στην ίδια κατακόρυφο.

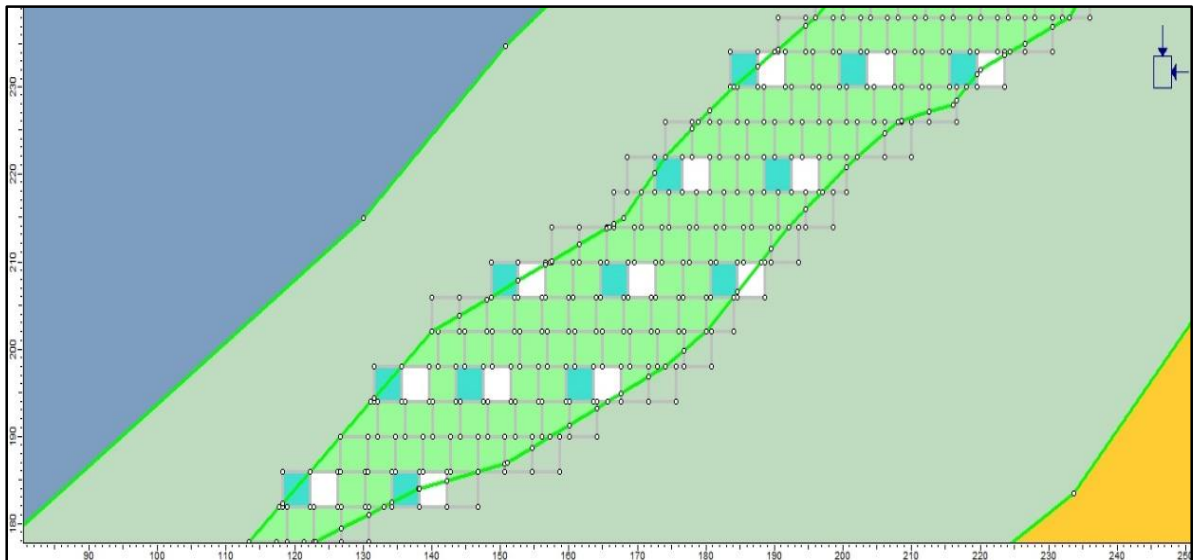


Εικόνα 13. Εκσκαφή στοών εκμετάλλευσης στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια στο επόμενο στάδιο γεμίζονται τα κενά (εξορυσσόμενες στοές) με το υλικό λιθογόμωσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Επιλέγουμε: **Properties** → **Assign Properties** → **Λιθογόμωση**. Έπειτα ακολουθούνται τα ίδια βήματα και σε 27 στάδια ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση του κοιτάσματος με την πλήρη αντικατάσταση του μεταλλεύματος με το υλικό πλήρωσης.

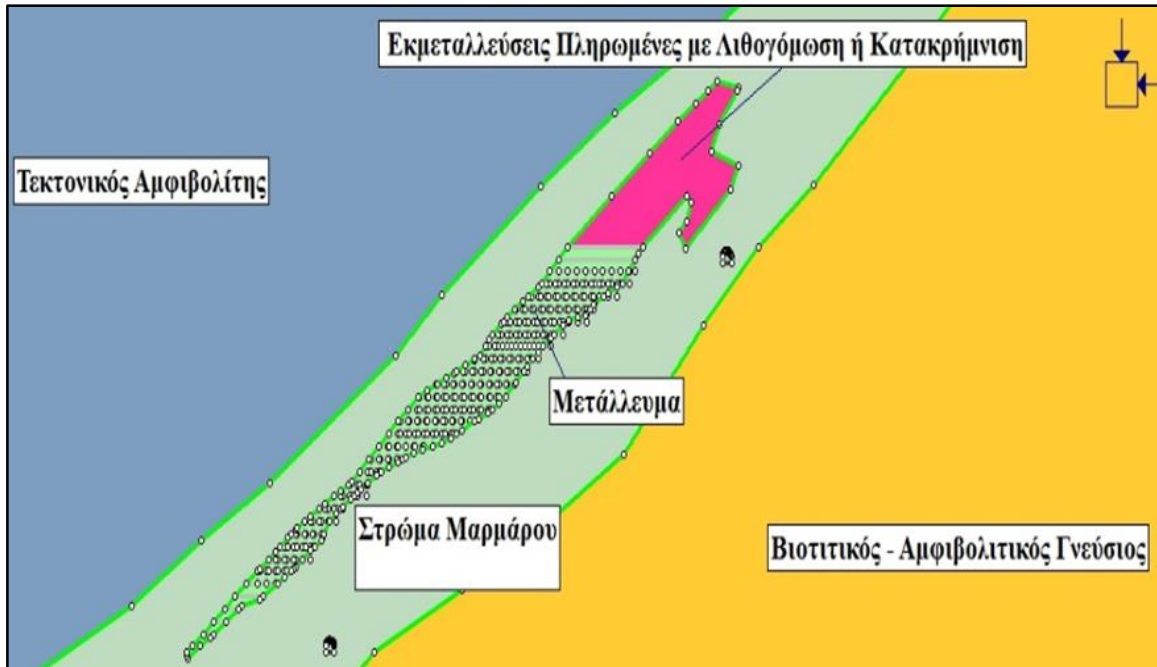


Εικόνα 14. Πλήρωση των κενών στοών με το υλικό λιθογόμωσης (γαλάζιο χρώμα). Στάδιο 3^ο της προσομοίωσης.

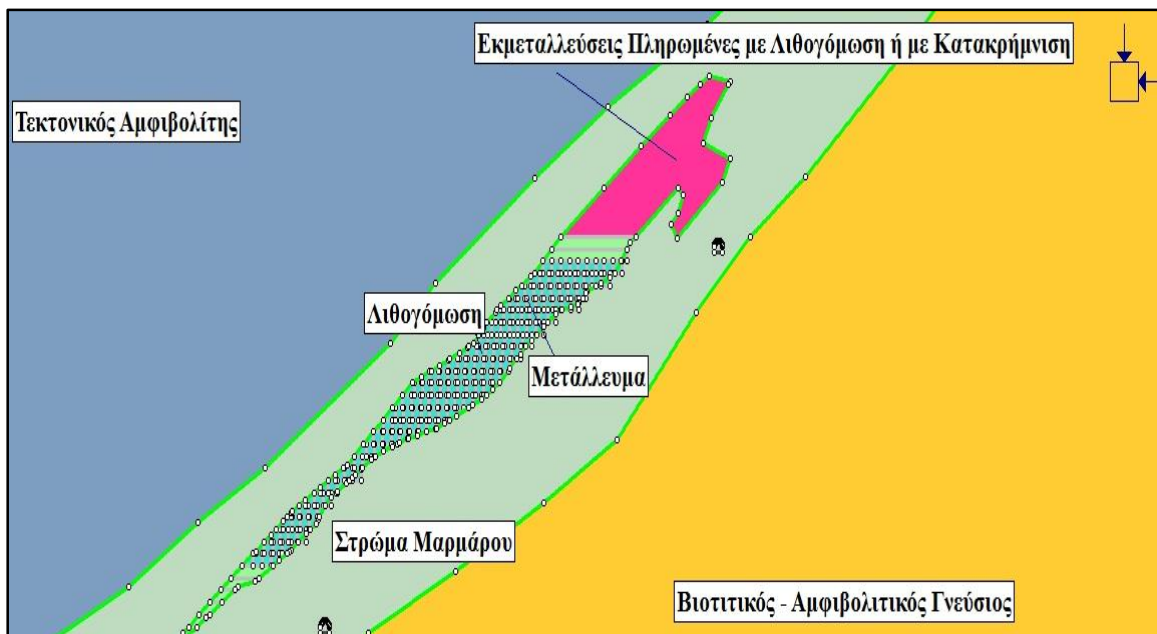


Εικόνα 15. Εκσκαφή των αμέσως διπλανών στοών των εκάστοτε ορόφων ώστε να συνεχιστεί η εκμετάλλευση.

Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση και το μοντέλο είναι έτοιμο για ανάλυση. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η συνολική έκταση του μεταλλείου με όλους τους σχηματισμούς που το απαρτίζουν πριν και μετά τα στάδια της εκμετάλλευσης.



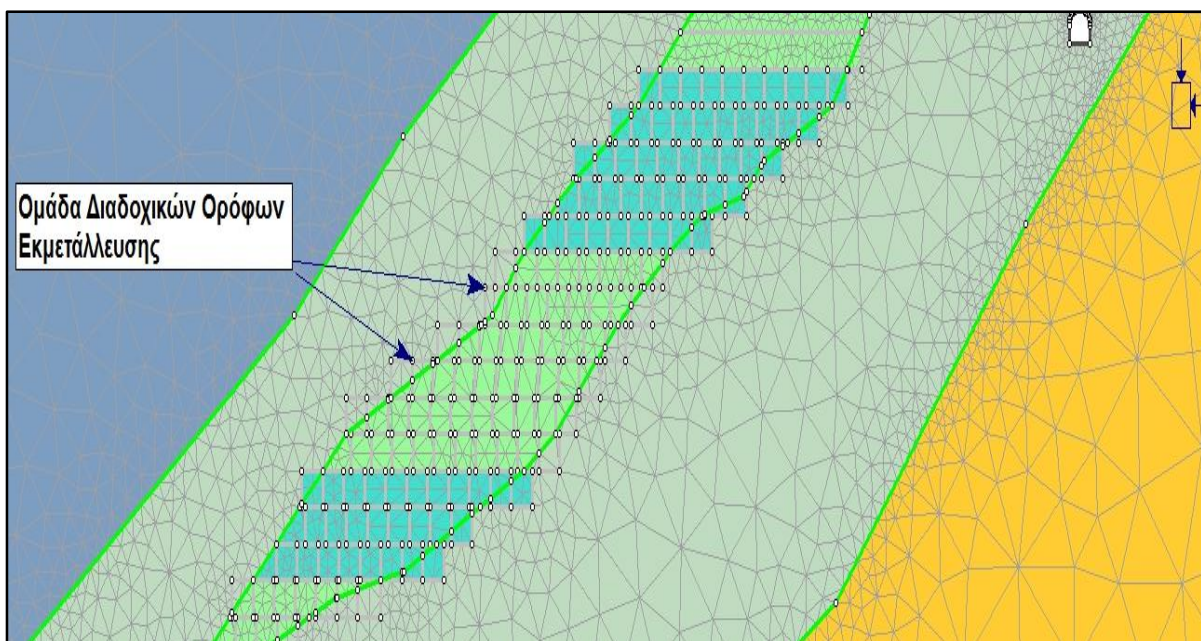
Εικόνα 16. Μεταλλείο των Μαύρων Πετρών πριν τις διαδικασίες εκμετάλλευσής στο στάδιο 1.



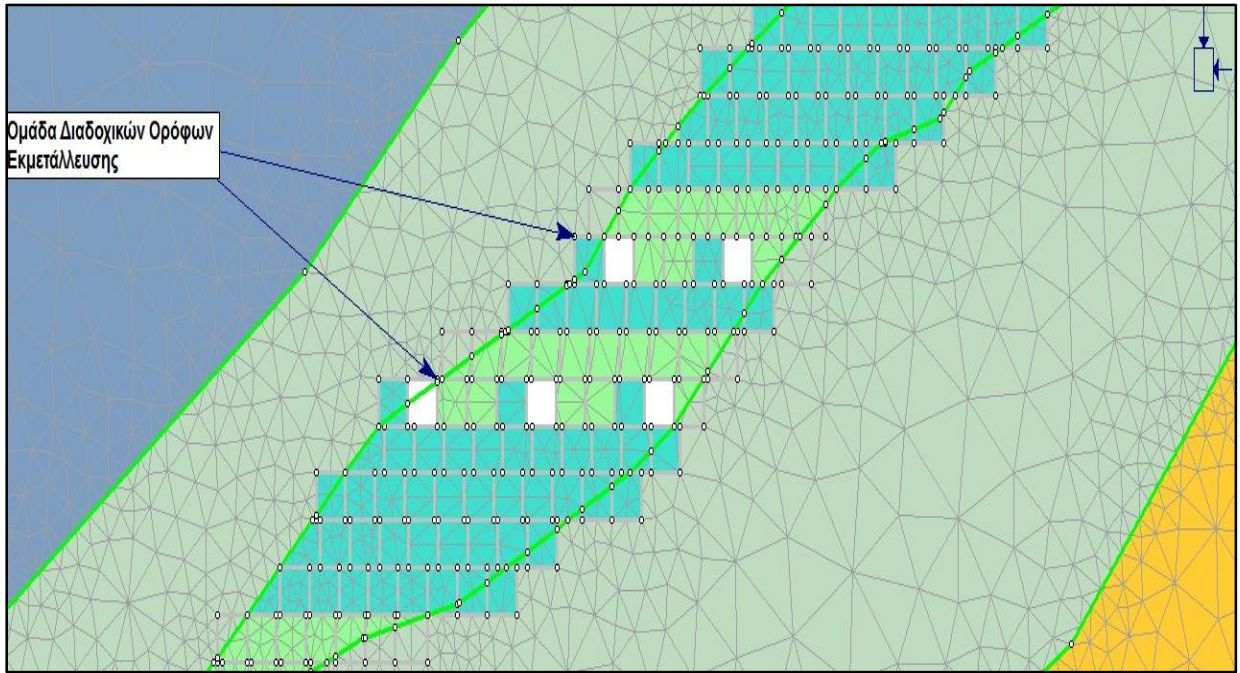
Εικόνα 17. Τελικό στάδιο εκμετάλλευσης και πλήρωση των κενών με υλικό λιθογόμωσης, στάδιο 27 προσομοίωσης.

5.2.3 Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα Ομάδας Διαδοχικών Ορόφων Εκμετάλλευσης, χωρίς στοιχεία υποστήριξης

Προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση που δύναται να έχει η εκμετάλλευση στα πετρώματα γύρω από το κοίτασμα, αναπτύχθηκε κατάλληλο ομοίωμα στο οποίο θεωρείται περιοχή κεντρικά του κοιτάσματος, η οποία αποτελείται από ομάδα 6 ορόφων στους οποίους ορύσσονται οι επιμέρους στοές εκμετάλλευσης. Το ανώτερο και κατώτερο υψομετρικά τμήμα, θεωρείται ως ήδη εξοφλημένο και πληρωμένο με λιθογόμωση όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν. Στο εν λόγω ομοίωμα θεωρείται η αλληλουχία όρυξης στοών εκμετάλλευσης κατά ανερχόμενη γενική φορά όπως και στα υπόλοιπα ομοιώματα. Προκειμένου να εξετασθεί το ενδεχόμενο εκδήλωσης αστοχίας στις στοές εκμετάλλευσης και να εκτιμηθεί η μέγιστη δυνατή διαταραχή που δύναται να προκληθεί στα περιβάλλοντα το κοίτασμα πετρώματα, θεωρήθηκε στο εν λόγω ομοίωμα ότι δεν εφαρμόζονται στοιχεία υποστήριξης. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι μετά την όρυξη των στοών εκμετάλλευσης και πριν από τη διενέργεια της λιθογόμωσης δεν εφαρμόζονται μέτρα υποστήριξης. Βεβαίως, πριν από την όρυξη των επόμενων στοών εκμετάλλευσης, διενεργείται η απαιτούμενη λιθογόμωση. Η μη εφαρμογή στοιχείων υποστήριξης πραγματοποιείται προκειμένου να εξετασθεί το δυσμενέστερο ενδεχόμενο και να εκτιμηθεί το μέγεθος της ενδεχόμενης διαταραχής της περιβάλλουσας το κοίτασμα βραχώμαζας και κατ' επέκταση το μέγεθος της επιρροής λόγω της εκμετάλλευσης.



Εικόνα 18. Κλίμακα ομάδας στοών με εκμετάλλευση κοπής και λιθογόμωσης με ανερχόμενη φορά. Δάπεδο και οροφή πλήρως λιθογομωμένα. Στάδιο 1°.



Εικόνα 19. Προσομοίωση σε ομάδα στοών του μεταλλείου. Στάδιο 12°.

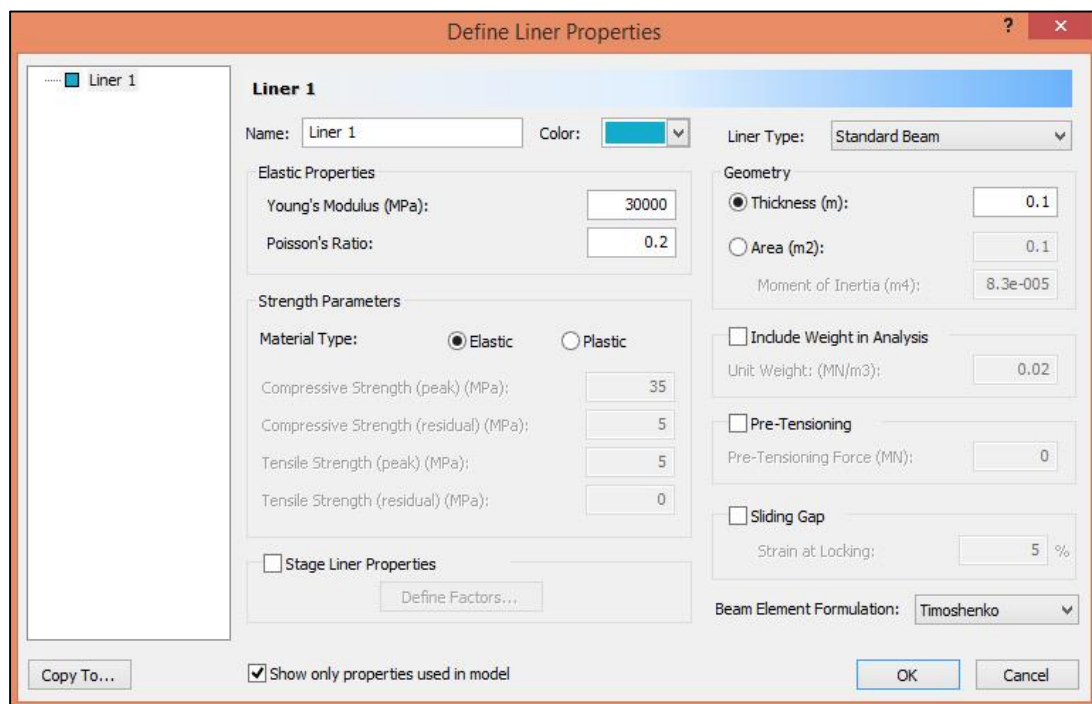


Εικόνα 20. Στοές υπό εκμετάλλευση σε ανώτερο υψομετρικά επίπεδο, λιθογόμωση ως δάπεδο και ανώτερη περιοχή πλήρως εξοφλημένη και λιθογομμωμένη. Στάδιο 22°.

5.2.4 Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα του Μεταλλείου, με χρήση Στοιχείων Υποστήριξης

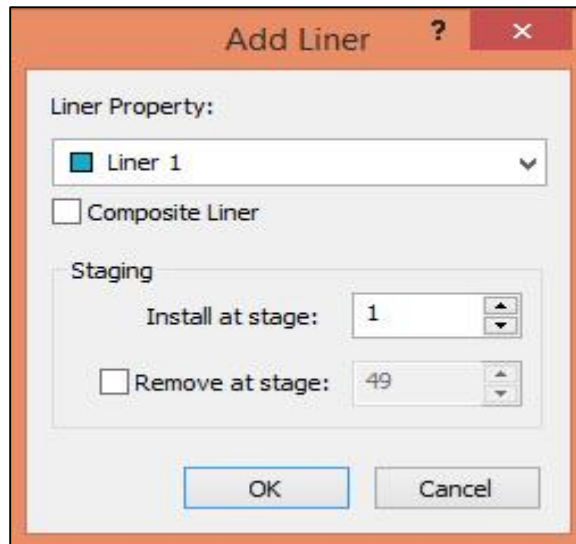
Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση που δύναται να έχει η εκμετάλλευση στα πετρώματα γύρω από το κοίτασμα σε πιο ευνοϊκές συνθήκες από άποψη υποστήριξης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με χρήση μέτρων υποστήριξης στο σύνολο των στοών εκμετάλλευσης του μεταλλείου. Συγκεκριμένα έγινε χρήση liner, δηλαδή στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος για υποστήριξη αμέσως μετά την εξόρυξη και πριν ακολουθήσει η πλήρωση των κενών με το υλικό της λιθογόμωσης. Στο μοντέλο αυτό πραγματοποιήθηκαν παραπάνω στάδια, 49 στον αριθμό, καθώς έγινε χρήση υποστηρικτικών μέτρων που σημαίνει περισσότερα στάδια στον κύκλο εργασιών της εκμετάλλευσης.

Όσον αφορά τον σχεδιασμό και την προσθήκη των στοιχείων υποστήριξης και συγκεκριμένα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, στις εξορυσσόμενες στοές, πραγματοποιήθηκαν στο Phase τα εξής βήματα: Για να ορίσουμε τις ιδιότητες του σκυροδέματος επιλέγουμε: **Properties** → **Define Liners** όπου εμφανίζεται το παράθυρο με τις ιδιότητες.



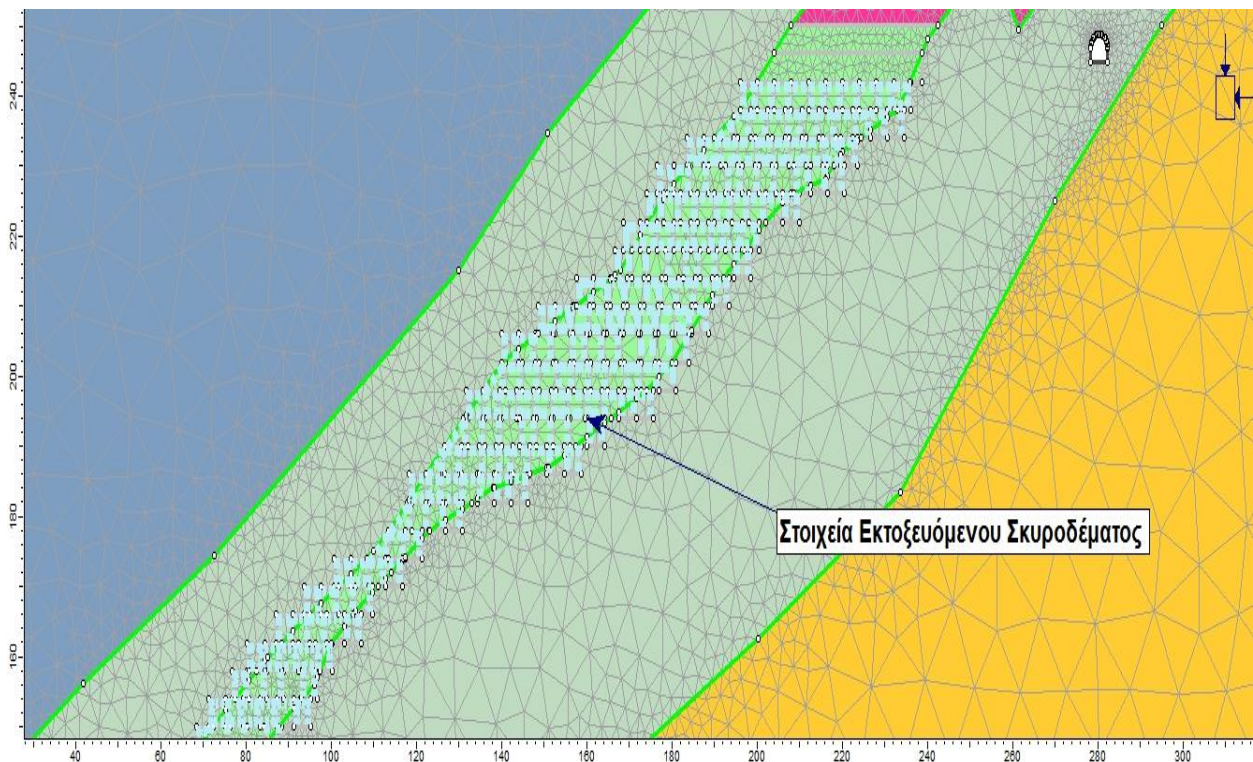
Σχήμα 19. Παράθυρο ιδιοτήτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος (liner)

Στη συνέχεια για να τοποθετήσουμε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στα κατάλληλα στάδια μετά την εκσκαφή και πριν την λιθογόμωση επιλέγουμε: **Support** → **Add Liner**, και εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο.

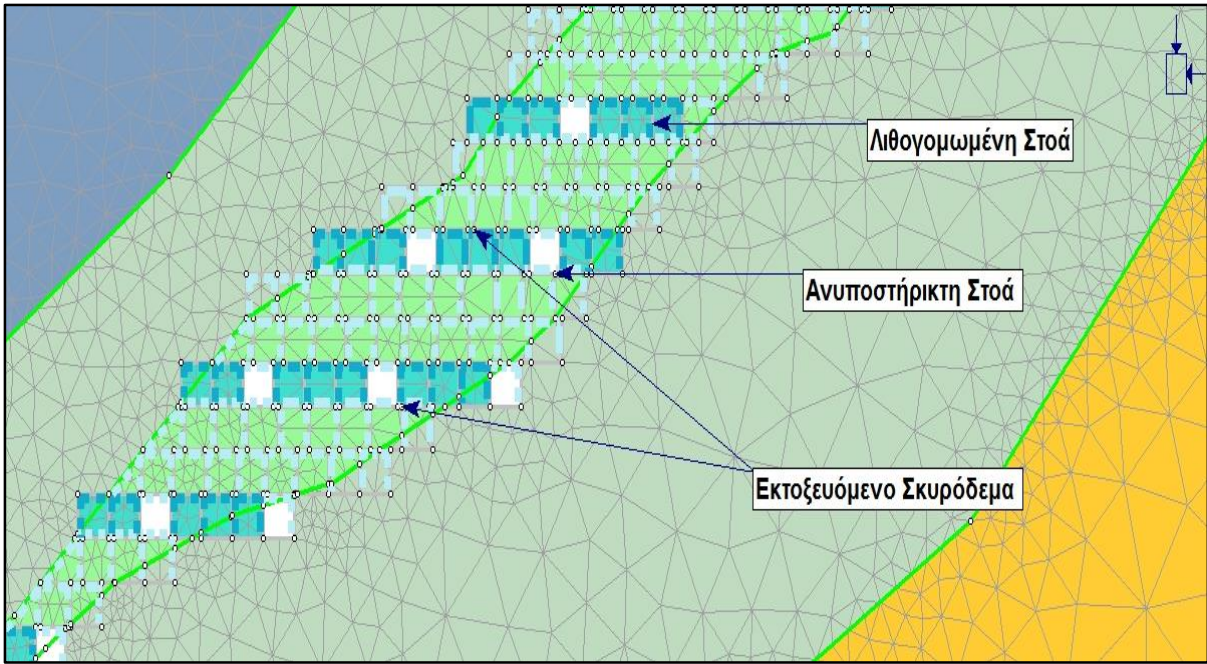


Σχήμα 20. Τοποθέτηση υποστηρικτικών μέτρων (liner) στις εξορυσσόμενες στοές.

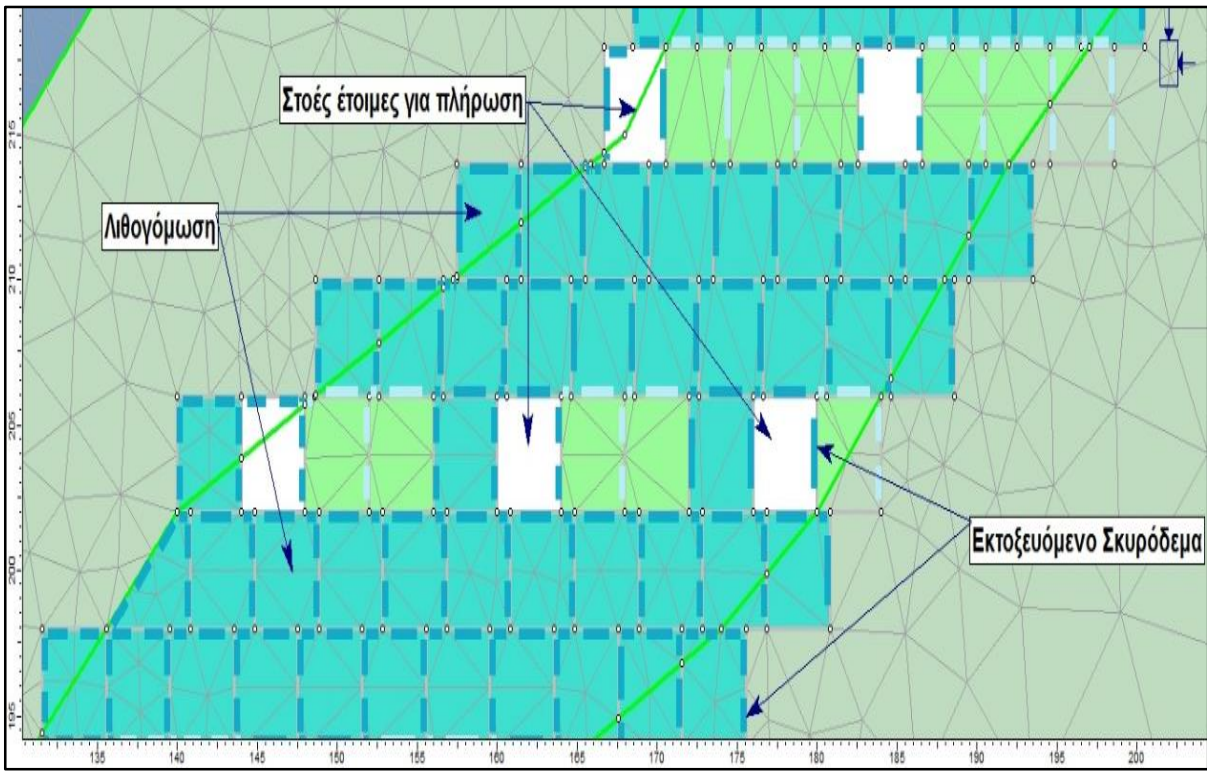
Με τον τρόπο αυτό τοποθετείται η υποστήριξη (μπλε χρώμα) σε όλη την έκταση της εκμετάλλευσης αμέσως μετά την εκσκαφή των εκάστοτε στοών. Ακολουθεί η λιθογόμωση μέχρι να ολοκληρωθεί η εξόρυξη του μεταλλεύματος όπως φαίνεται στα διάφορα στάδια της εκμετάλλευσης, στις εικόνες που ακολουθούν.



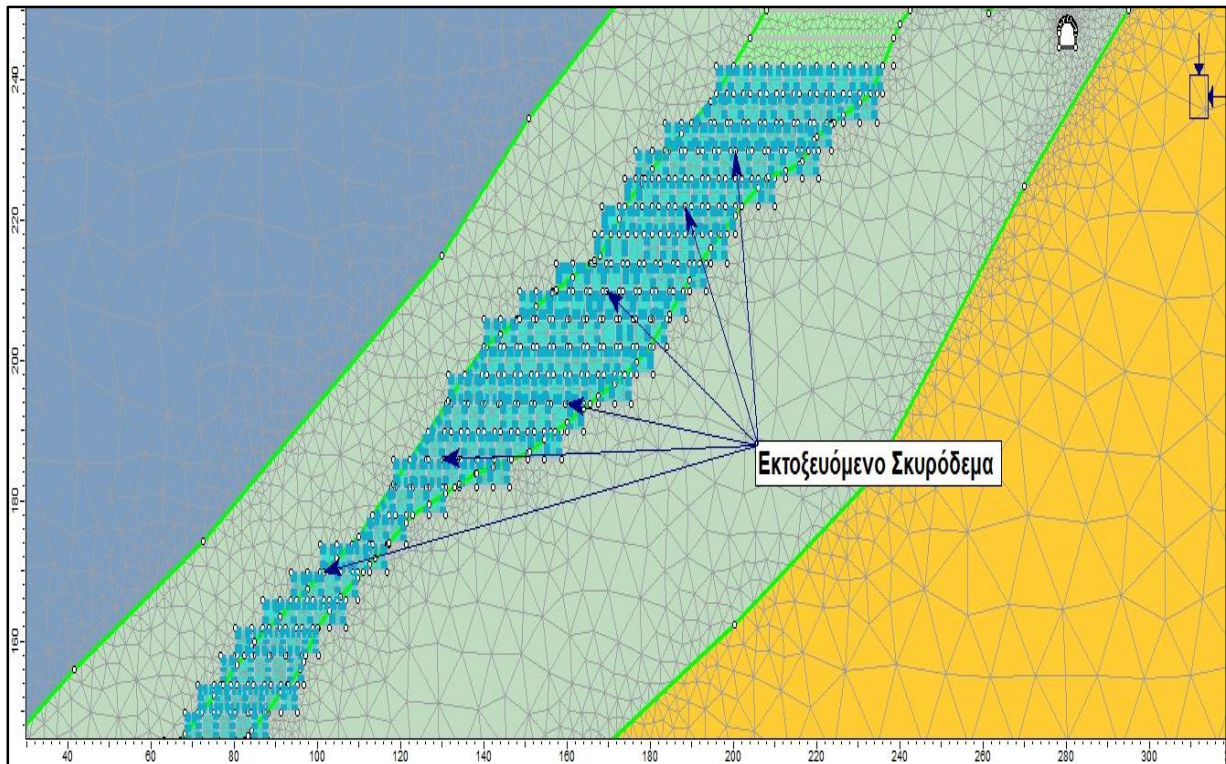
Εικόνα 21. Στάδιο 1^ο της εκμετάλλευσης με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα προστεθεί στα επόμενα βήματα.



Εικόνα 22. Στάδο 11, ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης των αρχικών ορόφων με εκσκαφή, υποστήριξη και λιθογώμωση.



Εικόνα 23. Στάδιο 30 της προσομοίωσης. Λιθογωμμένες στοές και άλλες υποστηριζόμενες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έτοιμες για λιθογώμωση.

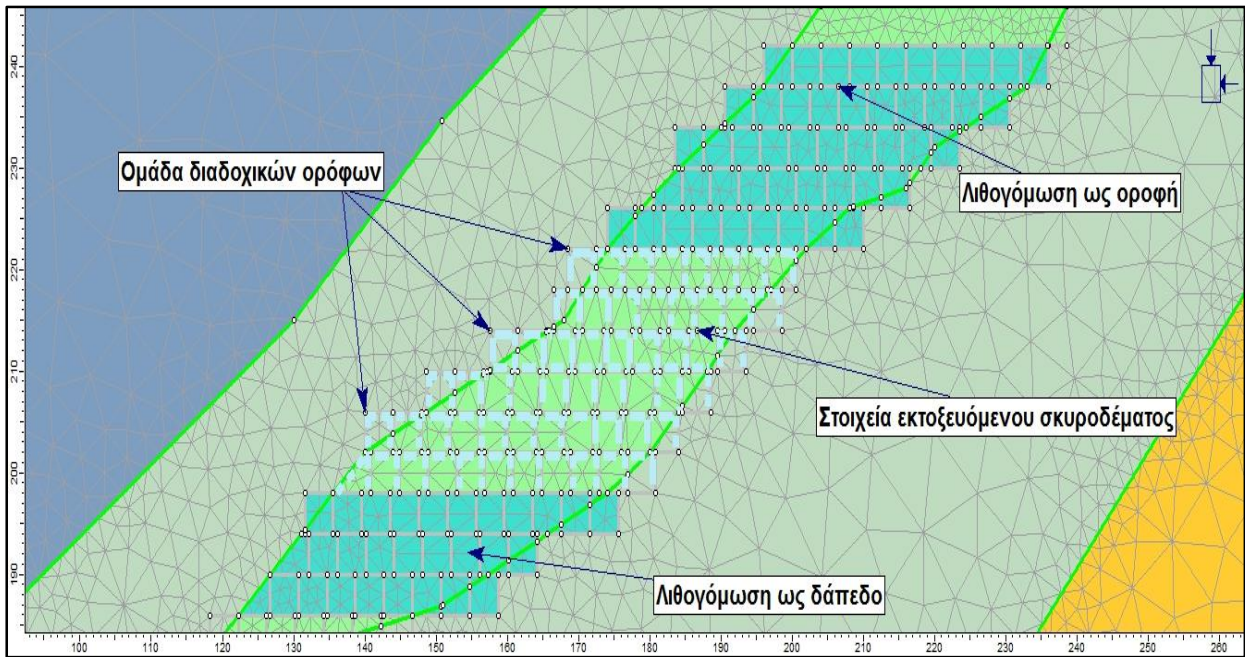


Εικόνα 24. Ολοκλήρωση εκμετάλλευσης με υποστήριξη και λιθογόμωση. Στάδιο 49°.

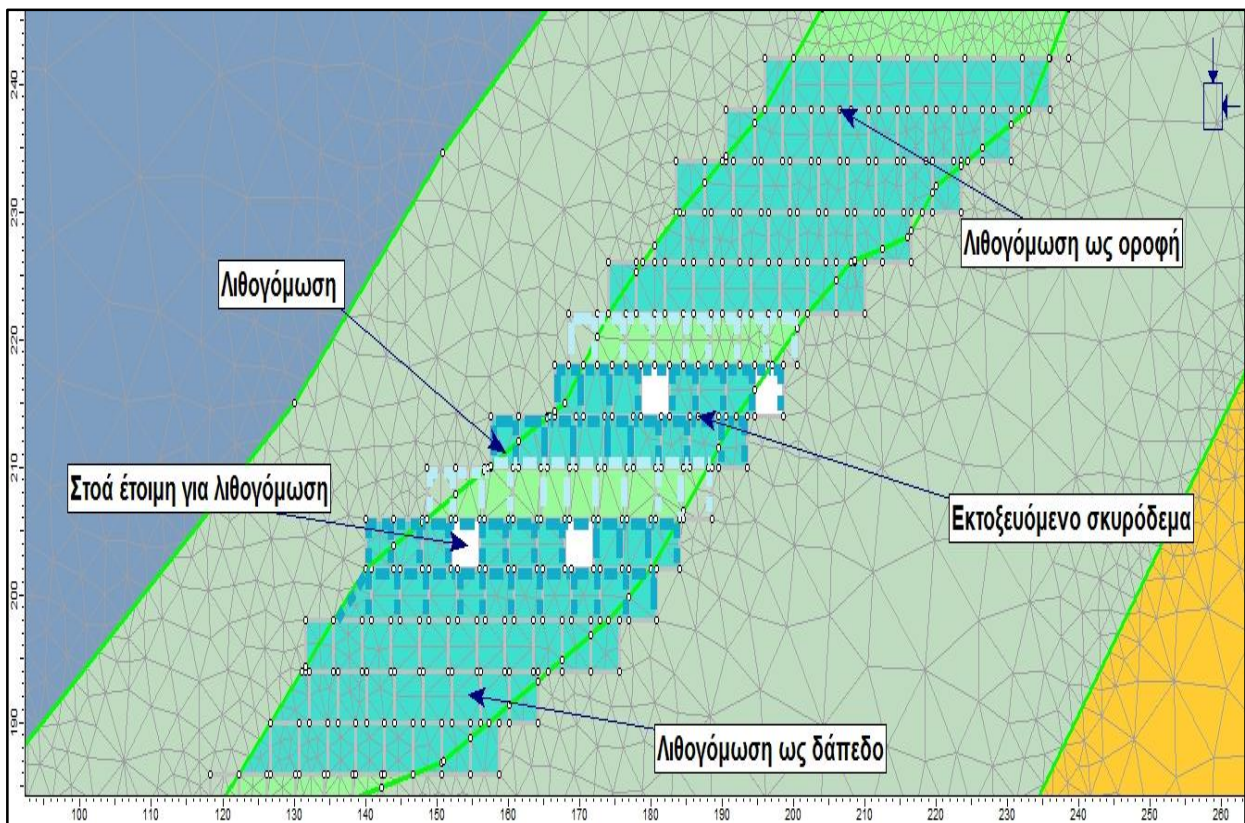
5.2.5 Ομοίωμα που αφορά στην Κλίμακα Ομάδας Διαδοχικών

Ορόφων Εκμετάλλευσης, με χρήση Στοιχείων Υποστήριξης

Στο μοντέλο αυτό πραγματοποιήθηκαν 37 στάδια με διαδοχική εκσκαφή, υποστήριξη και πλήρωση των υποστηριζόμενων κενών με υλικό λιθογόμωσης. Δάπεδο και οροφή της ομάδας διαδοχικών ορόφων ορίστηκε λιθογομωμένο τμήμα του κοιτάσματος του οποίου η εκμετάλλευση είχε πραγματοποιηθεί. Η εκμετάλλευση γίνεται με την ίδια μέθοδο δηλαδή με εναλλασσόμενες κοπές και λιθογομώσεις κατά ανερχόμενη φορά και με τις ίδιες συνθήκες ανάπτυξης και σχεδιασμού όπως και των προηγούμενων μοντέλων προσομοίωσης. Οι όροφοι είναι 6 σε αριθμό και η εκμετάλλευση ξεκινάει από τον κατώτερο υψομετρικά όροφο και κινείται προς τα πάνω όσο προχωράνε τα στάδια εκμετάλλευσης



Εικόνα 25. Ομάδα διαδοχικών ορόφων πριν την εκμετάλλευση στο αρχικό στάδιο.



Εικόνα 26. Στάδιο 24^ο της προσομοίωσης. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με λιθογόμωση σε πληρωμένες στοές και στοές υποστηριζόμενες έτοιμες για λιθογόμωση.

5.3 Παραμετρικά Μοντέλα

5.3.1 Εισαγωγή

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται κάποιες διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες του υλικού λιθογόμωσης και μελετούνται τα αποτελέσματα των μεταβολών αυτών στο ομοίωμα της συνολικής εκμετάλλευσης του μεταλλείου χωρίς στοιχεία υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα δημιουργούνται 6 επιπρόσθετα μοντέλα όπου μεταβάλλονται:

1. Η αντοχή του υλικού λιθογόμωσης σε μονοαξονική θλίψη σ_c , η οποία μειώνεται από 4MPa σε 1MPa. (1 μοντέλο)
2. Το μέτρο ελαστικότητας E με αύξηση και μείωση κατά 25% του αρχικού, που χρησιμοποιήθηκε στα βασικά μοντέλα. (2 μοντέλα)
3. Το GSI της λιθογόμωσης με αύξηση και μείωση κατά 10 δηλαδή από 60 σε 50 και 70. (2 μοντέλα)
4. Για το εντατικό πεδίο, η τιμή k , δηλαδή ο λόγος των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες τάσεις, παίρνει τιμές horizontal / vertical in plane = 2 και horizontal / vertical out of plane = 1 από 0.75 που είχαν και οι δύο παράμετροι. (1 μοντέλο)

Όσον αφορά τον συντελεστή k , σημειώνεται πως σε σκληρά πετρώματα έχει ευρεθεί ότι η τιμή του λόγου των οριζοντίων προς τις κατακόρυφες τάσεις να κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.8, σε πετρώματα μαλακά ή με μη ελαστική συμπεριφορά λαμβάνει τιμές από 0.8 έως 1.0, ενώ υπάρχουν αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία και περιπτώσεις όπου σε συνήθη πετρώματα και για συγκεκριμένες συνθήκες γεωλογικού περιβάλλοντος είναι δυνατόν να παίρνει τιμές πολύ μεγαλύτερες του 2.0, λόγω τεκτονικής ή γεωλογικής καταπόνησης της περιοχής κατά το παρελθόν. Στα υπόλοιπα μοντέλα προσομοίωσης ο λόγος k λαμβάνει την τιμή 0.75.

Επίσης δημιουργήθηκε ένα επιπλέον μοντέλο που περιλαμβάνει διαφορές στον τρόπο πλήρωσης των κενών κατά την υδραυλική γόμωση των στοών. Συγκεκριμένα επειδή δεν είναι δυνατή η 100% πλήρωση των κενών που δημιουργούνται κατά τις διαδικασίες εκμετάλλευσης, μελετάται η συμπεριφορά της περιβάλλουσας βραχώμαζας σε περίπτωση που αφήνεται κενό 20cm σε οροφές κάποιων στοών. Ο σχεδιασμός του μοντέλου αυτού περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

Τέλος έλαβε χώρα η δημιουργία ενός μοντέλου που αφορά το ομοίωμα της κλίμακας του μεταλλείου με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέσου υποστήριξης. Σε αυτό σημειώθηκε μεταβολή στις ιδιότητες του liner και συγκεκριμένα στο πάχος του στρώματος από 10cm σε 5cm και μελετήθηκε η συμπεριφορά της βραχομάζας γύρω από την εκμετάλλευση.

Όλα τα παραπάνω επιπρόσθετα 8 μοντέλα, έχουν ως σκοπό την μελέτη και παρατήρηση ως προς το πως, με κάποιες μεταβολές στα τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού λιθογόμωσης, του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του τρόπου πλήρωσης των εξορυσσόμενων μετώπων, μπορούμε να έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα στην συμπεριφορά της βραχομάζας που περιβάλλει την εκμετάλλευση. Επίσης μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά της λιθογόμωσης είναι δυνατό να ληφθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το πως αυτή ανταποκρίνεται σαν σώμα πλήρωσης των κενών και πως επιδρά στις μετακινήσεις της μάζας του πετρώματος που περιβάλλει τις στοές εκμετάλλευσης. Η περιγραφή και η ανάλυση των μοντέλων προσομοίωσης με τις μεταβολές στις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης ακολουθούν στη συνέχεια.

5.3.2 Η αντοχή σε

Στο μοντέλο αυτό μεταβλήθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υλικού λιθογόμωσης και συγκεκριμένα μειώθηκε από 4MPa σε 1MPa. Έχει ιδιαίτερη σημασία να παρατηρήσουμε τις διαφορές στις μετακινήσεις γύρω από την εκμετάλλευση, καθώς 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 μίγμα του υφίσταμενου υλικού λιθογόμωσης τα ποσοστά συμμετοχής όπως προαναφέρθηκαν είναι 70% αδρομερές τέλμα του εμπλουτισμού, 20% νερό και 10% τσιμέντο. Οπότε 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.

5.3.3 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 βασικά μοντέλα το υλικό λιθογόμωσης είχε την τιμή 2500MPa. Δημιουργήθηκαν άλλα δύο μοντέλα για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της βραχώμαζας, το πρώτο με αύξηση του μέτρου κατά 25% και το δεύτερο με μείωση του κατά το ίδιο ποσοστό. Το υλικό λιθογόμωσης στη πρώτη περίπτωση αποκτά μέτρο ελαστικότητας $E=3125\text{MPa}$ και στη δεύτερη $E=1875\text{MPa}$.

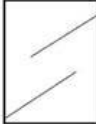





5.3.4 Δείκτης GSI

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (Geological Strength Index, GSI), που έχει διεθνώς καθιερωθεί για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της ποιότητας μιας βραχώμαζας, έχει τα τελευταία χρόνια ευρύτατη χρήση και στην Ελλάδα. Το σύστημα GSI προτάθηκε από τον Hoek αρχικά το 1995 και αργότερα με βελτιώσεις το 1998 και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικά φτωχής ποιότητας βραχώμαζες, δηλαδή με δείκτη $RMR < 40$, όπου όμως λαμβάνεται η αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχίων. Αξίζει να σημειωθεί πως βραχώμαζες τέτοιου τύπου δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό υπόγειων έργων (Καββαδάς, 2000). Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε, ώστε να είναι εν γένει συμβατό με το σύστημα RMR για βραχώμαζες με $RMR > 40$, όπου και οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Το σύστημα GSI έχει πολλά πλεονεκτήματα για βραχώμαζες με τιμή $RMR < 40$, κυρίως επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής, ενώ ταυτόχρονα παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR. Το σύστημα αυτό βασίζεται στη συναξιολόγηση δύο παραμέτρων (Καββαδάς, 2000):

1. Της δομής της βραχώμαζας που χαρακτηρίζει τον βαθμό που αλληλομπλέκονται τα βραχώδη τεμάχια μεταξύ τους, και
2. Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής τους αντοχής.

Ο δείκτης GSI εκτός από τη γεωτεχνική ταξινόμηση, εκφράζει αριθμητικά την απομείωση των σταθερών του υλικού, ανάλογα με την ρωγμάτωση της βραχώμαζας. Αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην επίλυση του κριτηρίου Hoek - Brown ενώ παράλληλα δύναται να προσφέρει λύσεις στο πρόβλημα του προσδιορισμού των αντιπροσωπευτικών τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού των τεχνικών έργων, σε περιβάλλον ρωγματωμένων βράχων. Ο Δείκτης GSI βασίζεται όπως αναφέρθηκε,

στην εκτίμηση της δομής και της καταστάσεως των ασυνεχειών της βραχώμαζας και επομένως αποτελεί ένα φιλικό, γεωλογικά, δείκτη που μπορεί να εκτιμάται εύκολα.

| <p>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασιζόμενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (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 πρανές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διακύμανσης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δέξια. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p> <p>ΔΟΜΗ</p> | | <p>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</p> | | | | |
|--|-----------|--|--|--|--|--|
| | | <p>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ Πολύ τραχείες, μη αποσαθρωμένες επιφάνειες</p> | <p>ΚΑΛΗ Τραχείες, ελαφρά αποσαθρωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες</p> | <p>ΜΕΤΡΙΑ Λείες, μετρίως αποσαθρωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες</p> | <p>ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης, πολύ αποσαθρωμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα</p> | <p>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ Επιφάνειες ολίσθησης πολύ αποσαθρωμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p> |
| | | <p>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →</p> | | | | |
|  <p>INTACT OR MASSIVE - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p> | <p>90</p> | | | | N/A | N/A |
|  <p>BLOCKY - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλειδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p> | <p>80</p> | 70 | | | | |
|  <p>VERY BLOCKY- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p> | <p>60</p> | 50 | | | | |
|  <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p> | <p>40</p> | 30 | | | | |
|  <p>DISINTEGRATED - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p> | <p>20</p> | | | | | |
|  <p>LAMINATED/SHEARED - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p> | <p>10</p> | N/A | N/A | | | |
| | <p>←</p> | | | | | |

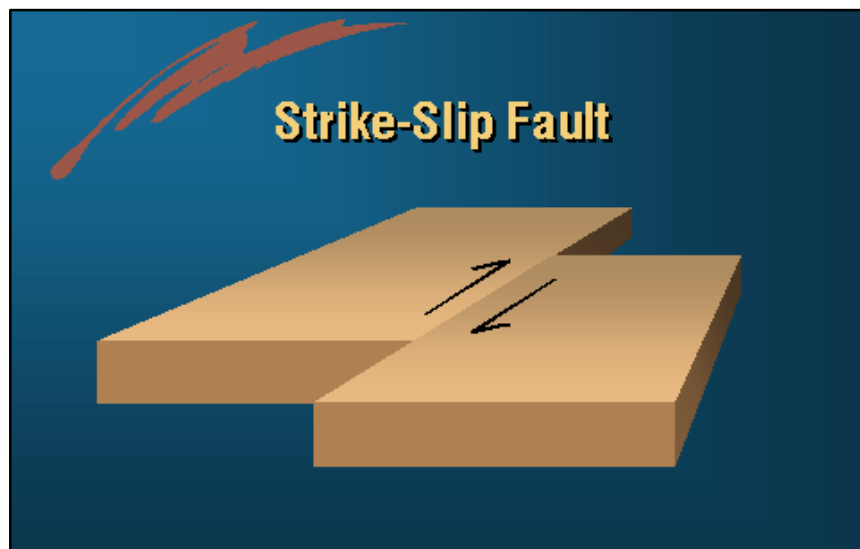
Σχήμα 21. Το βασικό διάγραμμα του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής GSI (Πηγή: Καβαδάς 2000).

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί. Το συγκεκριμένο σύστημα βρίσκεται εφαρμογή σε βραχώμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχώδων τεμαχών, δηλαδή σε βραχώμαζες που παρουσιάζουν μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού, συγκεκριμένα λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου τους [1].

Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης της βραχώμαζας GSI, το σώμα της λιθογόμωσης στα μοντέλα έχει την τιμή 60, ενώ στα παραμετρικά, όπου μεταβάλλουμε την παράμετρο αυτή, με αύξηση και μείωση κατά 10 το GSI φτάνει τις τιμές 70 και 50 αντίστοιχα.

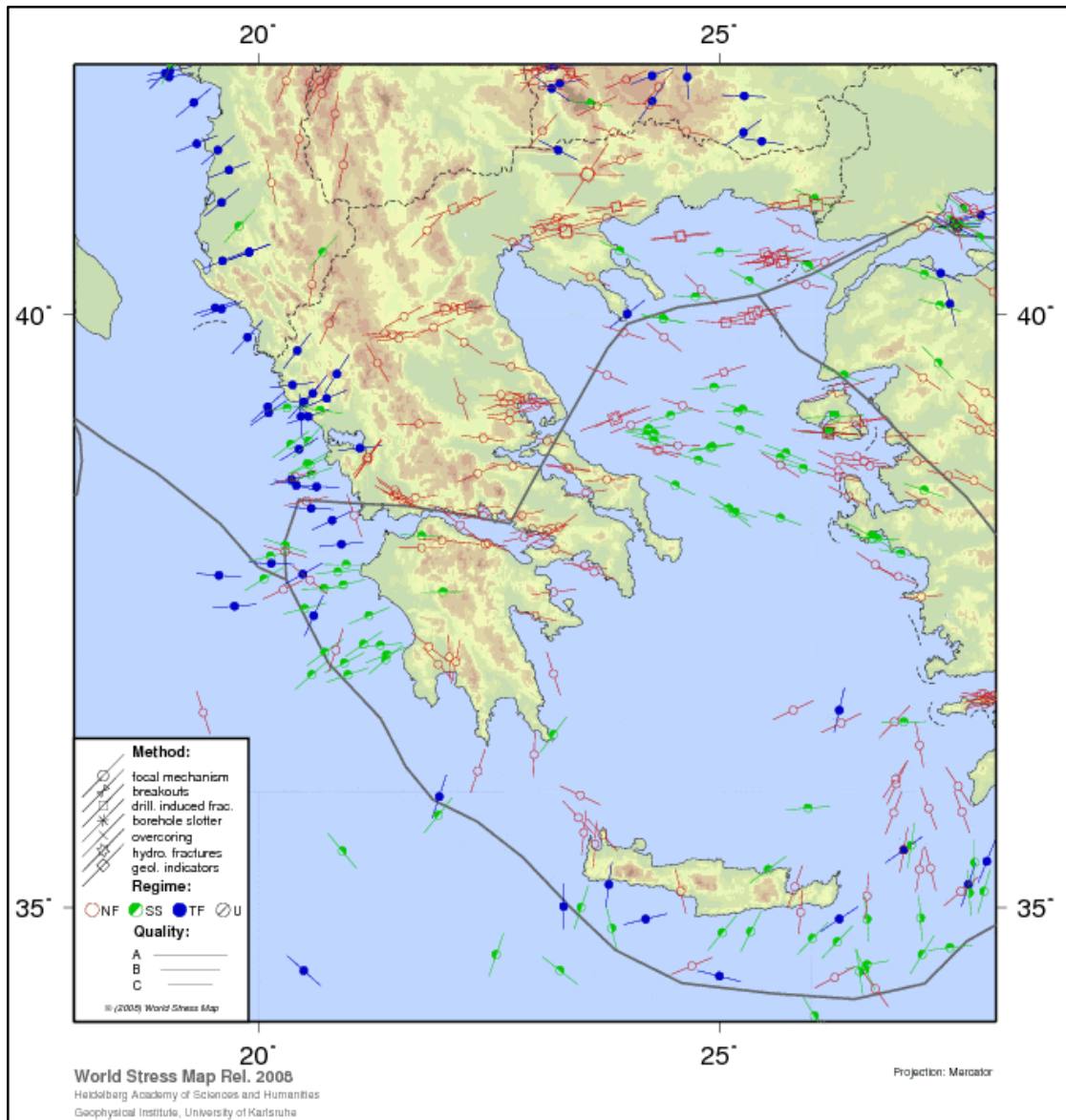
5.3.5 Συντελεστής k

Κατά τον σχεδιασμό των προσομοιωτικών μοντέλων ο συντελεστής k πήρε την τιμή 0.75 και για τους δύο λόγους των οριζοντίων με τις κάθετες τάσεις (in plane και out of plane). Αναλυτικότερα, ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με βάση το βάθος που φτάνει το κάθε άνοιγμα, μέτωπο. Το ειδικό βάρος των υπερκειμένων είναι $\gamma = 0.028$ kN/m³, 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). Η λιθολογία της περιοχής και σεισμικοί εστιακοί μηχανισμοί δύναται να παρέχουν πληροφορίες για τον προσανατολισμό της μέγιστης οριζόντιας τάσης σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Το ρήγμα του Στρατωνίου βρίσκεται κοντά στη περιοχή της εκμετάλλευσης και ο προσανατολισμός της μέγιστης οριζόντιας τάσης (σ_H) δίνεται από την βάση δεδομένων World Stress Map.



Εικόνα 27. Ρήγμα strike – slip, όπως το ρήγμα του Στρατωνίου

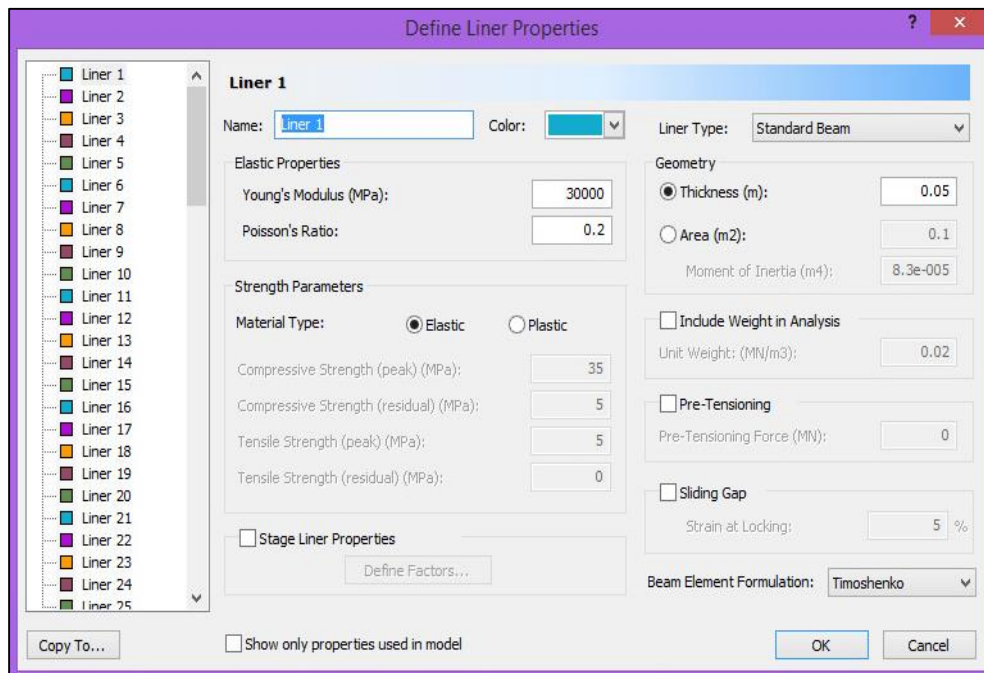
Τυπικά σε ζώνες τέτοιου είδους ρηγμάτων (strike-slip fault) η υψηλότερη τάση είναι παράλληλη στη κίνηση (σ_H), η μεσαία τάση είναι η κατακόρυφη (σ_V) και η μικρότερη τάση είναι κάθετη στη κίνηση (σ_h) (WSM, 2008). Σε τέτοια ρήγματα συνήθως η μέγιστη οριζόντια τάση (σ_H) είναι διπλάσια της κατακόρυφης (σ_V), και η σ_h ποικίλει από 0.5 έως 1 φορές της τιμής σ_V . Σύμφωνα με τα παραπάνω στο σχετικό παραμετρικό μοντέλο που αφορά τον λόγο k , οι τιμές του μεταβλήθηκαν σε 2 και 1.



Εικόνα 28. Παρουσία ρηγμάτων στον Ελλαδικό χώρο (WSM, 2008).

5.3.6 Στρώμα Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος πάχους 5cm

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στα 2 βασικά μοντέλα του ομοιώματος του μεταλλείου και της ομάδας διαδοχικών ορόφων είχε πάχος στρώσης 10cm. Στο συγκεκριμένο μοντέλο μειώνεται στο μισό, στα 5cm που αποτελεί ένα πιο ρεαλιστικό νούμερο. Τα στάδια προσομοίωσης είναι 49 δηλαδή ίδια με το βασικό μοντέλο όπου γίνεται χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Σχήμα 22. Παράθυρο ιδιοτήτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

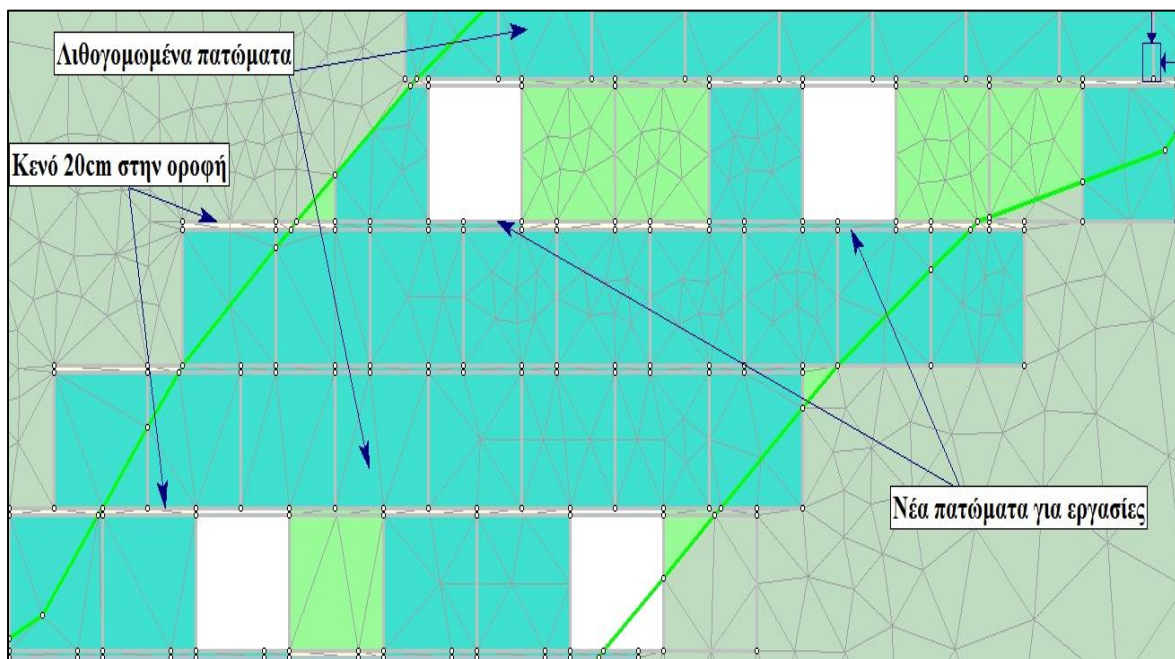
5.3.7 Κενό οροφής 20cm

Όπως έχει αναφερθεί η μεταφορά του υλικού λιθογόμωσης και η πλήρωση των κενών χώρων γίνεται με υδραυλικές αντλίες οι οποίες τοποθετούνται σε συγκεκριμένο ύψος στο φράγμα που έχει κατασκευαστεί (Εικόνες 32, 33) στην εκάστοτε προς πλήρωση στοά. Είναι λοιπόν λογικό να μην έχουμε την 100% πλήρωση του εξορρυσόμενου χώρου αλλά κάποιο μικρό τμήμα της οροφής να παραμένει κενό. Στο συγκεκριμένο μοντέλο γίνεται ακριβώς αυτή η μελέτη για να διαπιστώσουμε την επίδραση που δύναται να έχει ένα κενό 20cm, στην περιβάλλουσα το κοίτασμα βραχόμαζα. Το μοντέλο περιλαμβάνει 31 στάδια προσομοίωσης και ο σχεδιασμός ήταν ο ακόλουθος.

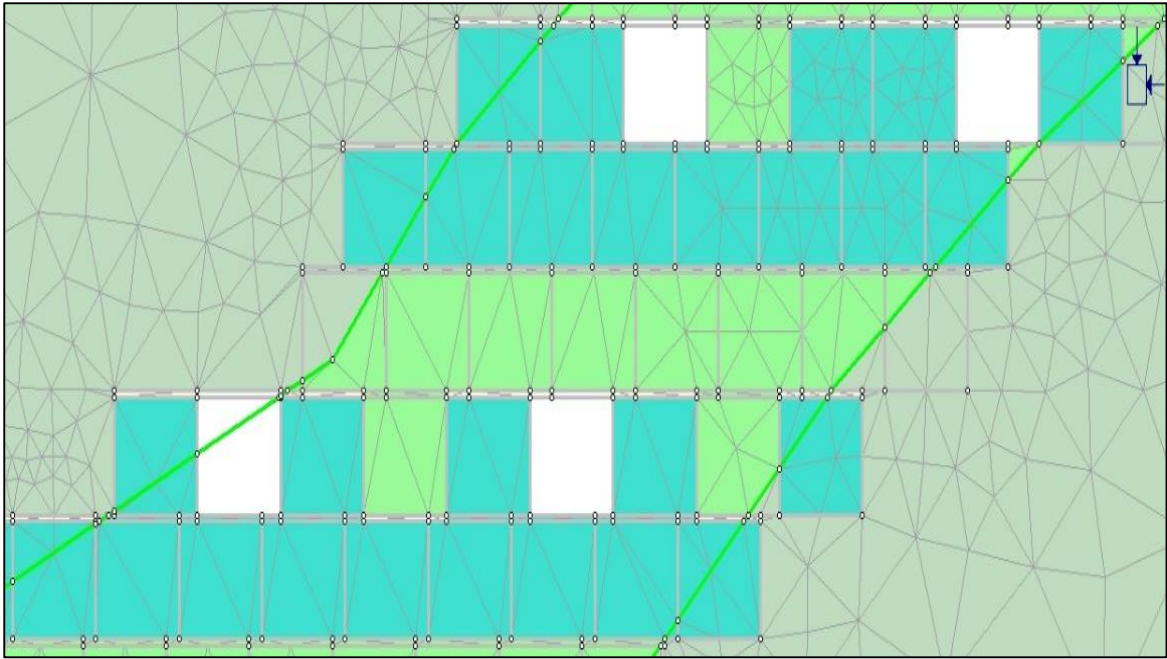
Σε κάθε στάδιο γίνεται η εκσκαφή και στη συνέχεια η γόμωση των κενών όπως ακριβώς και στα προηγούμενα μοντέλα, με την διαφορά ότι αφήνεται ένα κενό 20cm από την οροφή της εκάστοτε στοάς. Αξίζει να σημειωθεί πως το κενό αυτό δεν

παραμένει ανοιχτό σε όλες τις στοές της εκμετάλλευσης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεθόδου που χρησιμοποιείται, η οποία έχει ανερχόμενη φορά. Καθώς γίνεται η εκμετάλλευση του κοιτάσματος από κάτω προς τα πάνω, οι οροφές των κατώτερων τμημάτων πρέπει να καλύπτονται με το σώμα της λιθογόμωσης διότι θα χρησιμοποιηθούν ως νέα πατώματα στο οποίο θα πατήσει ο μηχανολογικός εξοπλισμός και οι εργαζόμενοι για την συνέχεια των εργασιών. Επομένως τα κενά στις οροφές που θα παραμείνουν ανοιχτά μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης περιορίζονται σε εκείνα που δεν έχουν από πάνω τους ορόφους εκμεταλλεύσιμου μεταλλεύματος. Προκειμένου να γίνουν οι τασικές αναλύσεις τα 20cm δεν πρέπει να παραμείνουν ανοιχτά στο μοντέλο. Για πρακτικούς λόγους δημιουργούμε ένα υλικό με μηδενικές ιδιότητες και το αντιστοιχούμε στα κενά αυτά.

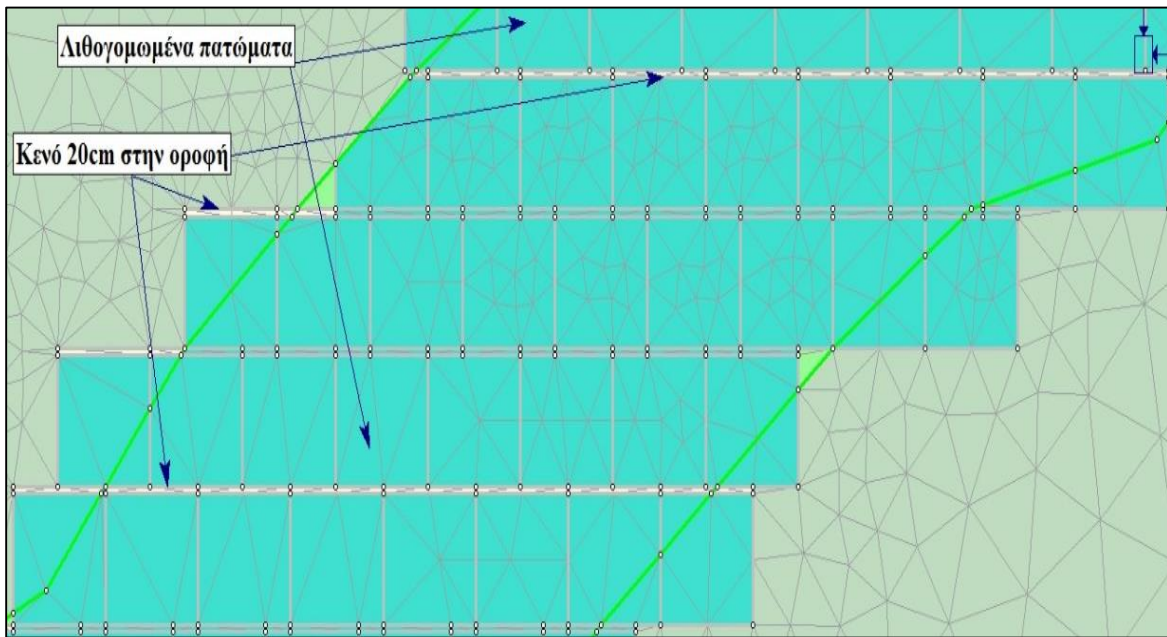
Όταν ολοκληρωθεί η εκμετάλλευση, μόνο μία σειρά και συγκεκριμένα η τελευταία και υψομετρικά υψηλότερη από το εκάστοτε σύστημα ορόφων θα διαθέτει το κενό των 20cm. Ο λόγος που το κενό παραμένει στα τμήματα αυτά είναι επειδή συναντάμε λιθογομωμένους ορόφους στοών, όπου έχει προηγηθεί η εκσκαφή και η πλήρωσή τους. Οι στοές γεμίζουν υδραυλικά και παραμένει άδειο το ανώτερο μέρος του φράγματος λιθογόμωσης σε όλο το μήκος της στοάς και για όλο τον υψομετρικό όροφο. Αυτό σημαίνει πως στο πέρας της εκμετάλλευσης θα υπάρχουν κενοί, ακάλυπτοι χώροι όπου δεν είναι δυνατόν να φτάσει το υλικό λιθογόμωσης.



Εικόνα 29. Κενά διαστήματα ύψους 20cm από τα οποία κάποια παραμένουν κενά και κάποια λιθογομώνονται για να αποτελέσουν νέο πάτωμα εργασιών.



Εικόνα 30. Στάδιο 14 του παραμετρικού μοντέλου με κενό 20cm στην οροφή των στοών.



Εικόνα 31. Κενό 20cm μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης σε τμήματα του κοιτάσματος που συναντούν λιθογομωμένα πατώματα.



Εικόνα 32. Κατασκευή του φράγματος όπου θα μεταφερθεί το υλικό πλήρωσης.



Εικόνα 33. Ξύλινο φράγμα όπου μεταφέρεται υδραυλικά το υλικό λιθογόμωσης και συγκρατείται προσωρινά.

6 Αποτελέσματα Αριθμητικών Προσομοιώσεων

6.1 Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για λόγους απλοποίησης των μοντέλων της προσομοίωσης παραλείπεται το στάδιο της αποτόνωσης κατά τη σταδιακή εκσκαφή των στοών εκμετάλλευσης. Το Phase είναι ένα πρόγραμμα που δουλεύει στις δύο διάστασεις, για τον λόγο αυτό κατά την εκσκαφή μίας στοάς γίνεται η εκσκαφή σε ολόκληρο το μήκος της. Κατά τις εργασίες εκμετάλλευσης του κοιτάσματος, οι στοές προχωρούν και πληρώνονται σταδιακά ανά λίγα μέτρα με τον κύκλο εργασιών να περιλαμβάνει διάτρηση, γόμωση, ανατίναξη, μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού, εφαρμογή συστήματος υποστήριξης και λιθογόμωση. Ενώ στις προσομοιώσεις πραγματοποιείται ολική εκσκαφή και έπειτα η λιθογόμωση των στοών με την παρουσία εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως υποστήριξη σε κάποια μοντέλα. Επομένως είναι αναμενόμενο πως οι τιμές των συνολικών μετακινήσεων, της περιβάλλουσας το κοίτασμα βραχώμαζας που θα προκύψουν από τις τασικές αναλύσεις, θα είναι αρκετά υψηλότερες από τις πραγματικές μετακινήσεις. Το γεγονός αυτό όμως δεν θα προκαλέσει εμπόδια για τη μελέτη της γεωμηχανικής συμπεριφοράς της βραχώμαζας στο κοίτασμα μικτών θειούχων των Μαύρων Πετρών.

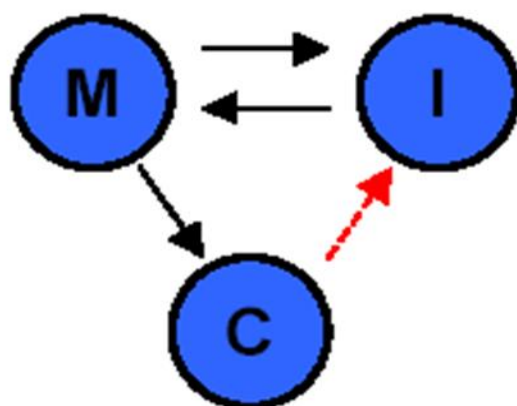
6.2 Τρόπος Ανάλυσης Αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα

Phase

Με το πρόγραμμα Phase²8.0 εύκολα δημιουργούμε ένα μοντέλο και κατασκευάζουμε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα γίνεται η ανάλυση των τάσεων και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αυτά γίνονται με τη χρήση των τριών υποπρογραμμάτων από τα οποία αποτελείται το Phase2 και είναι: το Μοντέλο (**MODEL**), ο Υπολογιστής (**COMPUTE**) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (**INTERPRET**).

Το Μοντέλο (**MODEL**), ο Υπολογιστής (**COMPUTE**) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (**INTERPRET**) λειτουργούν και ως ανεξάρτητα προγράμματα. Ο Υπολογιστής (**COMPUTE**) και η Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (**INTERPRET**) μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσα από το Μοντέλο (**MODEL**). Ο Υπολογιστής (**COMPUTE**) πρέπει να τρέξει σε ένα αρχείο πριν να μπορεί να γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων με το **INTERPRET**. Το Μοντέλο (**MODEL**) μπορεί να ανάλυση των

αποτελεσμάτων με το INTERPRET. Το Μοντέλο (MODEL) μπορεί να ενεργοποιηθεί από το INTERPRET.



Σχήμα 23. Ο συσχετισμός των τριών υποπρογραμμάτων που αποτελούν το πρόγραμμα Phase2

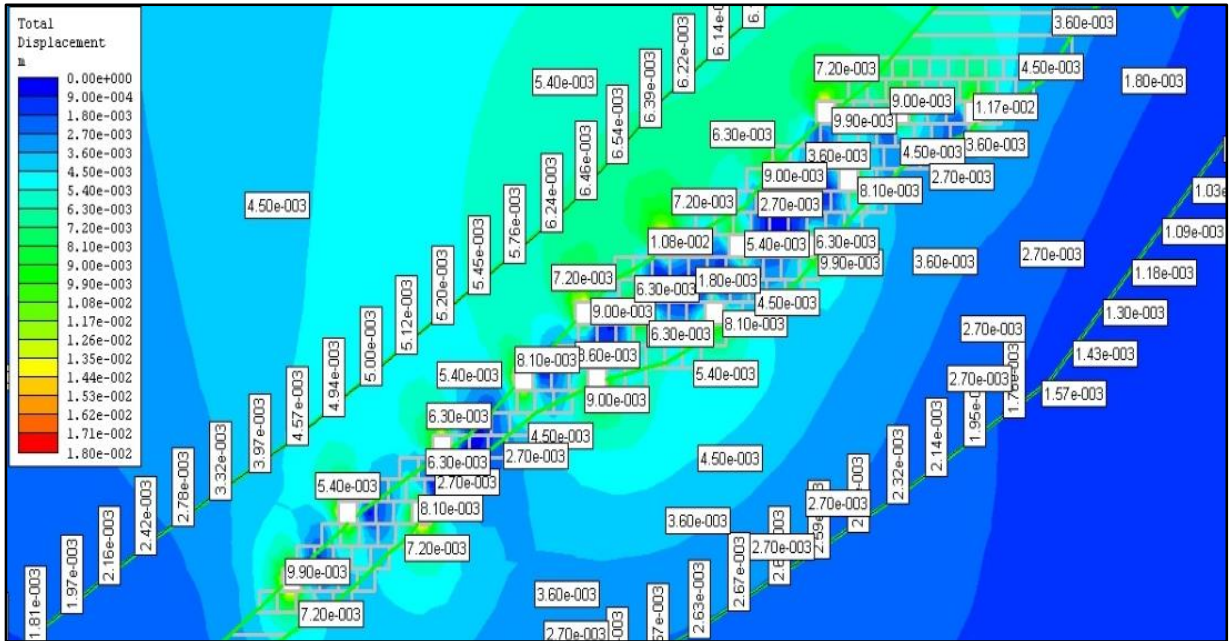
Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (INTERPRET) είναι το μετά – επεξεργαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση και ερμηνεία της ανάλυσης των αποτελεσμάτων του Phase2. Είναι αναγκαίο να τρέξουμε πρώτα το μοντέλο με το COMPUTE, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα να δούμε τα αποτελέσματα στο INTERPRET. Επιλέγουμε **Compute** για να τρέξουν τα αρχεία και να γίνει η τασική ανάλυση και έπειτα επιλέγουμε **Interpret** για να διαβάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

6.3 Μοντέλο Προσομοίωσης Ομοιώματος Συνολικής

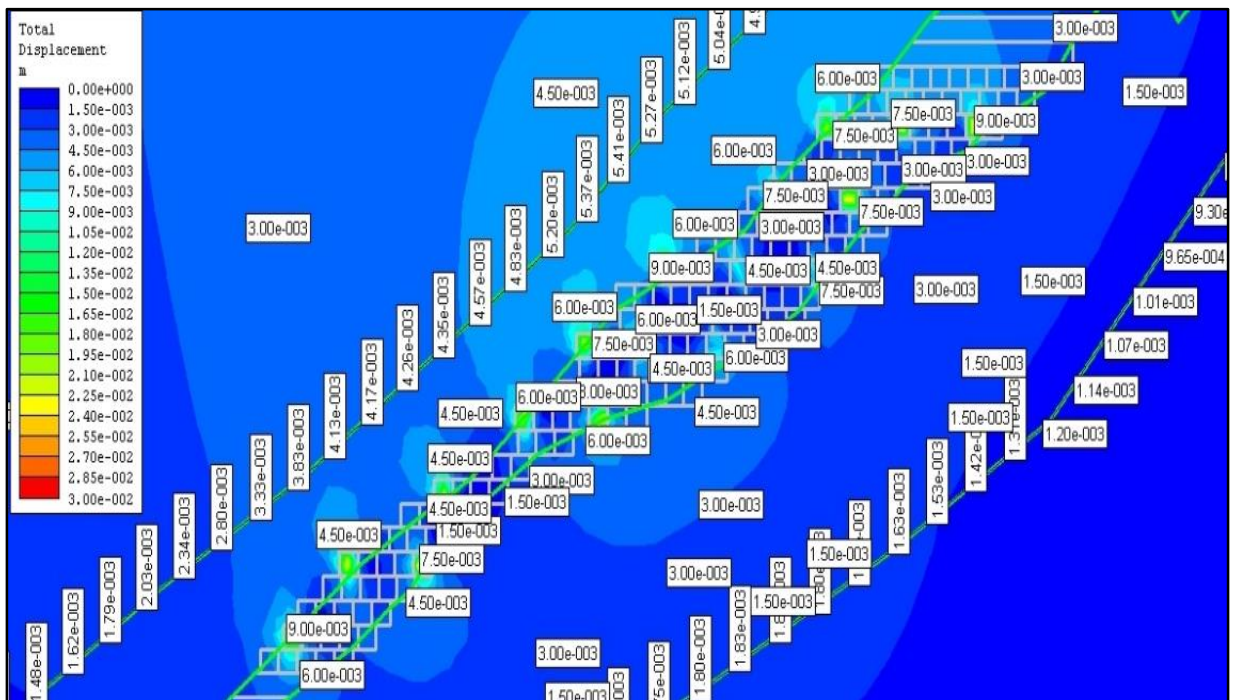
Εκμετάλλευσης χωρίς στοιχεία υποστήριξης.

Στο μοντέλο αυτό παρατηρήθηκαν μετακινήσεις οι οποίες φαίνονται στις παρακάτω εικόνες, με επιμέρους στάδια, που ακολουθούν στη συνέχεια και δείχνουν την συμπεριφορά της βραχόμαζας κοντά και γύρω από το κοιτάσμα όπου έχουμε τις εργασίες εκμετάλλευσης. Αρχικά στο στάδιο 2 της προσομοίωσης όπου γίνεται η εκσκαφή των πρώτων (χαμηλότερων) σειρών στις εκάστοτε υψομετρικές ομάδες ορόφων, παρατηρούμε μικρές μετακινήσεις της τάξης των χιλιοστών. Οι μετακινήσεις κυμαίνονται από 4.50mm έως 9.00mm για περιοχές πάνω από το κοιτάσμα, πάνω από τα όρια του στρώματος του μαρμάρου και μέσα στα όρια αυτά, στην περιοχή του κοιτάσματος. Ενώ κάτω από την περιοχή του κοιτάσματος και στα κατώτερα όρια του μαρμάρου παρατηρήθηκαν οι μικρότερες τιμές μετακινήσεων από 1.03mm, 2.14mm, 2.70mm, 3.50mm και 4.50mm. Σε ψηλότερα σημεία δεξιά του κοιτάσματος σημειώθηκαν και τιμές της τάξης 0.995mm. Όσον αφορά την περιοχή του κοιτάσματος

γύρω από τα ανοίγματα, παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες μετακινήσεις με πλήθος τιμών από 2.70mm, 5.40mm, 6.30mm, 7.20mm, 8.10mm και 9.00mm, μέχρι και 1.02cm. Ακολουθεί το 3^ο στάδιο όπου πληρώνονται τα κενά της πρώτης σειράς με υλικό λιθογόμωσης. Εκεί παρατηρήθηκαν ελάχιστες μεταβολές από την αντικατάσταση του μεταλλεύματος με την λιθογόμωση. Συγκεκριμένα έχουμε λιγότερες μετακινήσεις έξω από τα όρια του μαρμάρου με τιμή στα 3.00mm και 4.50mm ενώ είχαμε 4.50mm και 5.40mm στην ίδια περιοχή.

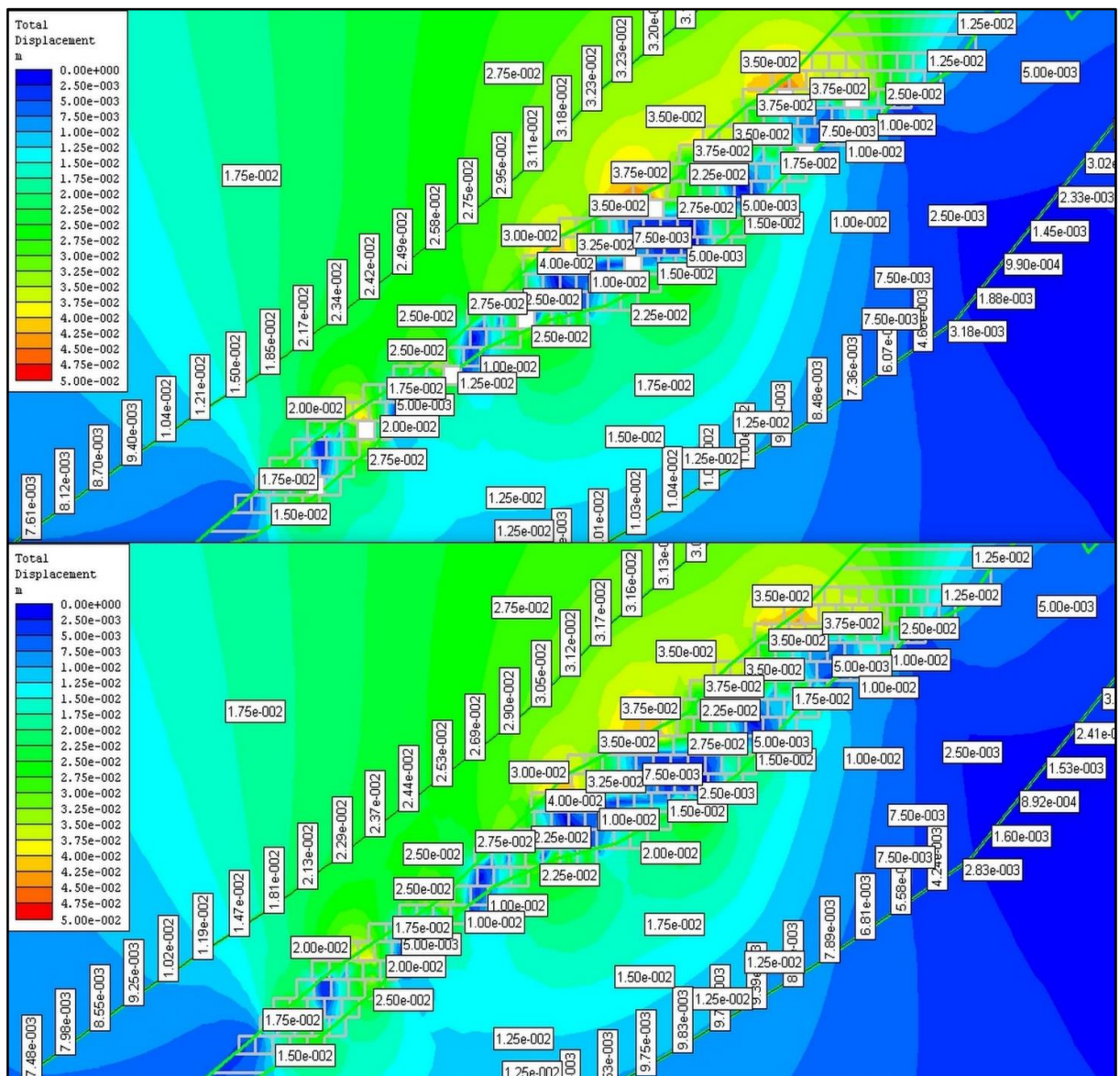


Εικόνα 34. Στάδιο 2 της εκμετάλλευσης, πραγματοποιείται η εκσκαφή των πρώτων στοών.

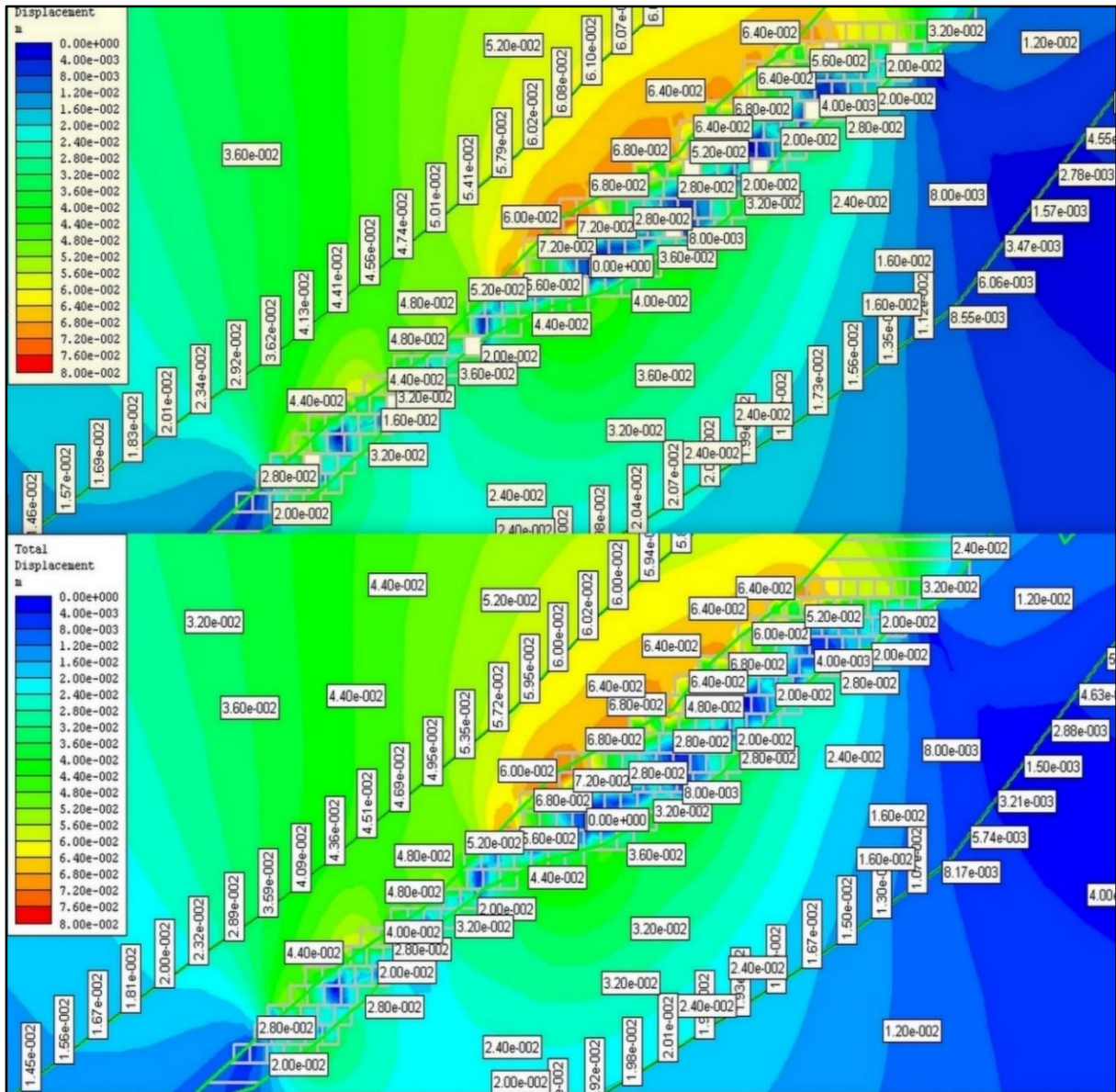


Εικόνα 35. Στάδιο 3 της εκμετάλλευσης, όπου γίνεται η πλήρωση των κενών με το υλικό λιθογόμωσης.

Στα στάδια 8 και 9 του συγκεκριμένου μοντέλου, όπου δεν υπάρχει σύστημα υποστήριξης, οι μετακινήσεις της βραχόμαζας λαμβάνουν τιμές 1.75cm, 2.00cm, 2.17cm, 2.42cm, 2.50cm, 2.75cm, 3.00cm, 3.11cm, 3.50cm, 3.75cm στην περιοχή πάνω από το κοίτασμα. Παράλληλα κάτω από το κοίτασμα οι μετακινήσεις παίρνουν τιμές 1.45mm, 2.33mm, 2.50mm, 4.86mm, 7.36mm, 8.48mm, 9.00mm, 1.00cm, 1.50cm, 1.75cm. Στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις κυμαίνονται από 7.50mm έως 4.00cm με ενδιάμεσες τιμές 5.00mm, 1.00cm, 1.50cm, 2.25cm, 2.50cm, 2.75cm, 3.25cm και 3.75cm.

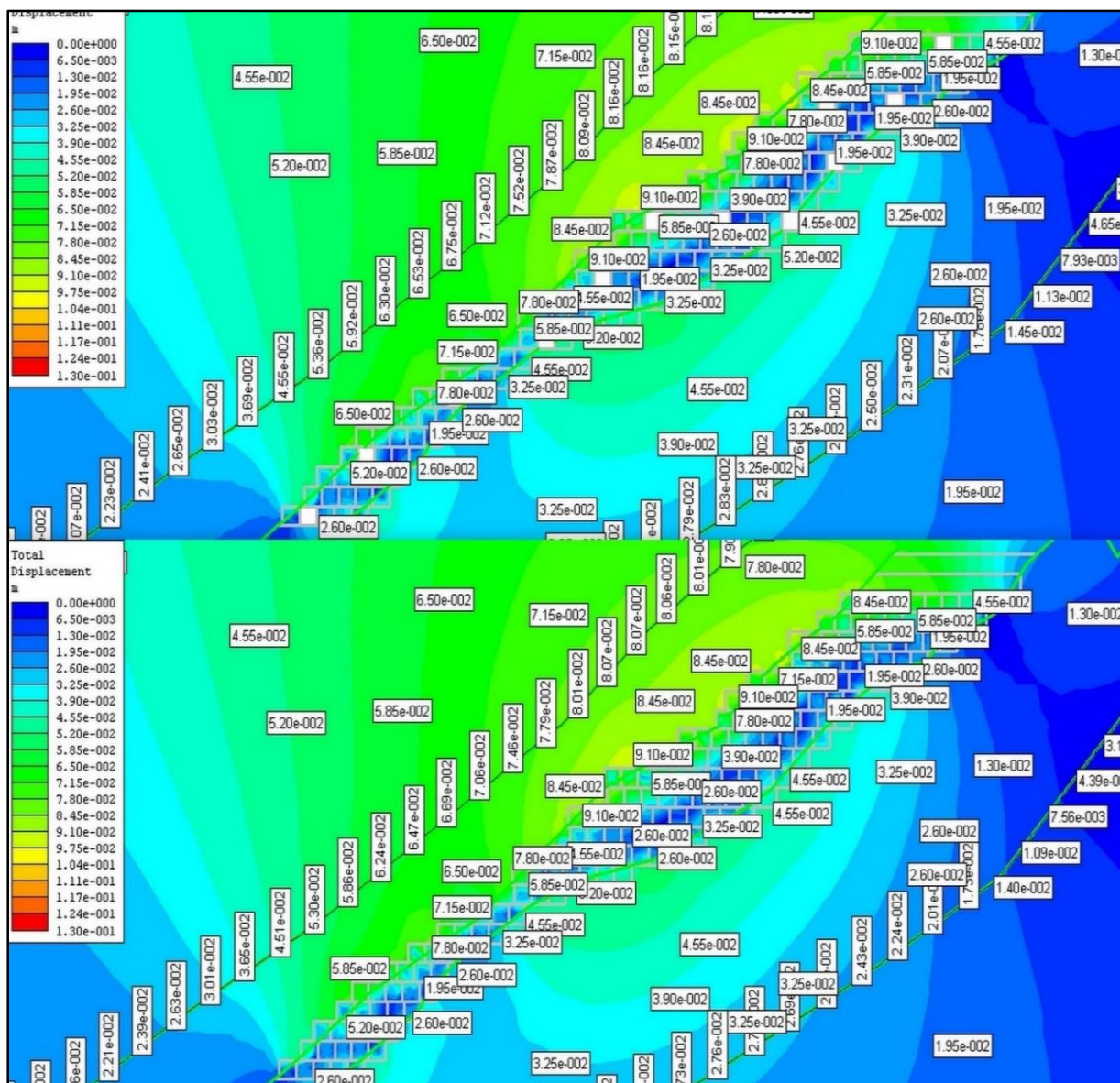


Εικόνα 36. Στάδια 8 και 9 του βασικού μοντέλου στη προσομοίωση όπου γίνεται συνολική εκμετάλλευση του μεταλλεύου.



Εικόνα 37. Μετακινήσεις της περιβάλλουσας το κοιτάσμα βραχώμαζας στα στάδια 16 και 17.

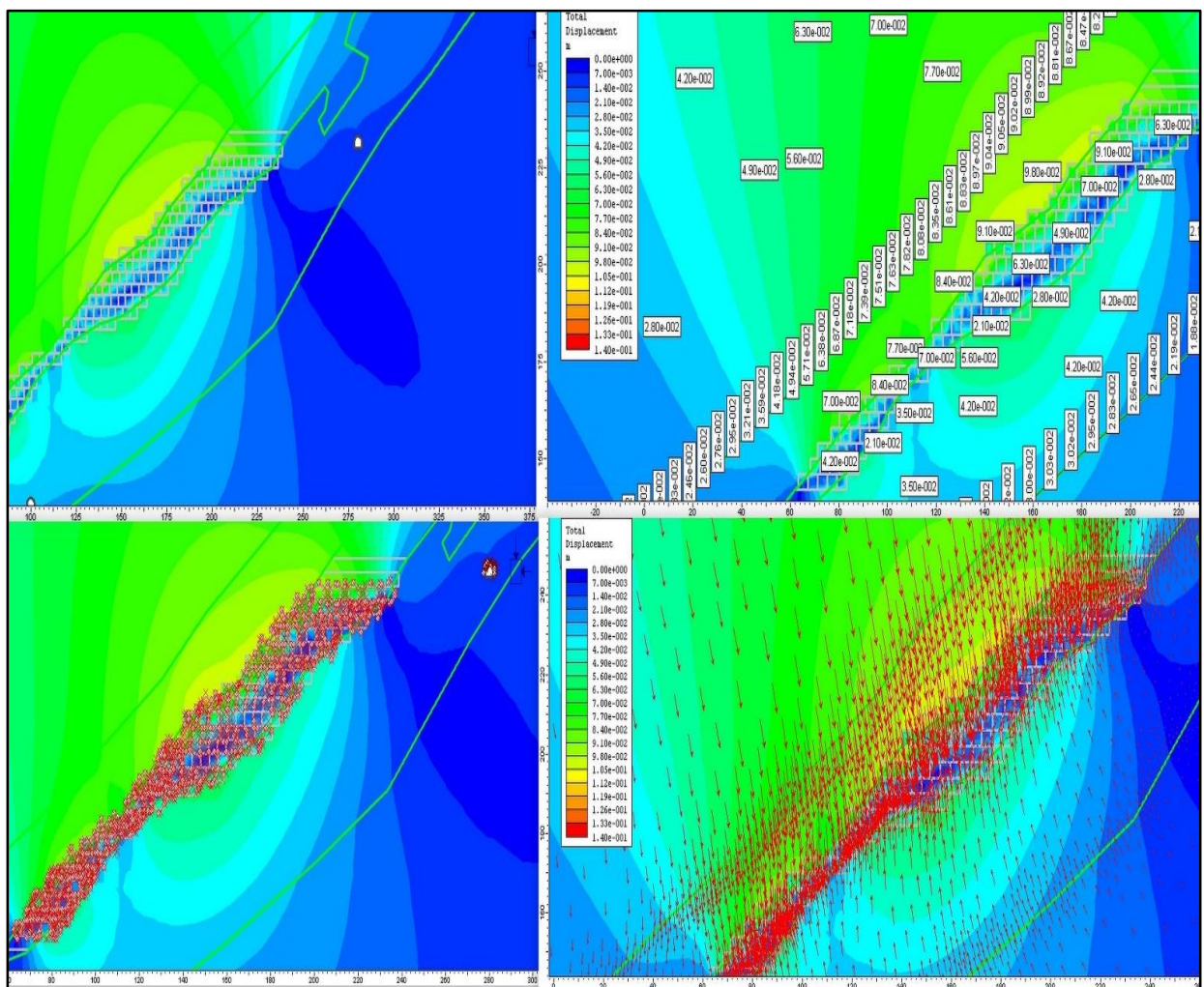
Στα στάδια 16 - 17 όπου έχει προχωρήσει η εκμετάλλευση παρατηρούνται μετακινήσεις της τάξης των εκατοστών. Βρισκόμαστε στους δεύτερους, ανώτερα υψομετρικούς ορόφους γεγονός που δηλώνει πως οι εργασίες γίνονται πάνω σε λιθογομωμένο όροφο που λειτουργεί ως πάτωμα. Παρατηρήθηκαν τιμές 2.01cm, 2.34cm, 2.92cm, 3.62cm, 4.13cm, 4.41cm, 5.01cm, 6.02cm, 6.80cm στη περιοχή πάνω από το κοιτάσμα. Οι μετακινήσεις μέσα στη εκμετάλλευση έχουν τιμές 8.00mm, 1.60cm, 2.00cm, 2.80cm, 3.20cm 4.40cm στο χαμηλό μέρος του κοιτάσματος, 4.80cm, 5.20cm, 5.60cm και 7.20cm στο κεντρικό τμήμα του κοιτάσματος και 2.00cm, 2.80cm, 3.20cm, 5.20cm, 6.40cm στο υψηλότερο μέρος του κοιτάσματος. Κάτω από το κοιτάσμα παρατηρούνται μετακινήσεις της τάξης των 3.60cm, 2.40cm, 2.07cm, 1.60cm, 8.55mm, 6.06mm και 1.57mm.



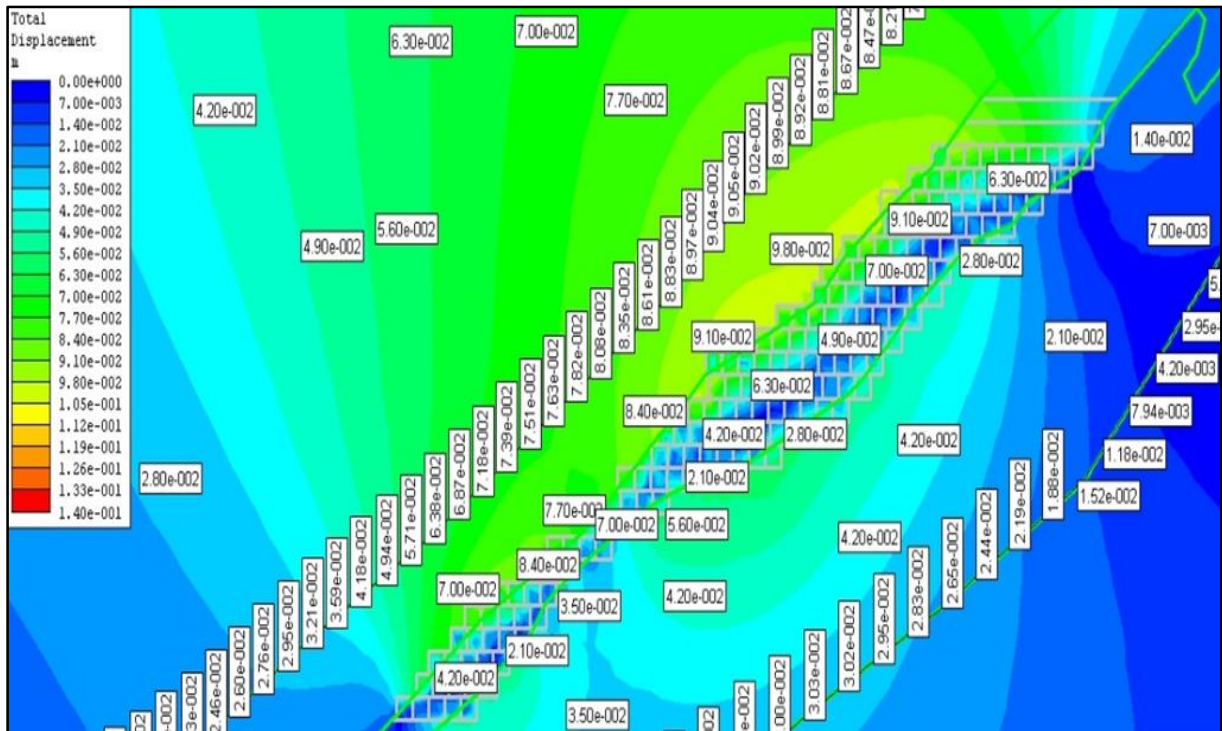
Εικόνα 38. Μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στα στάδια εκμετάλλευσης 22 (πάνω) και 23.

Στα παραπάνω στάδια 22 και 23 η εκμετάλλευση βρίσκεται στον τρίτο και τελευταίο όροφο εκμετάλλευσης του εκάστοτε υψομετρικού επιπέδου. Εκεί συναντάμε λιθογομωμένες οροφές και προφανώς οι εργασίες πραγματοποιούνται σε λιθογομωμένο πάτωμα. Τα στάδια αυτά στη περιοχή που περιβάλλει το κοιτάσμα παρουσιάζουν μετακινήσεις από 7.56mm, 3.12mm, 1.30cm, 3.25cm, 4.55cm, 5.20cm, 6.50cm, 7.46cm, 8.45cm και 9.10cm. Στη περιοχή του κοιτάσματος έχουμε μετακινήσεις που ξεκινάνε από 6.50mm και παίρνουν τιμές 1.95cm, 2.60cm, 3.25cm, 4.55cm, 5.85cm, 7.15cm έως 8.45cm.

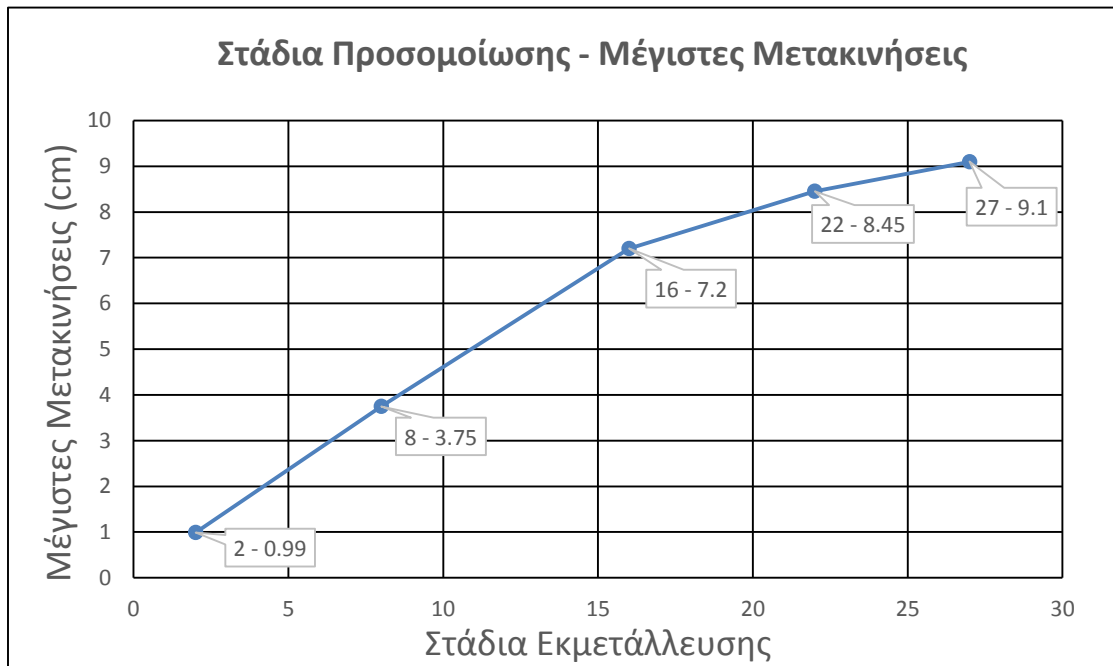
Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το τελικό στάδιο της προσομοίωσης με τα στοιχεία αστοχίας στα αριστερά και τα διανύσματα παραμόρφωσης στα δεξιά. Στο τελικό στάδιο του μοντέλου, στο στάδιο 27 ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση και το σώμα του μεταλλεύματος έχει αντικατασταθεί ολοκληρωτικά από το υλικό της λιθογόμωσης. Εκεί οι μετακινήσεις πήραν τιμές 1.40cm, 2.10cm, 2.80cm, 3.50cm, 4.20cm, 4.90cm, 5.60cm, 6.30cm, 7.00cm, 7.70cm, 8.40cm, 9.10cm και 9.80cm. Ελάχιστη μετακίνηση παρατηρείται σε κεντρικό και χαμηλό σημείο της εκμετάλλευσης με τιμή 7.00mm σχετική εικόνα δίνεται στο προσάρτημα. Γύρω από την εκμετάλλευση και πάνω από αυτή στο σώμα του τεκτονικού αμφιβολίτη και του μαρμάρου σημειώθηκαν μετακινήσεις 2.80cm, 4.20cm, 4.90cm, 5.60cm, 6.30cm, 7.00cm, 7.50cm, 7.70cm, 8.35cm, 8.61cm, 9.02cm και 9.80cm. Η μέγιστη τιμή μετακίνησης είναι η 9.80cm και συναντάται κοντά στον 6^ο αριθμητικά όροφο από την κορυφή της εκμετάλλευσης.



Εικόνα 39. Στάδιο 27^ο, τελικό στάδιο εκμετάλλευσης και παρουσία στοιχείων αστοχίας (κάτω αριστερά) και διανύσματα παραμόρφωσης (κάτω δεξιά).



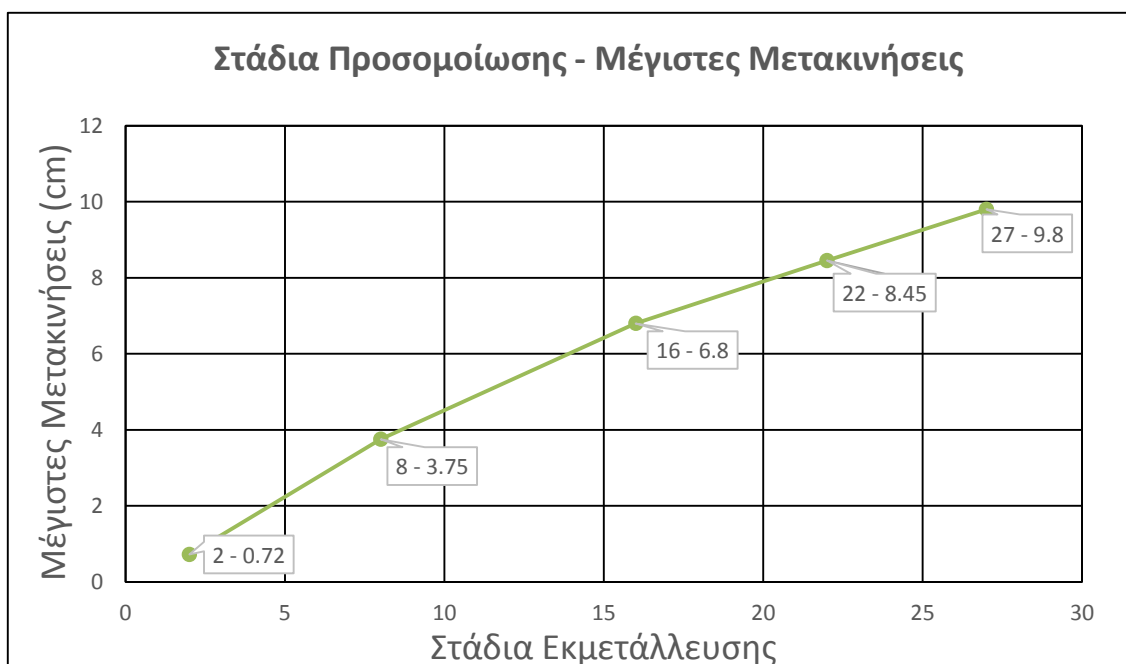
Εικόνα 40. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο (27^ο στάδιο) αναλυτικά.



Διάγραμμα 1. Στάδια προσομοίωσης με τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

Πίνακας 6. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή της εκμετάλλευσης στο ομοίωμα του συνολικού μεταλλείου σε διάφορα στάδια προσομοίωσης.

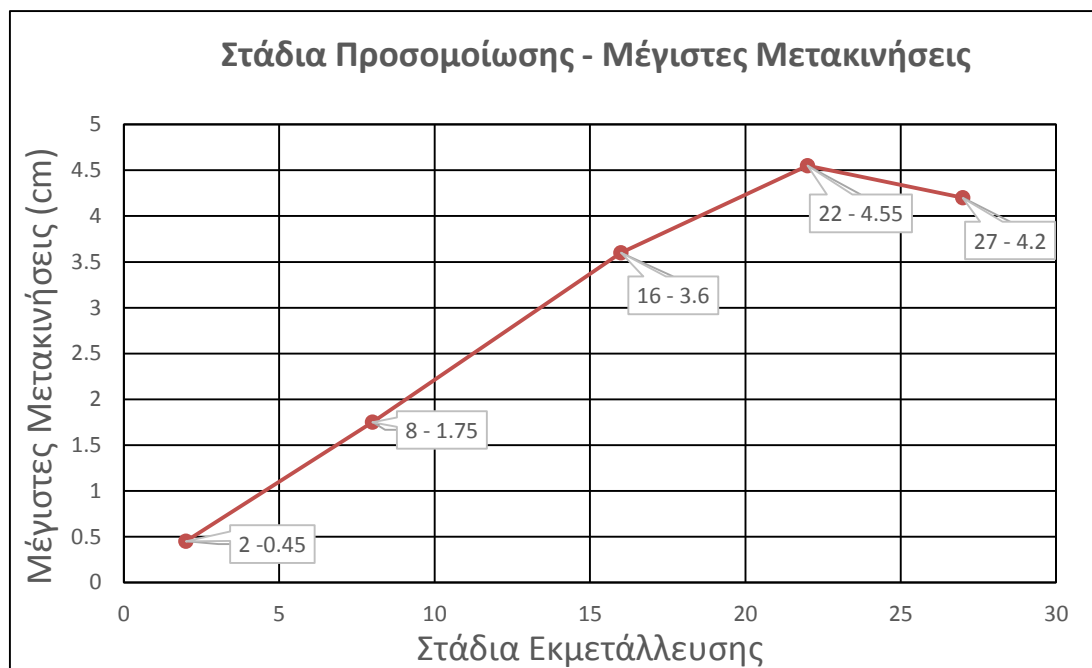
| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις | Ελάχιστες Μετακινήσεις |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 2° | 9.90mm | 1.80mm |
| 8° | 3.75cm | 1.00cm |
| 16° | 7.20cm | 1.60cm |
| 22° | 8.45cm | 1.95cm |
| 27° | 9.10cm | 2.10cm |



Διάγραμμα 2. Τα στάδια προσομοίωσης με τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή πάνω από το κοίτασμα.

Πίνακας 7. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή πάνω από την εκμετάλλευση στο ομοίωμα του συνολικού μεταλλείου σε διάφορα στάδια προσομοίωσης.

| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις | Ελάχιστες Μετακινήσεις |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 2° | 7.20mm | 4.50mm |
| 8° | 3.75cm | 1.75cm |
| 16° | 6.80cm | 3.60cm |
| 22° | 8.45cm | 4.55cm |
| 27° | 9.80cm | 4.20cm |

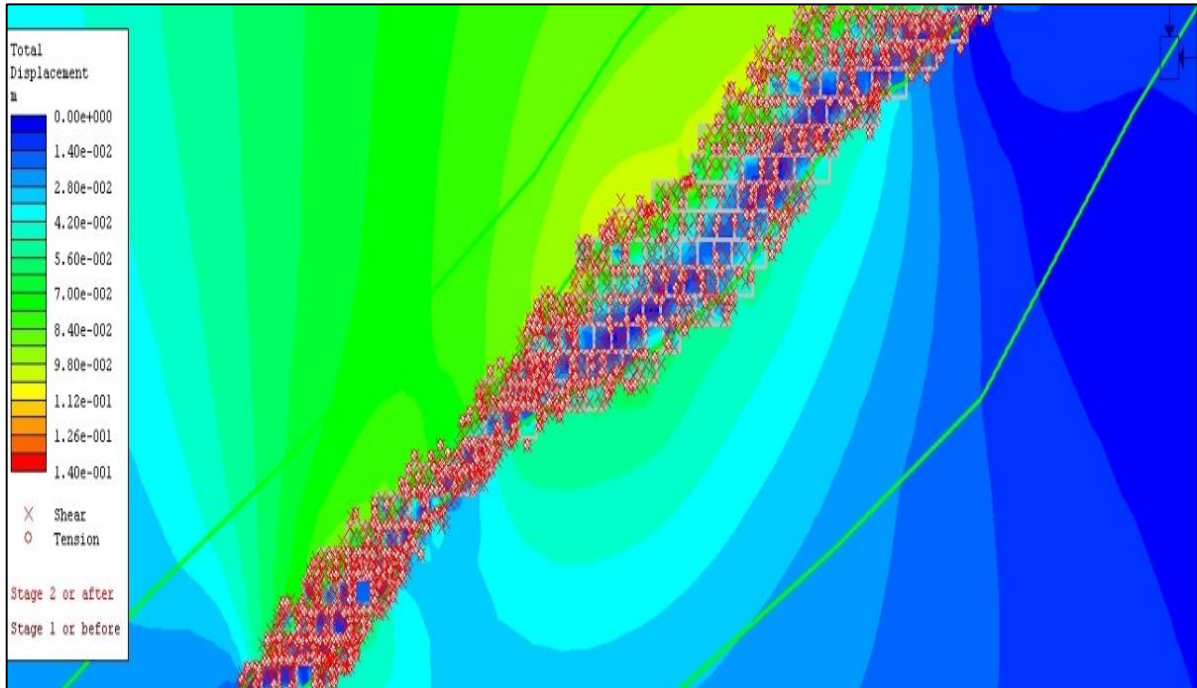


Διάγραμμα 3. Τα στάδια προσομοίωσης με τις μετακινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή κάτω από το κοίτασμα.

Πίνακας 8. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στο τμήμα κάτω από την εκμετάλλευση στο ομοίωμα του συνολικού μεταλλείου σε διάφορα στάδια προσομοίωσης.

| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις | Ελάχιστες Μετακινήσεις |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 2° | 4.50mm | 1.70mm |
| 8° | 1.75cm | 6.07mm |
| 16° | 3.60cm | 1.12cm |
| 22° | 4.55cm | 2.07cm |
| 27° | 4.20cm | 2.19cm |

Όσον αφορά την πλαστικοποίηση στο τελευταίο στάδιο της εκμετάλλευσης, αξίζει να αναφερθούν οι αποστάσεις των σημείων αστοχίας όπου αυτά εκτείνονται εκτός των ορίων της εκμετάλλευσης. Στοιχεία αστοχίας βρίσκονται στη μέγιστη απόσταση από το πάτωμα το κοιτάσματος στα 4.271m και στα 4.251m από την οροφή. Επίσης η πλαστική περιοχή βρίσκεται εντός των ορίων του κοιτάσματος ενώ κάποια στοιχεία αστοχίας, είτε διάτμησης (x), είτε εφελκυσμού (o), που βρίσκονται εκτός των ορίων απέχουν αποστάσεις 3.774m, 3.324m, 3.395m, 3.864m, 3.993m, 4.121m και 4.209m.

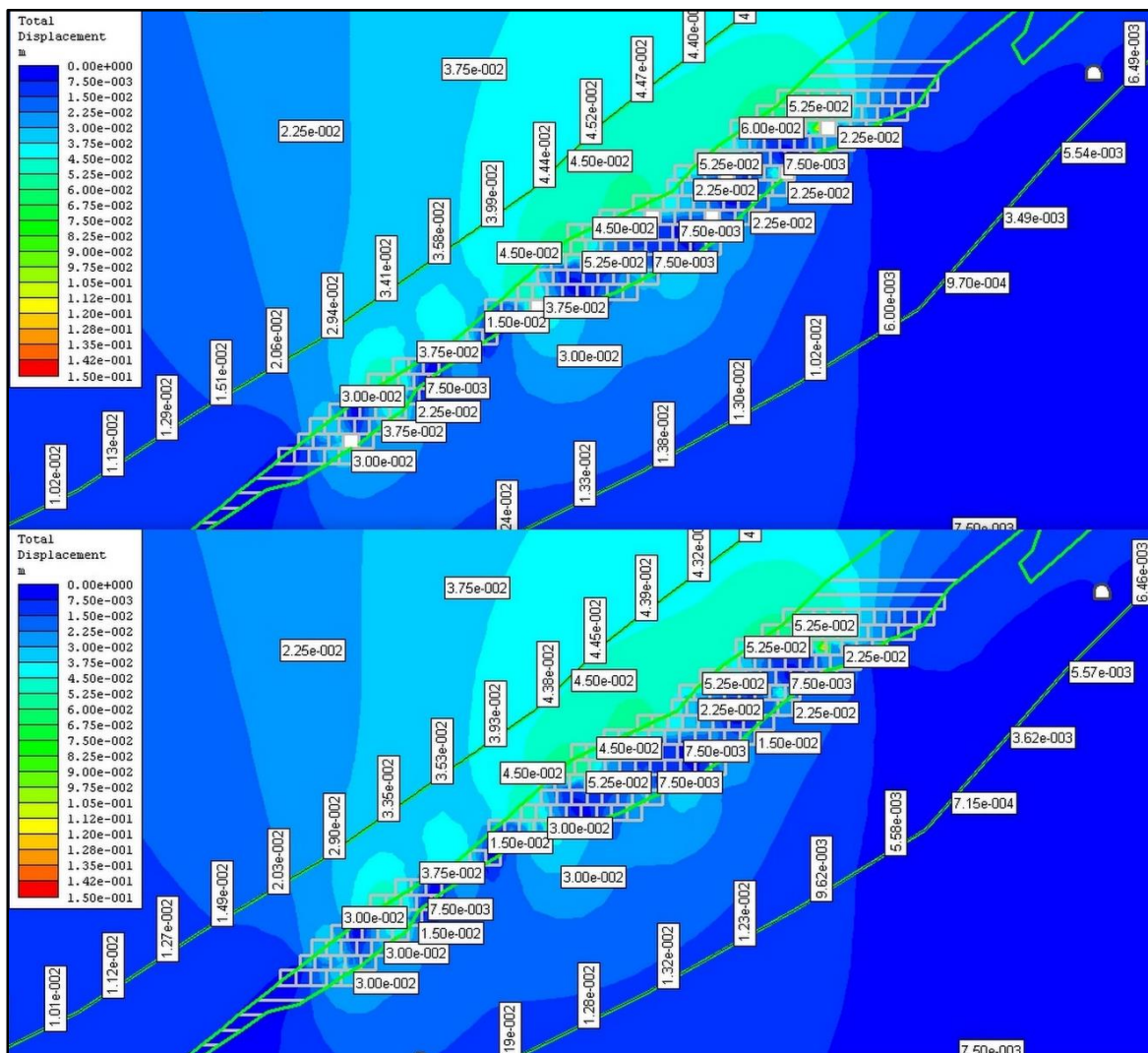


Εικόνα 41. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης του ομοιώματος του μεταλλείου.

6.4 Μεταβολές Παραμέτρων στο Αρχικό Μοντέλο

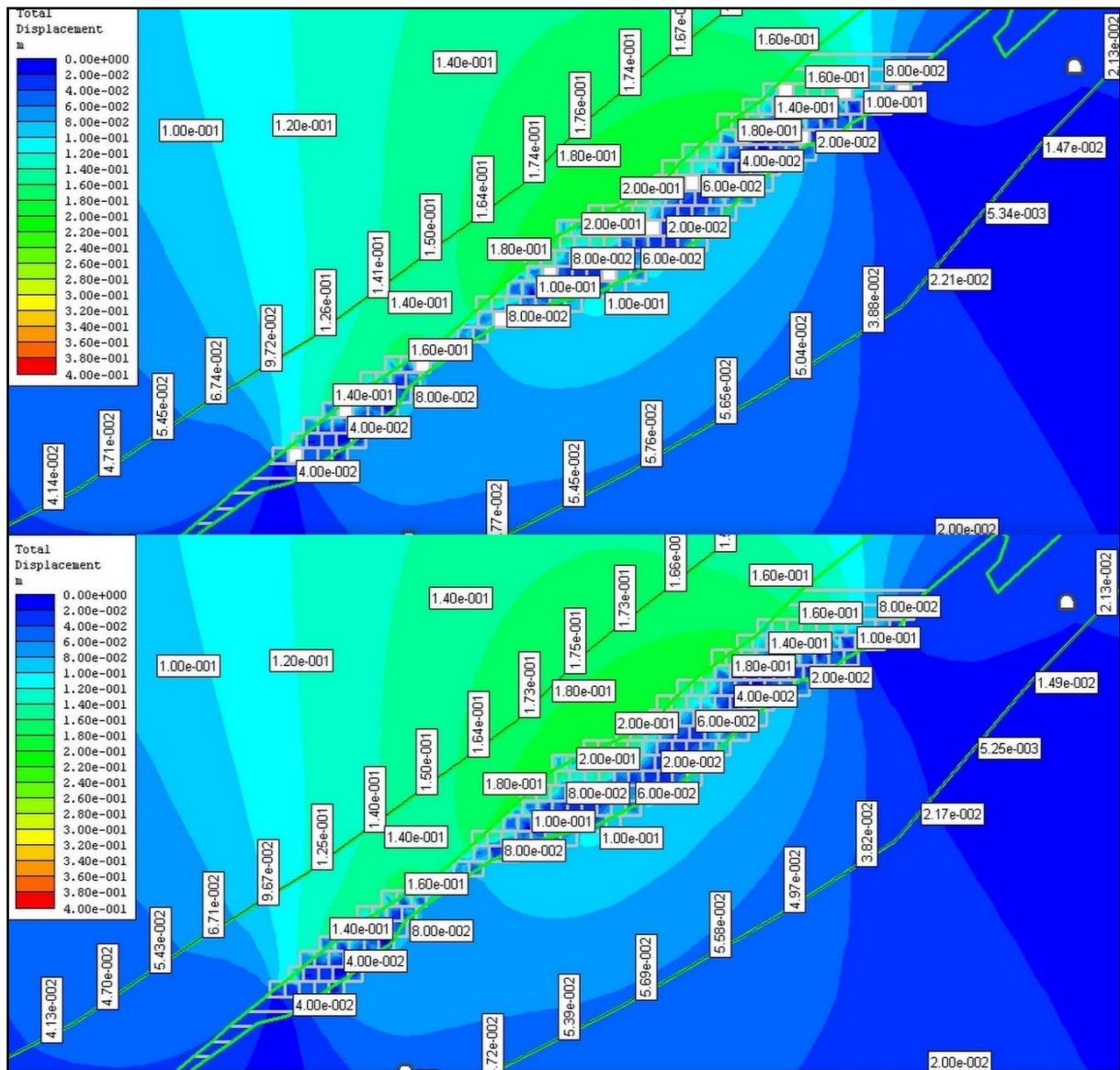
Εφόσον τα επιπρόσθετα μοντέλα στα οποία πραγματοποιήθηκαν μεταβολές στις ιδιότητες του υλικού λιθογόμωσης βασίζονται στο μοντέλο ομοιώματος του μεταλλείου χωρίς στοιχεία υποστήριξης, η παρουσίαση τους θα λάβει χώρα σε αυτό το σημείο. Τα στάδια της προσομοίωσης είναι 27 όπως και του βασικού μοντέλου και τα αποτελέσματα των αναλύσεων ακολουθούν έτσι ώστε να είναι δυνατό να συγκριθούν με εκείνα του αρχικού μοντέλου.

6.4.1 Μοντέλο Προσομοίωσης με μεταβολή στην αντοχή σ_c



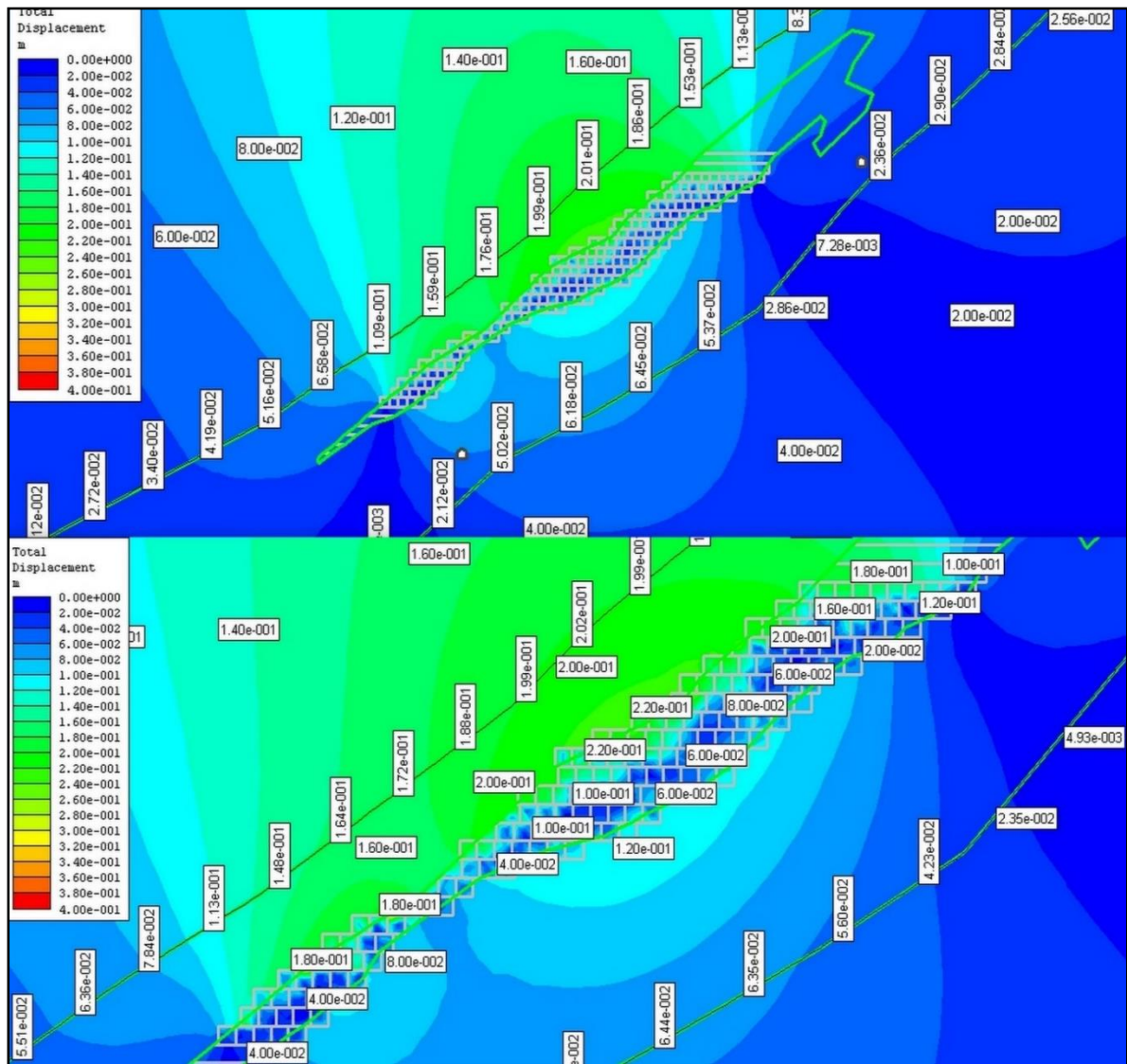
Εικόνα 42. Στάδια 8 και 9 στο μοντέλο με μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη της λιθογόμωσης.

Οι μετακινήσεις στα ανωτέρω στάδια λαμβάνουν τιμές από 7.50mm έως 5.25cm (στάδιο 9^ο) και 6.00cm (στάδιο 8^ο) με ενδιάμεσες τα 1.50cm, 2.25cm, 3.00cm, 3.75cm και 4.50cm στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης. Στο τμήμα πάνω από αυτή οι μετακινήσεις είναι 2.25cm, 2.90cm, 3.35cm, 3.75cm, 4.38cm, 4.50cm ενώ στο



Εικόνα 44. Μετακινήσεις στα στάδια εκμετάλλευσης 22 (πάνω) και 23.

Στα παραπάνω στάδια οι μετακινήσεις που σημειώνονται είναι αρκετά υψηλές, της τάξης των 10.00cm, 12.00cm, 14.00cm στην περιοχή του τεκτονικού αμφιβολίτη. Οι μετακινήσεις στην περιοχή του στρώματος του μαρμάρου πάνω από την εκμετάλλευση, λαμβάνουν τιμές 14.00cm, 18.00cm και 20.00cm κοντά στα όρια του κοιτάσματος. Μέσα στην εκμετάλλευση υπάρχουν μετακινήσεις με τιμές 2.00cm, 4.00cm, 6.00cm, 8.00cm, 10.00cm, 14.00cm, 16.00cm και φτάνουν μέχρι τα 18.00cm.



Εικόνα 45. Τελικό στάδιο 27 εκμετάλλευσης με πλήρωση των κενών με σώμα λιθογόμωσης.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η μείωση της αντοχής του υλικού λιθογόμωσης σ_c σε 1MPa σημαίνει πως μειώνεται η περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο. Επομένως, το υλικό που καλείται να πληρώσει τα κενά της εκμετάλλευσης δεν μπορεί να ανταπεξέλθει σωστά με αυτά τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Αυτό γίνεται κατανοητό από την μελέτη των μετακινήσεων στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης, οι οποίες φτάνουν σε υψηλές τιμές στην τάξη των εκατοστών. Μέγιστη μετακίνηση στο σώμα της εκμετάλλευσης είναι εκείνη των 22.00cm, ενώ υπάρχουν τιμές 2.00cm, 4.00cm, 6.00cm, 8.00cm, 12.00cm, 16.00cm, 18.00cm, 20.00cm. Παράλληλα γύρω και πάνω από το κοίτασμα οι μετακινήσεις της βραχώμαζας λαμβάνουν τιμές 6.00cm, 8.00cm, 12.00cm, 14.00cm και 16.00cm στο τμήμα του τεκτονικού αμφιβολίτη.

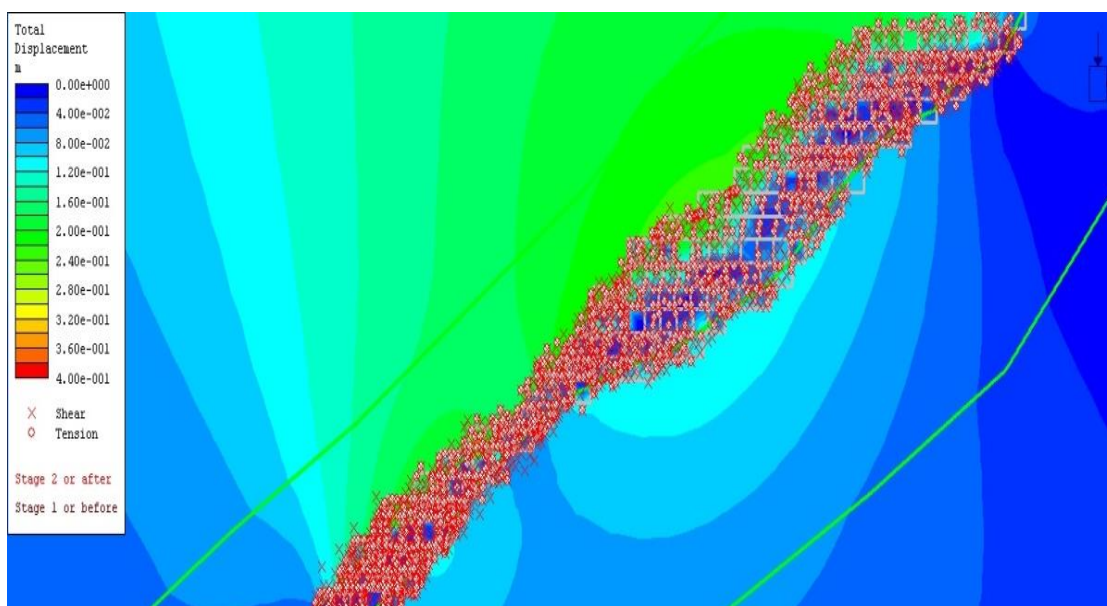
Πίνακας 9. Τιμές μετακινήσεων της βραχώμαζας στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης με μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

| Αντοχή σ_c (MPa) | 4MPa | 1MPa |
|-------------------------|--------|---------|
| Στάδιο 2 | 9.90mm | 1.26cm |
| Στάδιο 8 | 3.75cm | 5.25cm |
| Στάδιο 16 | 7.20cm | 13.50cm |
| Στάδιο 22 | 8.45cm | 18.00cm |
| Στάδιο 27 | 9.10cm | 20.00cm |

Πίνακας 10. Τιμές μετακινήσεων της βραχώμαζας γύρω από το κοίτασμα με μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

| Αντοχή σ_c (MPa) | 4MPa | 1MPa |
|-------------------------|--------|---------|
| Στάδιο 2 | 7.20mm | 6.30mm |
| Στάδιο 8 | 3.75cm | 4.50cm |
| Στάδιο 16 | 6.80cm | 11.70cm |
| Στάδιο 22 | 8.45cm | 18.00cm |
| Στάδιο 27 | 9.80cm | 20.00cm |

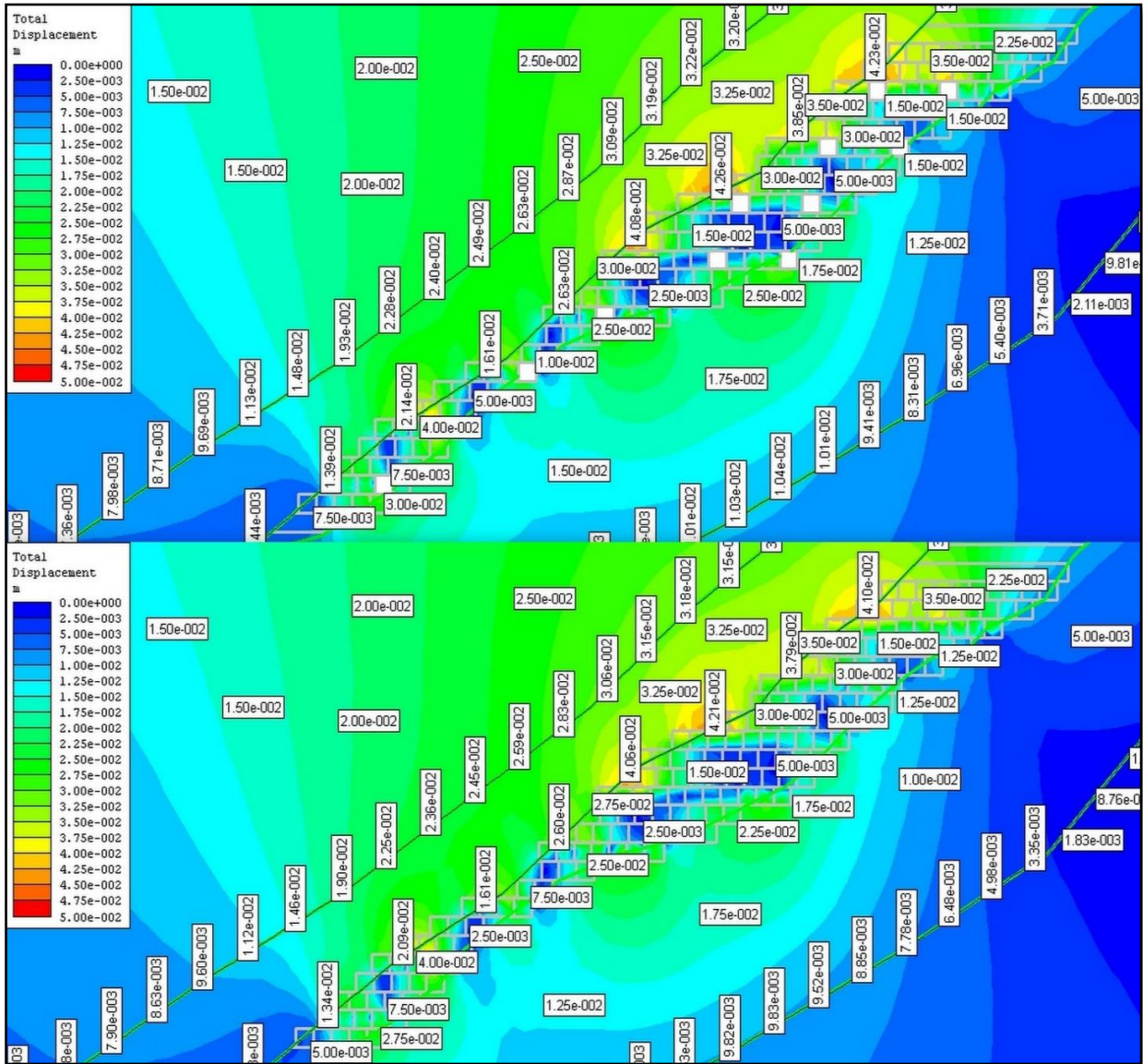
Η πλαστικοποίηση στο τελικό στάδιο έχει ως εξής. Οι μέγιστες αποστάσεις κάποιων στοιχείων αστοχίας από τα όρια τη εκμετάλλευσης είναι μεγαλύτερες από το βασικό μοντέλο με $\sigma_c = 4\text{MPa}$ στο υλικό λιθογόμωσης, με 6.004m από την οροφή και 4.969m από το δάπεδο του κοιτάσματος. Με ενδιάμεσες αποστάσεις 1.489m, 2.668m, 3.186m.



Εικόνα 46. Στοιχεία αστοχία στην περιοχή της εκμετάλλευσης για $\sigma_c = 1\text{MPa}$.

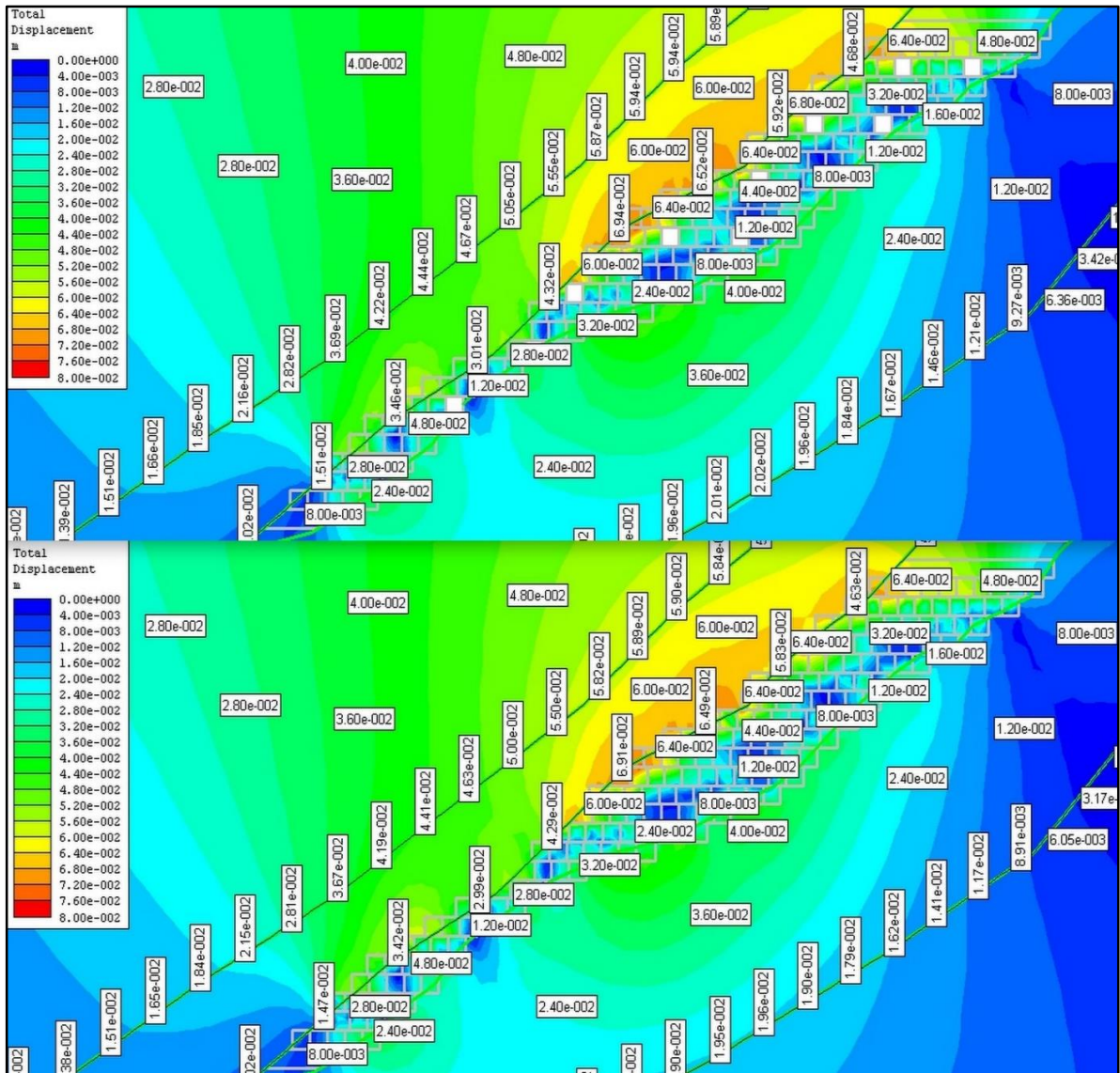
6.4.2 Μοντέλα Προσομοίωσης με μεταβολή στο Μέτρο Ελαστικότητας E

6.4.2.1 Μέτρο Ελαστικότητας E= +25%



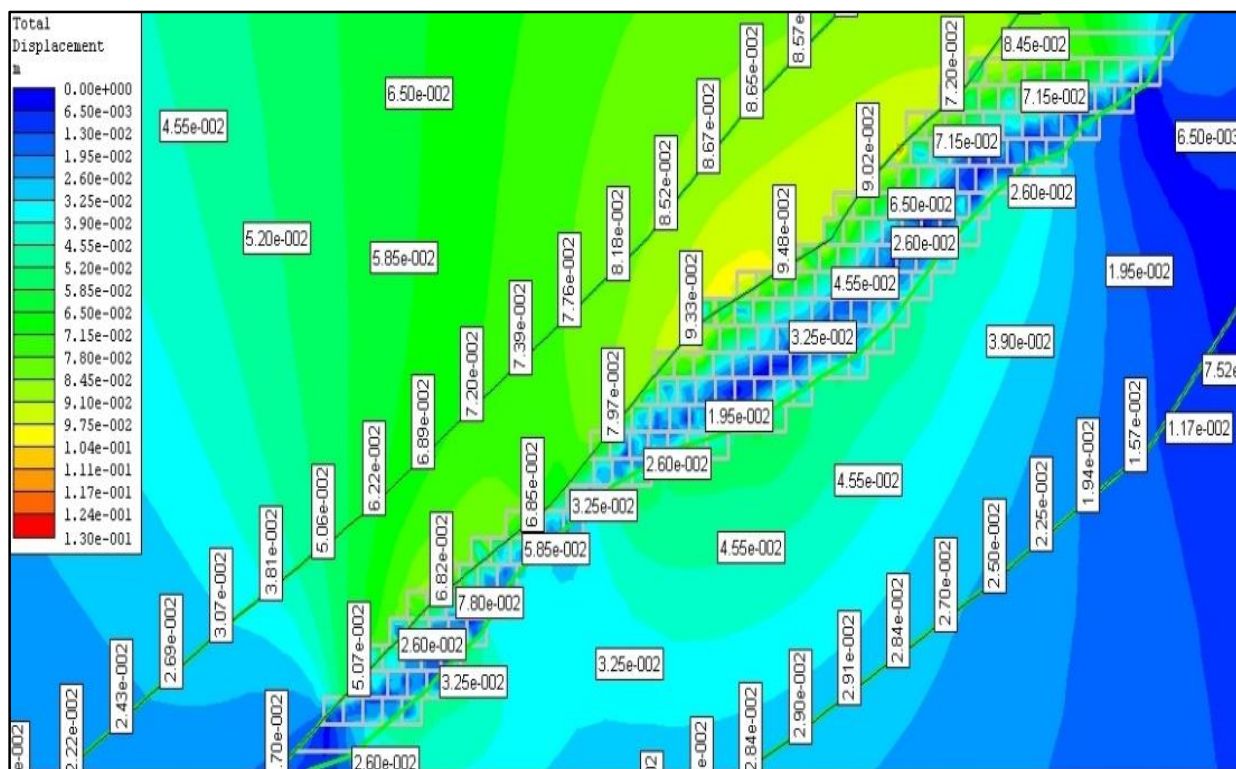
Εικόνα 47. Μετακινήσεις της βραχώμαζας στα στάδια 8 και 9 με υψηλό μέτρο ελαστικότητας.

Οι συνολικές μετακινήσεις στα ανωτέρω στάδια, που έλαβαν χώρα στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης έχουν τιμές από 2.50mm, 5.00mm, 7.50mm, 1.50cm έως 3.50cm. Παράλληλα στην περιοχή που περιβάλλει το κοίτασμα και καταλαμβάνεται από στρώμα μαρμάρου, καταγράφονται μετακινήσεις από 1.00cm, 1.25cm, 1.75cm κάτω από αυτό και 1.50cm, 2.00cm, 2.50cm, 3.25 πάνω από το κοίτασμα. Ενώ στο τμήμα του τεκτονικού αμφιβολίτη οι μετακινήσεις έλαβαν τιμές 1.50cm, 2.00cm και 2.50cm.



Εικόνα 48. Μέγιστες μετακινήσεις στο μοντέλο με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, στα στάδια 16 -17.

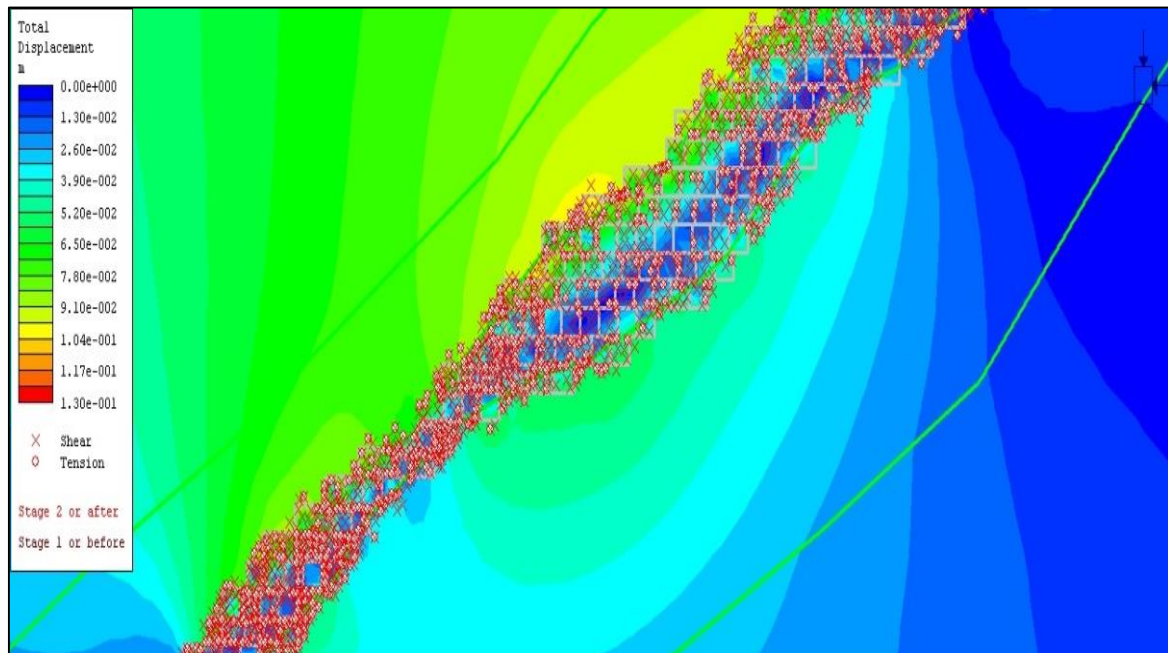
Το μέτρο ελαστικότητας είναι αυξημένο κατά 25% οπότε αναμένεται καλύτερη αντοχή του υλικού λιθογόμωσης ως προς τάσεις που ασκούνται σε αυτό. Οπότε οι μετακινήσεις αναμένονται μικρότερες από το βασικό μοντέλο με GSI=60 και ακόμα μικρότερες από το επόμενο, όπου μειώθηκε το μέτρο του Young. Γύρω από την εκμετάλλευση παρατηρούνται μετακινήσεις με τιμές 2.16cm, 2.80cm, 3.60cm, 4.00cm, 4.80cm, 5.55cm, 6.00cm και 1.20cm, 1.40cm, 1.90cm, 2.40cm, 3.60cm, 4.00cm κάτω από αυτή. Στην περιοχή ανάπτυξης των στοών σημειώνονται μετακινήσεις από 8.00mm, 1.20cm έως 6.00cm και 6.94cm με ενδιάμεσες τιμές 1.47cm, 1.60cm, 2.80cm, 3.20cm, 4.40cm, 4.80cm.



Εικόνα 49. Μετακινήσεις της βραχόμαζας γύρω και μέσα στο κοίτασμα του τελικού σταδίου (27^ο) της εκμετάλλευσης.

Στο τμήμα του τεκτονικού αμφιβολίτη οι μετακινήσεις είναι της τάξης των 4.88cm και φτάνουν έως τα 6.50cm. Οι τιμές των μετακινήσεων που εντοπίζονται στο στρώμα του μαρμάρου, πάνω από το κοίτασμα, κυμαίνονται από 3.07cm έως 8.57cm με ενδιάμεσες τιμές τα 5.06cm, 6.22cm, 7.20cm, 7.76cm και κάτω από το κοίτασμα λαμβάνουμε τιμές από 1.95cm, 3.25cm, 3.90cm, 4.55cm με 7.52mm, 1.17cm, 1.57cm, 2.50cm, 2.90cm στα όρια του μαρμάρου με τον βιοτιτικό – αμφιβολιτικό γνεύσιο. Στην περιοχή εσωτερικά του κοιτάσματος η βραχόμαζα μετακινείται από 1.95cm έως 7.80cm με ενδιάμεσες τιμές 2.60cm, 3.25cm, 4.55cm, 5.85cm και 6.82cm, 7.97cm, 9.33cm στα άνω όρια του κοιτάσματος.

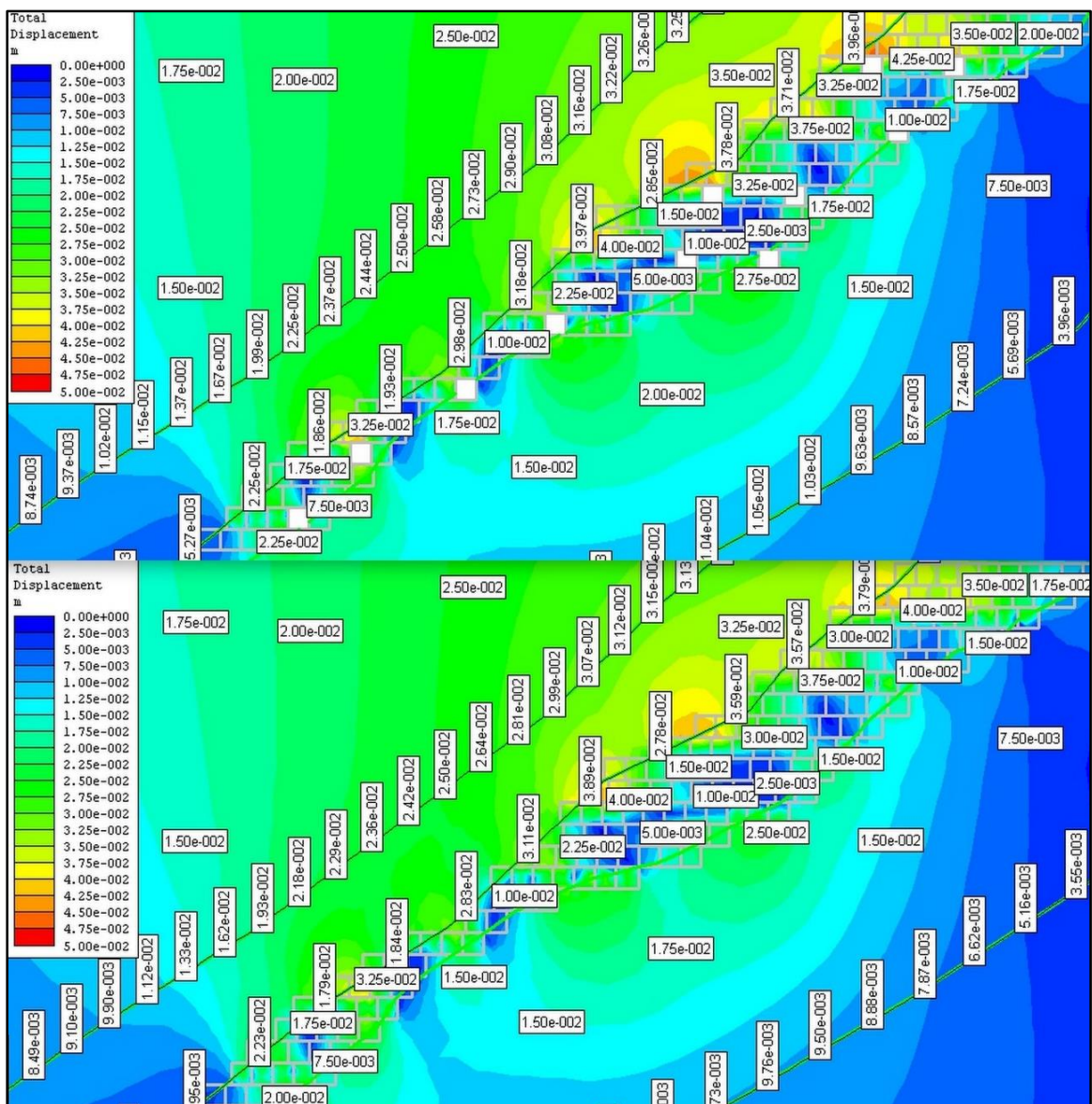
Τα στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της συγκεκριμένης προσομοίωσης παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί. Η πλαστική περιοχή βρίσκεται εντός του κοιτάσματος αλλά κάποια στοιχεία αστοχίας παρατηρούνται εκτός των ορίων σε μέγιστες αποστάσεις των 4.412m από την οροφή και 3.790m από το δάπεδο του κοιτάσματος. Διάφορα στοιχεία αστοχίας μέσα στο σώμα του μαρμάρου απέχουν από την οροφή του κοιτάσματος 1.455m, 3.093m, 3.394m, 3.673m, 4.061m ενώ από το δάπεδο 3.263m, 3.322m, 3.534m.



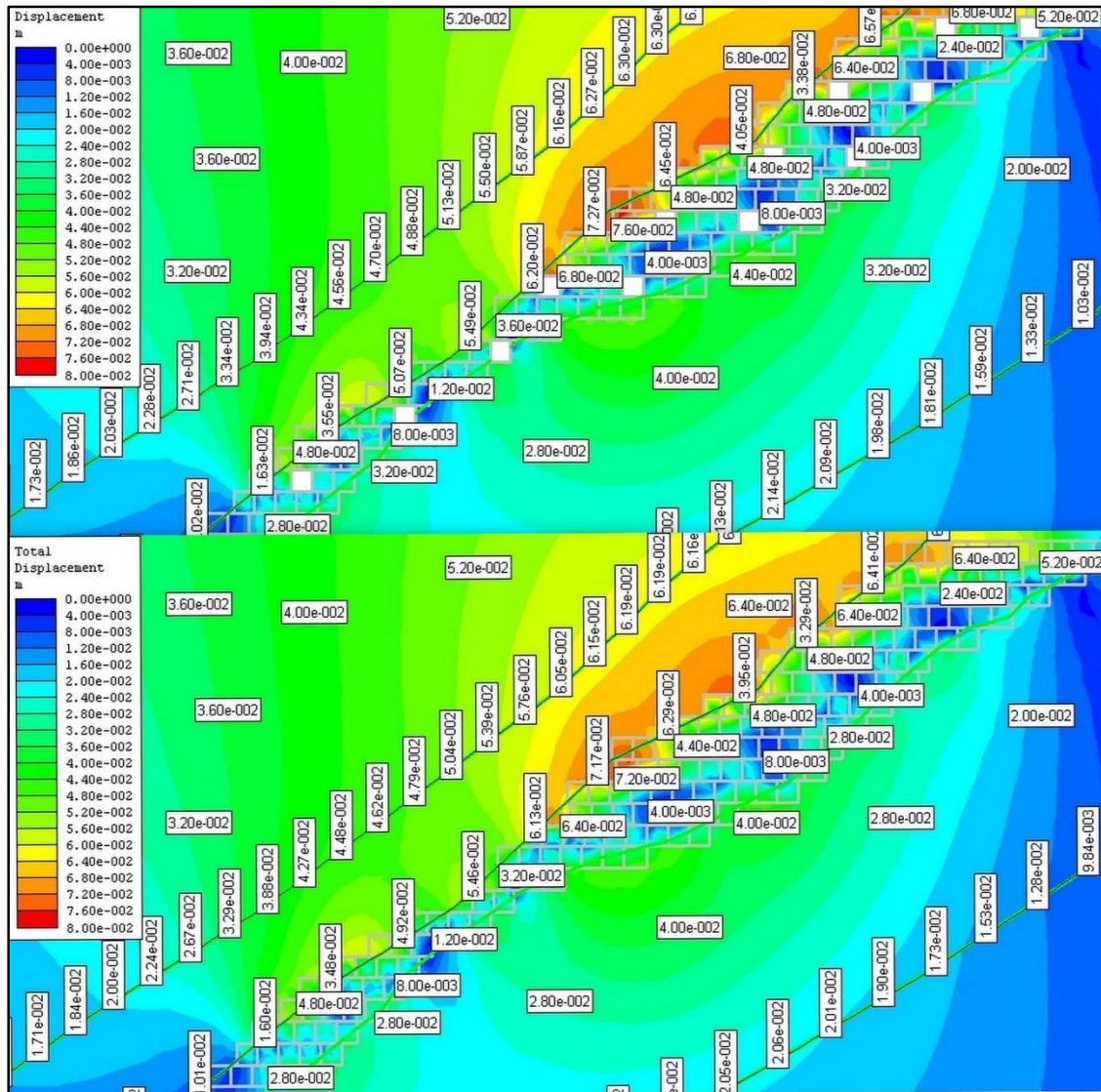
Εικόνα 50. Στοιχεία αστοχίας στο μοντέλο με $E=3125\text{MPa}$.

6.4.2.2 Μέτρο Ελαστικότητας E= -25%

Με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας του πληρωτικού υλικού οι μετακινήσεις της βραχόμαζας αυξάνονται. Συγκεκριμένα στο εσωτερικό του κοιτάσματος παρατηρούνται μετακινήσεις 7.50mm, 1.00cm, 1.50cm, 1.75cm, 2.00cm, 3.25cm μέχρι και τα 4.00cm. Εξωτερικά και περιμετρικά της εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις κυμαίνονται από 1.50cm έως 3.25cm στο στρώμα μαρμάρου ενώ στον τεκτονικό αμφιβολίτη παίρνουμε τιμές 1.50cm, 1.75cm, 2.00cm και 2.50cm. Κάτω από το κοιτάσμα στην περιοχή του μαρμάρου παρατηρούνται μετακινήσεις με τιμές από 7.50mm, 1.50cm, 1.75cm (στο 9^ο στάδιο) και 2.00cm (στο 8^ο στάδιο).



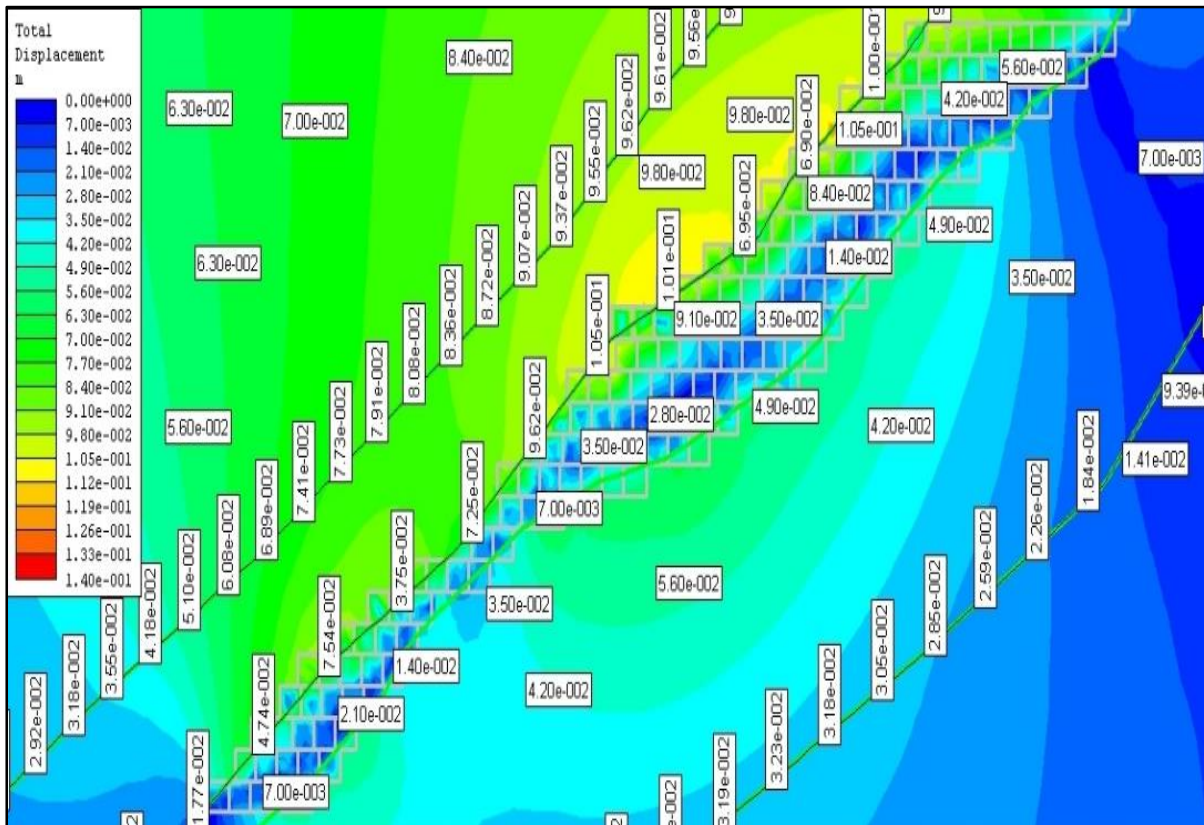
Εικόνα 51. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στα στάδια 8 και 9 του μοντέλου προσομοίωσης με μείωση του μέτρου ελαστικότητας.



Εικόνα 52. Τιμές μέγιστων μετακινήσεων στα αντίστοιχα στάδια 16 - 17 με μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 25%.

Στην περίπτωση αυτή έχουμε μείωση του μέτρου ελαστικότητας E από τα 2500MPa στα 1875MPa που σημαίνει μικρότερη απορρόφιση φορτίων του υλικού λιθογόμωσης καθώς το μέτρο αντίστασης στις παραμορφώσεις μειώνεται. Παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων 3.60cm εκεί όπου είχαμε 2.80cm, 4.00cm όπου είχαμε 3.60cm, 5.20cm όπου είχαμε 4.80cm, 4.27cm, 4.79cm, 5.39cm, 6.15cm, 6.40cm, 6.80cm στην περιοχή πάνω από το μέταλλευμα και περιμετρικά αυτού, ενώ κάτω από αυτό σημειώνονται τιμές 2.00cm, 2.80cm, 3.20cm, 4.00cm, 4.40cm εκεί όπου είχαμε 1.20cm, 2.40cm, 3.60cm. Στο εσωτερικό του κοιτάσματος οι μετακινήσεις έλαβαν τιμές 8.00mm, 1.20cm, 2.80cm, 3.20cm, 4.00cm, 4.40cm, 4.80cm, 5.20cm, 6.29cm, 6.40cm με μεγαλύτερη τιμή αυτή των 7.20cm.

Στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης με μειωμένο το μέτρο ελαστικότητας E κατά 25% οι μετακινήσεις στο κοίτασμα λαμβάνουν τιμές από 1.40cm έως 9.10cm ενώ χαμηλά και λίγο πιο κάτω από τη μέση του κοιτάσματος υπάρχει ελάχιστη μετακίνηση των 7.00mm τιμή που συναντάται και στο βασικό μοντέλο με $E= 2500\text{MPa}$. Στην περιοχή πάνω από το κοίτασμα παρουσιάζονται μετακινήσεις με τιμές 5.60cm, 6.30cm, 7.00cm, 7.73cm, 8.08cm, 8.40cm, 9.55cm και 9.80cm. Ενώ στο τμήμα που βρίσκεται κάτω από την εκμετάλλευση οι τιμές των μετακινήσεων είναι 7.00mm, 1.41cm, 1.84cm, 2.85cm και 3.50cm, 4.20cm, 5.60cm κοντά στο κοίτασμα.



Εικόνα 53. Μετακινήσεις της βραχώμαζας στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης, στάδιο 27°.

Πίνακας 11. Μέγιστες τιμές μετακινήσεων της βραχομάζας μέσα στην περιοχή του κοιτάσματος, με μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας.

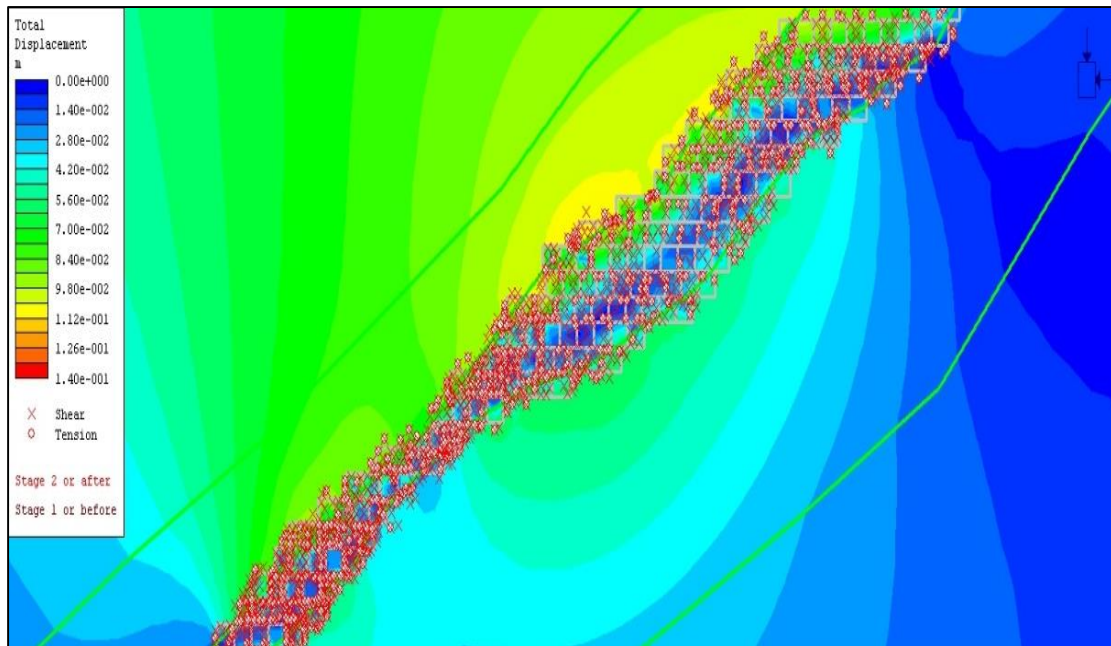
| E(MPa) | 1875MPa | 2500MPa | 3125MPa |
|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Στάδιο 2 | 8.10mm | 9.90mm | 6.30mm |
| Στάδιο 8 | 4.25cm | 3.75cm | 3.50cm |
| Στάδιο 16 | 7.60cm | 7.20cm | 4.80cm |
| Στάδιο 22 | 9.10cm | 8.45cm | 8.45cm |
| Στάδιο 27 | 10.10cm | 9.10cm | 7.15cm |

Πίνακας 12. Μέγιστες τιμές μετακινήσεων της βραχομάζας που περιβάλλει το κοίτασμα, με μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας.

| E(MPa) | 1875MPa | 2500MPa | 3125MPa |
|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Στάδιο 2 | 8.10mm | 7.20mm | 7.20mm |
| Στάδιο 8 | 3.50cm | 3.75cm | 3.25cm |
| Στάδιο 16 | 6.80cm | 6.80cm | 6.00cm |
| Στάδιο 22 | 9.10cm | 8.45cm | 7.15cm |
| Στάδιο 27 | 9.80cm | 9.80cm | 9.48cm |

Τα στοιχεία αστοχίας της βραχομάζας που περιβάλλει το κοίτασμα βρίσκονται κατά κύριο λόγο εντός των ορίων του κοιτάσματος. Οφείλονται είτε σε διάτμηση, είτε σε εφελκυσμό και η θέση του γίνεται ορατή στην εικόνα που ακολουθεί.

Στοιχεία αστοχίας παρατηρούνται στην περιοχή του μαρμάρου με μέγιστη απόσταση από την οροφή του κοιτάσματος 4.137m και από το πάτωμα 4.293m. Τα στοιχεία αστοχίας μέσα στην περιοχή του κοιτάσματος όπου πλέον έχει αντικατασταθεί από το υλικό της λιθογόμωσης αποτελούνται από στοιχεία αστοχίας σε διάτμηση και σε εφελκυσμό.

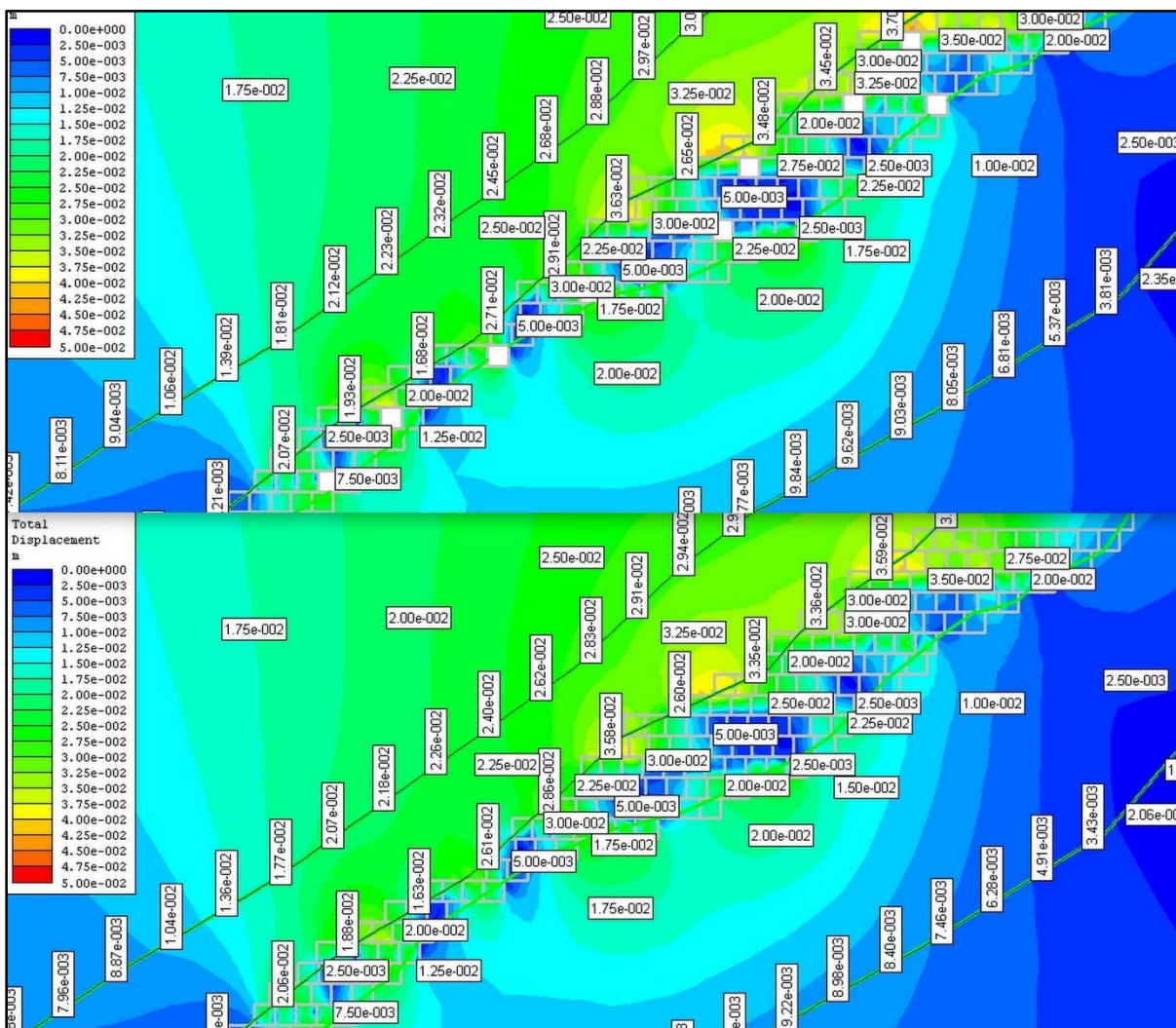


Εικόνα 54. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο του μοντέλου με μειωμένο E κατά 25%.

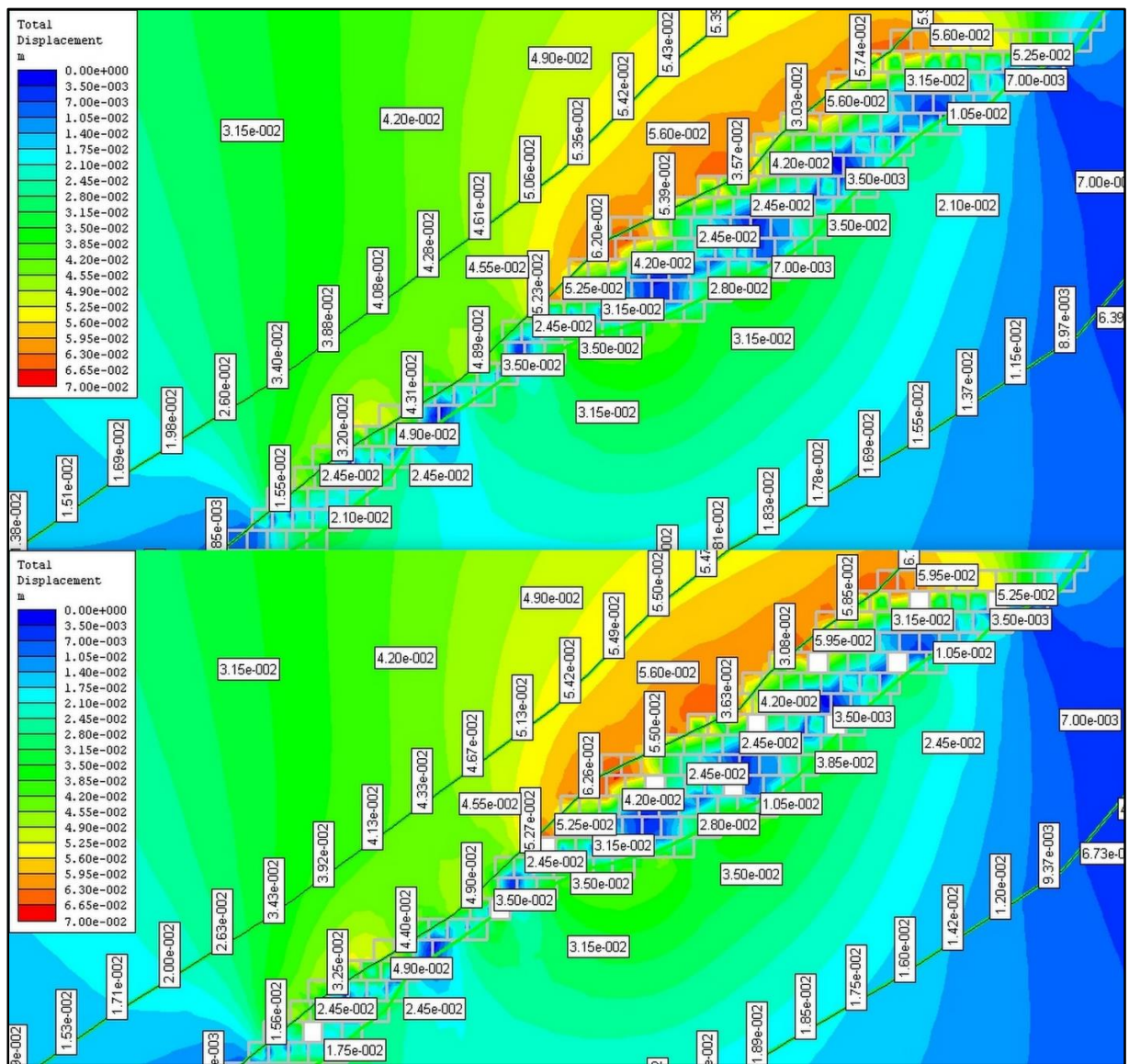
6.4.3 Μοντέλα Προσομοίωσης με μεταβολή στο GSI

6.4.3.1 Δείκτης GSI = 70

Στα στάδια 8 και 9 που απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα καταγράφονται οι μετακινήσεις της βραχώμαζας καθώς οι εκμετάλλευση βρίσκεται στους πρώτους υψομετρικά ορόφους. Γύρω από την εκμετάλλευση και πάνω από αυτή, στο χώρο που καταλαμβάνει ο αμφιβολίτης και το μάρμαρο, υπάρχουν συνολικές μετακινήσεις των 1.75cm, 1.81cm, 2.25cm, 2.32cm, 2.50cm, 2.68cm, 2.88cm και 3.25cm. Μέσα στην περιοχή του κοιτάσματος παρατηρούνται τιμές μεταξύ των δύο σταδίων από 1.93cm σε 1.88cm, από 1.68cm σε 1.63cm, από 2.25cm σε 2.00cm, από 2.71cm σε 2.61cm, από 3.25cm σε 3.00cm, από 3.00cm σε 2.75cm. Επίσης στην εκμετάλλευση έχουμε τιμές μετακινήσεων όπως 5.00mm, 7.50mm, 1.25cm, 2.25cm και 3.50cm. Στην περιοχή κάτωθεν της εκμετάλλευσης έχουμε μετακινήσεις από 1.30mm, 2.35mm, 6.37mm, 8.05mm, 9.52mm, 1.00cm, 1.75cm και 2.00cm.

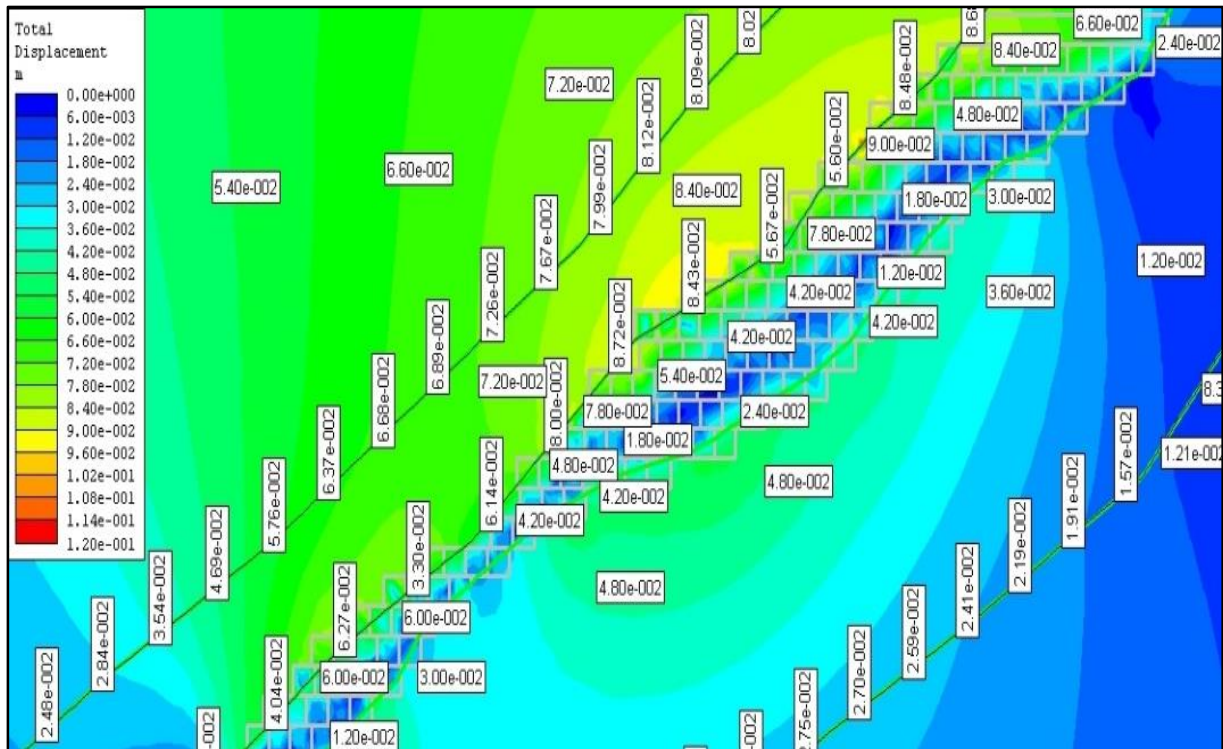


Εικόνα 55. Συνολικές μετακινήσεις στα προσομοιωτικά στάδια 8 και 9.



Εικόνα 56. Στάδια 16 και 17 στη προσομοίωση με μεγαλύτερο GSI.

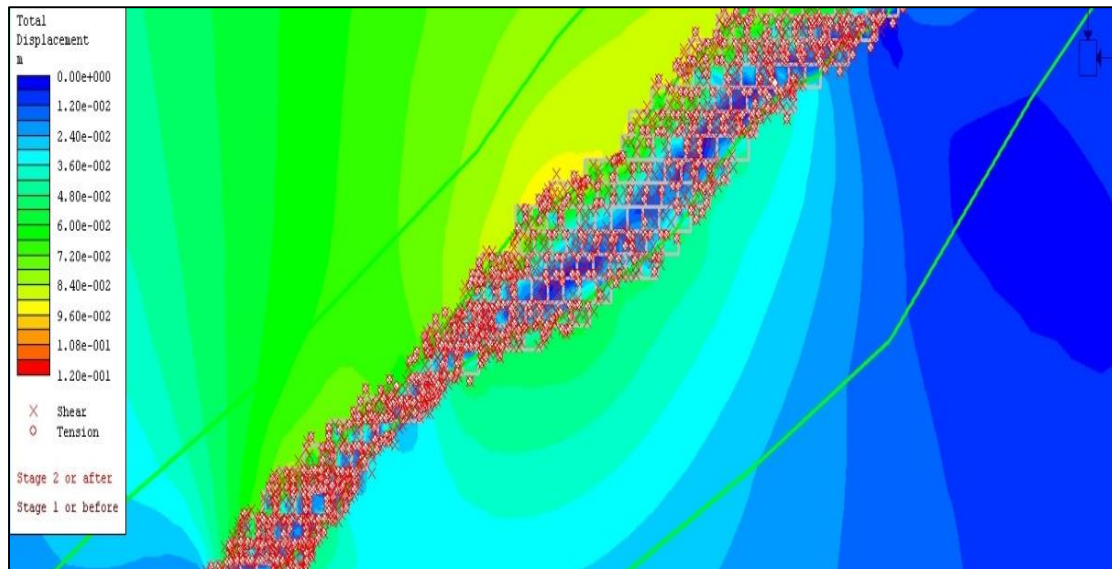
Στα στάδια αυτά όπου έχουμε δείκτη $GSI = 70$, δηλαδή καλύτερα χαρακτηριστικά υλικού λιθογώμωσης οι μετακινήσεις γύρω από την εκμετάλλευση λαμβάνουν τις τιμές 3.15cm, 4.20cm, 4.90cm πάνω από το στρώμα του μαρμάρου, τιμές από 2.00cm, 2.63cm, 3.92cm, 4.33cm, 4.67cm, 5.49cm, 5.60cm στα όρια του μαρμάρου και μέσα σε αυτό, πάνω από την εκμετάλλευση, ενώ 2.45cm, 3.15cm, 3.50cm κάτω από την εκμετάλλευση και 2.87mm, 6.73mm, 9.37mm, 1.20cm, 1.60cm, 1.80cm στα όρια του μαρμάρου με τον βιοτιτικό – αμφιβολιτικό γνεύσιο. Στο εσωτερικό του κοιτάσματος οι μετακινήσεις παίρνουν τιμές 1.05cm, 1.75cm, 2.45cm, 2.80cm, 3.15cm, 3.50cm, 4.20cm, 4.90cm, 5.25cm γύρω από τις στοές και 1.05cm, 2.80cm, 3.08cm, 3.63cm, 4.40cm, 4.90cm, 5.27cm, 5.50cm, 6.26cm στα όρια του κοιτάσματος με το μάρμαρο.



Εικόνα 57. Συνολικές μετακινήσεις στο τελικό στάδιο (27) της προσομοίωσης με αυξημένο τον δείκτη GSI.

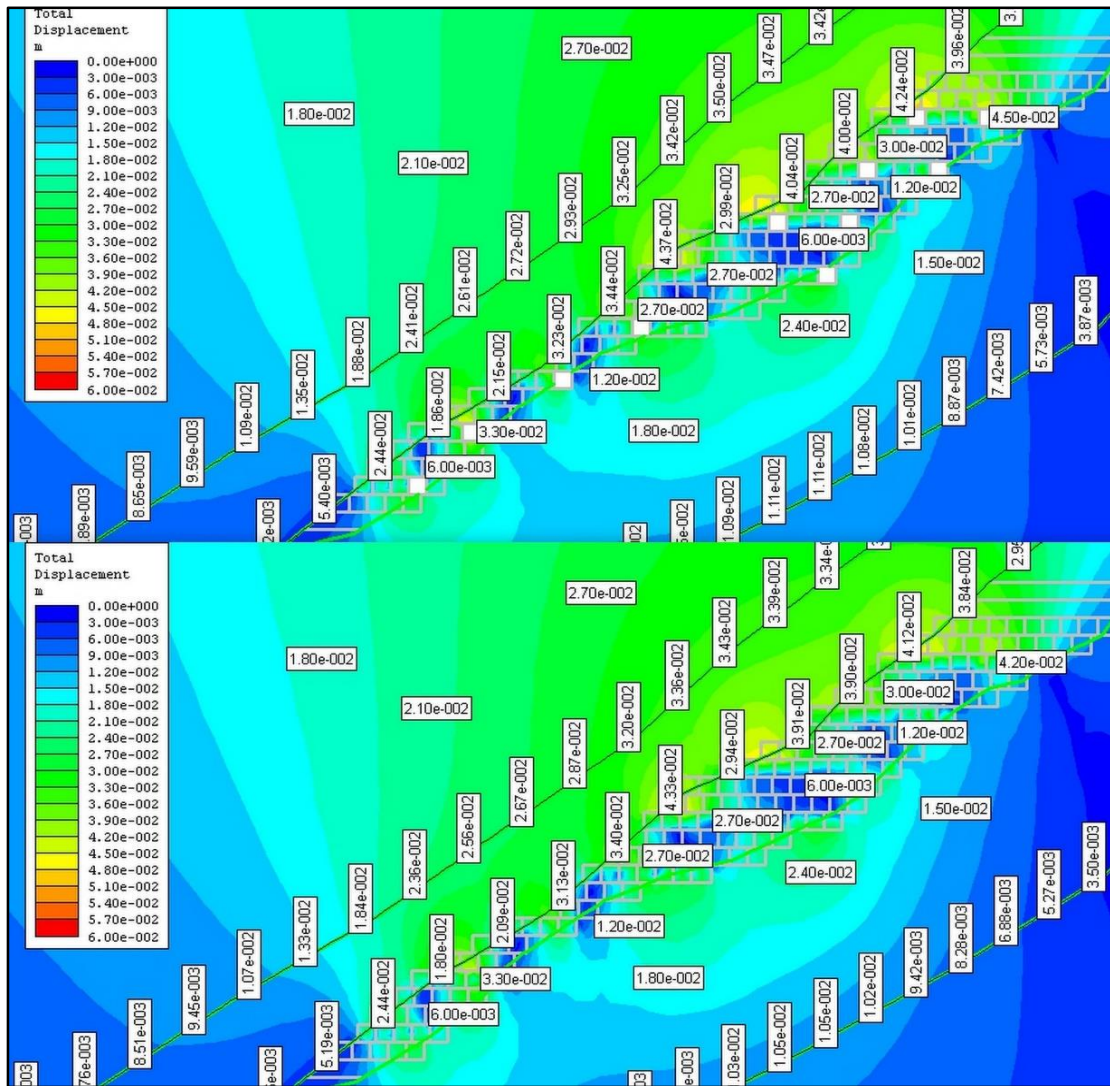
Στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου το μετάλλευμα έχει αντικατασταθεί πλήρως από το υλικό πλήρωσης με καλύτερες ιδιότητες (GSI=70) από εκείνο του βασικού μοντέλου (GSI=60). Συγκρίνοντας τις τασικές αναλύσεις των δύο μοντέλων περιμετρικά του κοιτάσματος και κοντά σε αυτό παρατηρούνται τιμές 7.20cm και 8.40cm ενώ στο βασικό μοντέλο με μικρότερο δείκτη GSI τιμές μεγαλύτερες όπως 7.70cm, 8.40cm, 9.10cm και 9.80cm. Στο τμήμα κάτω από την εκμετάλλευση στο στρώμα μαρμάρου και στα όρια του με τον βιοτιτικό – αμφιβολιτικό γνεύσιο, παρατηρούνται μετακινήσεις από 3.60cm – 4.20cm, 1.21cm – 1.52cm, 1.91cm – 2.19cm, 2.59cm – 2.95cm, 2.75cm – 3.03cm (μετακινήσεις με GSI=70 – μετακινήσεις με GSI=60).

Στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης παραθέτονται και τα στοιχεία αστοχίας της βραχώμαζας. Τα στοιχεία αστοχίας βρίσκονται εντός της περιοχής της εκμετάλλευσης, όμως κάποια από αυτά βρίσκονται σε απόστάσεις από την οροφή του κοιτάσματος 1.924m, 2.256m, 3.715m, 4.027m, 4.101m, 4.168m με μέγιστη απόσταση τα 4.251m. Ενώ από το δάπεδο οι αποστάσεις είναι 2.589m, 2.831m, 3.161m, 3.327m με μέγιστη τα 4.276m.



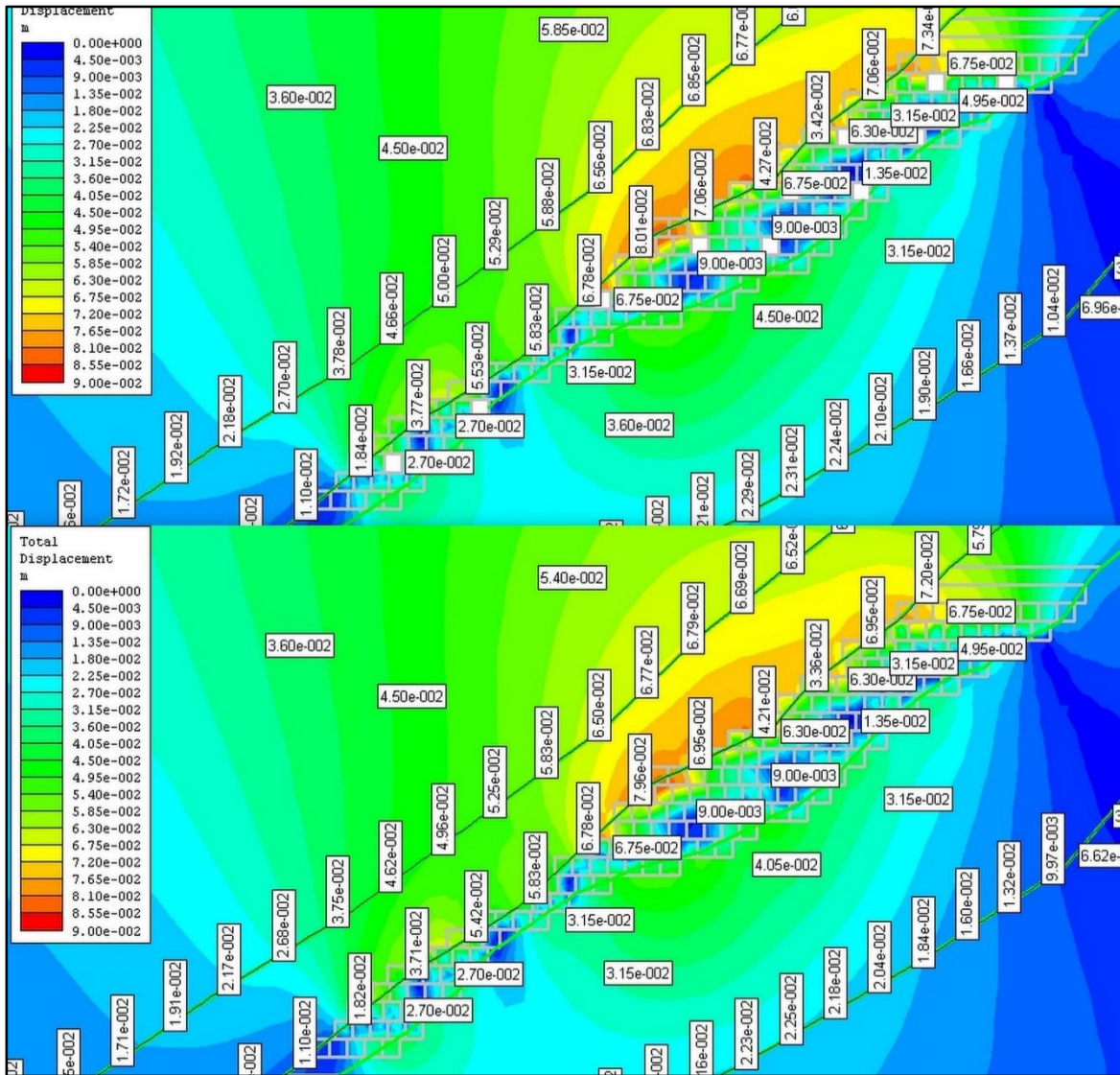
Εικόνα 58. Αστοχίες της βραχώμαζας στο τελικό στάδιο.

6.4.3.2 Δείκτης GSI = 50



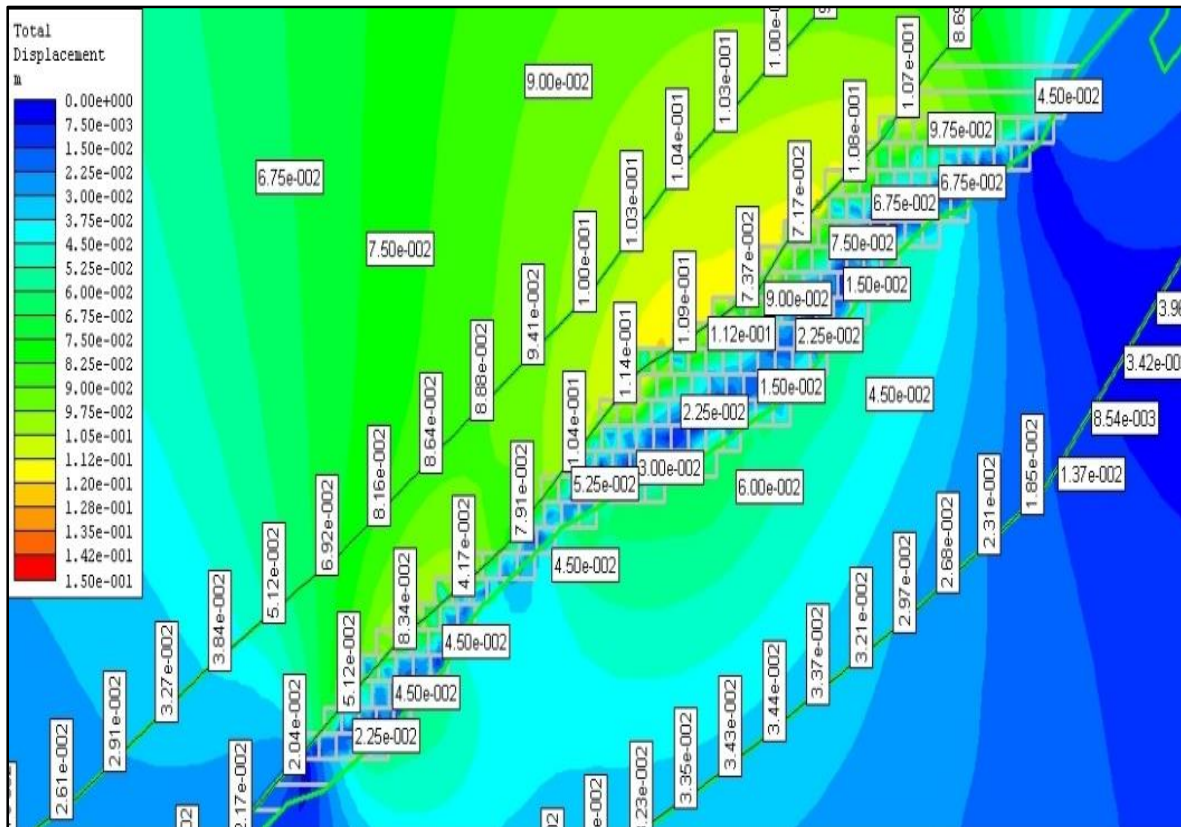
Εικόνα 59. Στάδια 8 και 9 στο παραμετρικό μοντέλο, με μείωση στο GSI της λιθογόμωσης.

Στην εικόνα που προηγείται καταγράφονται οι συνολικές μετακινήσεις της περιβάλλουσας το κοίτασμα βραχώμαζας στα στάδια 8 και 9 για τιμή του δείκτη GSI ίση με 50. Μέσα στα όρια του μεταλλεύματος όπου πραγματοποιούνται οι εργασίες της εκμετάλλευσης σημειώνονται μετακινήσεις με τιμές 6.00mm, 1.20cm, 2.09cm, 2.70cm, 3.00cm, 3.40cm, 4.20cm. Παράλληλα στην περιοχή άνω του κοιτάσματος σημειώνονται μετακινήσεις 1.07cm, 1.33cm, 1.80cm, 2.10cm, 2.36cm, 2.70cm, 3.20cm, 3.43cm ενώ κάτω από αυτό οι μετακινήσεις λαμβάνουν τιμές 1.50cm, 1.80cm, 2.40cm κοντά στο κοίτασμα και 1.05cm, 9.42mm, 8.28mm, 6.28mm, 5.27mm, 3.69mm, 3.50mm, 2.95mm, 1.77mm, 0.66mm μακριά από αυτό.



Εικόνα 60. Συνολικές μετακινήσεις στα στάδια 16 (πάνω) και 17 (κάτω) με μειωμένο GSI.

Το υλικό της λιθογόμωσης στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει $GSI=50$, γεγονός που σημαίνει χαμηλότερες ιδιότητες ως υλικό από ότι στα βασικά μοντέλα. Αναμένονται λοιπόν μεγαλύτερες μετακινήσεις καθώς το υλικό που καλύπτει τους κενούς χώρους έχει πιο αδύναμα μηχανικά χαρακτηριστικά. Συναντούμε μεγαλύτερες μετακινήσεις στη βραχώμαζα περιμετρικά της εκμετάλλευσης, όμως η διαφορά τους με το μοντέλο των 70 GSI είναι μικρού μεγέθους. Ενδεικτικά παρατηρούνται τιμές 1.32cm, 1.60cm, 2.16cm, 2.23cm, 3.15cm, 4.05cm, 3.60cm, 4.50cm, 5.40cm, 5.83cm, 6.50cm, 6.77cm στην περιοχή που περιβάλλει την εκμετάλλευση. Στο κοίτασμα, από τις εργασίες της εξόρυξης παρατηρούνται μετακινήσεις με τιμές 9.00mm, 1.35cm, 1.82cm, 2.70cm, 3.15cm, 3.71cm, 5.83cm, 6.30cm, 6.75cm, 7.96cm με την τελευταία τιμή να βρίσκεται στο όριο του κοιτάσματος με το στρώμα μαρμάρου, όπου έχουμε και την μεγαλύτερη μετακίνηση.



Εικόνα 61. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο του προσομοιωτικού μοντέλου με δείκτη GSI = 50.

Στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου συγκριτικά με το αντίστοιχο στάδιο στο μοντέλο με δείκτη GSI=70 παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων της βραχώμαζας λόγω των χαμηλότερων ιδιοτήτων του υλικού της λιθογόμωσης. Ειδικότερα οι μετακινήσεις γύρω από το σώμα του κοιτάσματος παίρνουν τιμές 6.75cm, 7.50cm, 9.00cm, 6.92cm, 8.16cm, 8.88cm, 9.41cm, 10.00cm ενώ οι τιμές στο μοντέλο με καλύτερες ιδιότητες της λιθογόμωσης είναι 5.40cm, 6.60cm, 6.67cm, 6.89cm, 7.26cm, 7.67cm και 8.12cm στην περιοχή του τεκτονικού αμφιβολίτη. Παράλληλα στο στρώμα του μαρμάρου οι διαφορές στις μετακινήσεις στα δύο μοντέλα είναι 4.50cm – 3.60cm και 6.00cm – 4.80cm κάτω και απο το κοιτάσμα ενώ πάνω από αυτό λαμβάνονται τιμές 8.25cm – 7.20cm και 9.00cm – 8.40cm. Μέσα στην περιοχή του κοιτάσματος οι μετακινήσεις είναι 1.50cm – 1.20cm, 2.25cm – 1.80cm, 3.00cm, 4.50cm – 4.20cm, 5.25cm – 4.80cm, 6.75cm – 4.80cm, 7.50cm, 9.00cm – 7.80cm, 9.75cm – 8.40cm (μετακινήσεις με GSI=50 – μετακινήσεις με GSI=70).

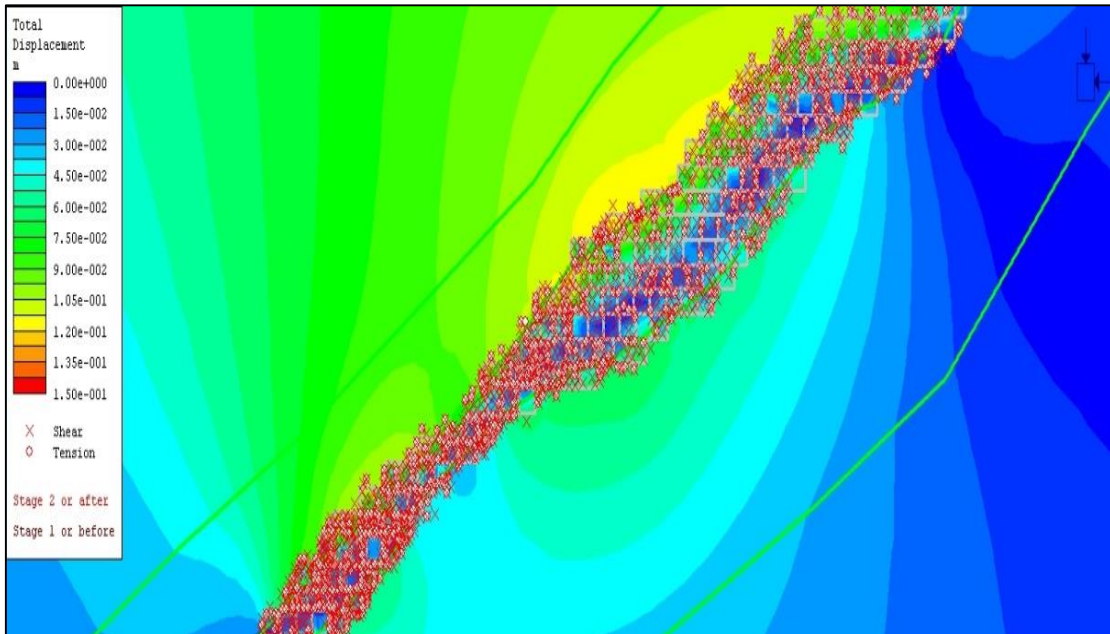
Πίνακας 13. Τιμές μέγιστων μετακινήσεων της βραχόμαζας στο εσωτερικό του κοιτάσματος με μεταβολή του δείκτη GSI στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.

| Δείκτης GSI | 50 | 60 | 70 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Στάδιο 2 | 9.00mm | 9.90mm | 9.90mm |
| Στάδιο 8 | 4.50cm | 3.75cm | 3.50cm |
| Στάδιο 16 | 8.00cm | 6.80cm | 5.95cm |
| Στάδιο 22 | 10.50cm | 8.45cm | 8.40cm |
| Στάδιο 27 | 11.20cm | 9.10cm | 9.00cm |

Πίνακας 14. Τιμές μέγιστων μετακινήσεων της βραχόμαζας γύρω από το κείτασμα με μεταβολή του δείκτη GSI στα διάφορα στάδια της προσομοίωσης.

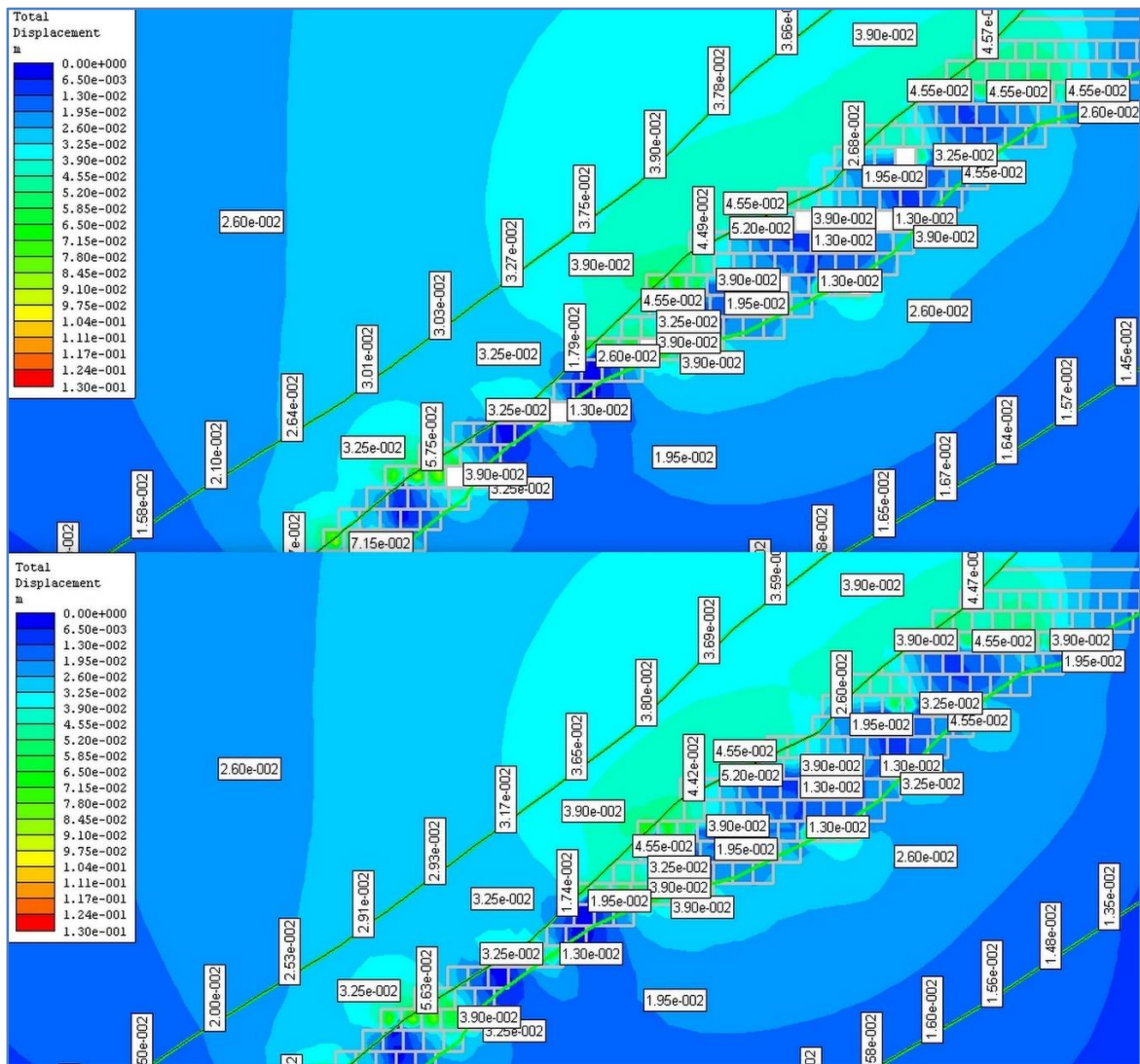
| Δείκτης GSI | 50 | 60 | 70 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Στάδιο 2 | 7.20mm | 7.20mm | 7.20mm |
| Στάδιο 8 | 4.80cm | 3.75cm | 3.25cm |
| Στάδιο 16 | 7.65cm | 6.80cm | 5.60cm |
| Στάδιο 22 | 9.80cm | 8.45cm | 7.80cm |
| Στάδιο 27 | 10.50cm | 9.80cm | 8.40cm |

Όσον αφορά τα στοιχεία αστοχίας της βραχώμαζας στο συγκεκριμένο μοντέλο, αυτά παρουσιάζονται στην ανάλυση για το τελευταίο στάδιο 27 της προσομοίωσης. Οι απόστασεις κάποιων από τα στοιχεία αστοχίας από το κοίτασμα και συγκεκριμένα από το πάτωμα είναι 2.490m, 2.538m, 3.087m, 3.248m, με μέγιστη απόσταση 4.367m και από την οροφή του κοιτάσματος 3.562m, 3.963m, 4.096m, 4.142m με μέγιστη απόσταση 4.239m.



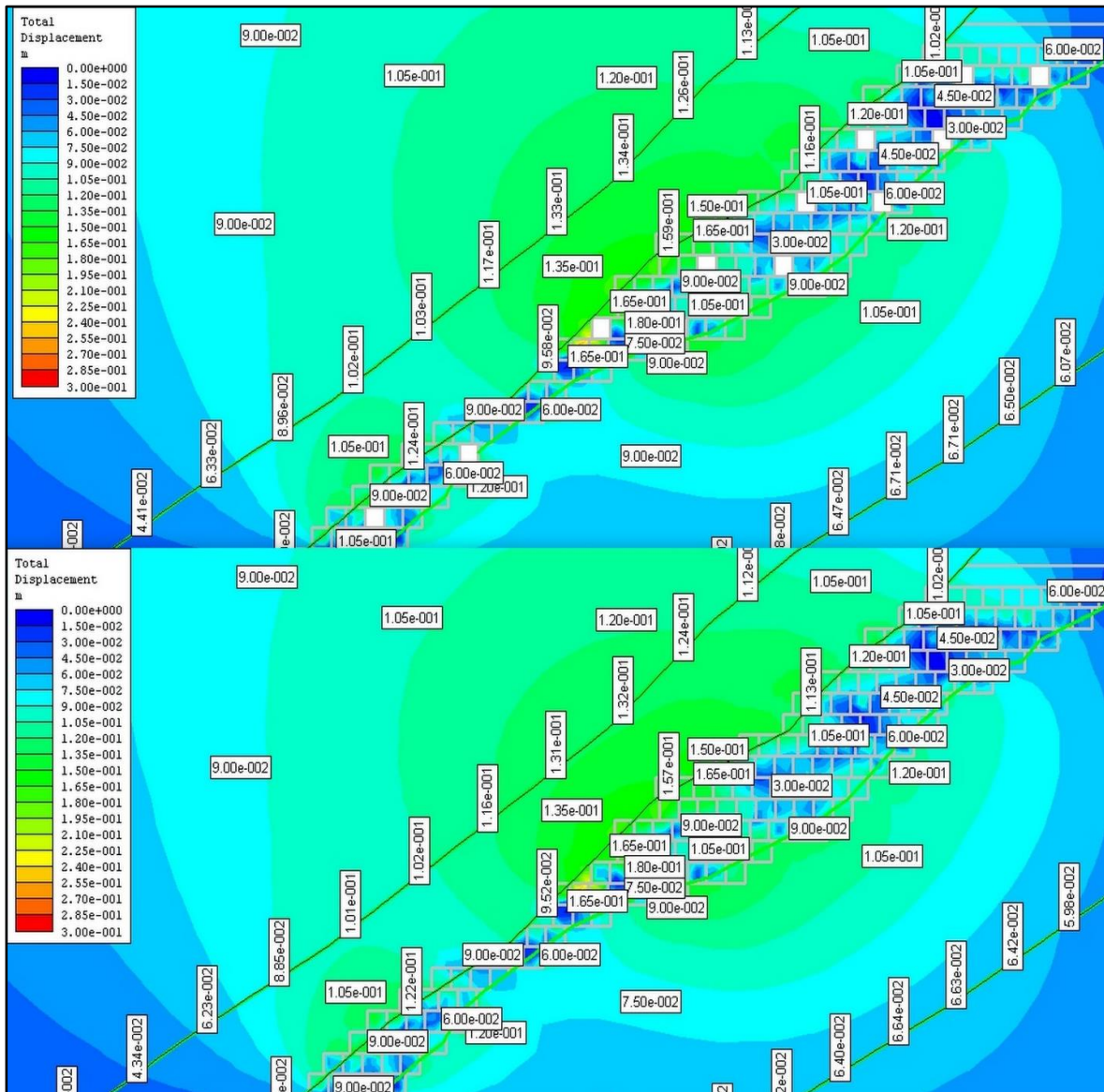
Εικόνα 62. Τελικό στάδιο προσομοίωσης με τα στοιχεία αστοχίας.

6.4.4 Μοντέλο Προσομοίωσης με μεταβολή στον συντελεστή k



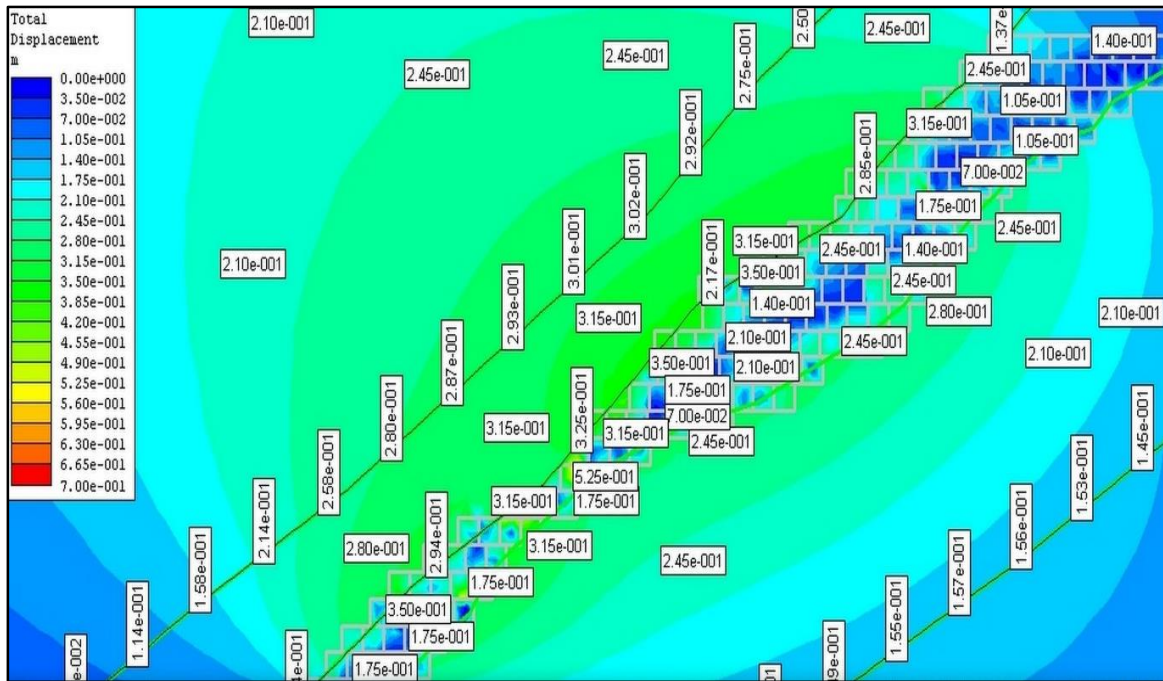
Εικόνα 63. Στάδια προσομοίωσης 8 και 9 με συντελεστή k να ισούται με 2 και 1 αντίστοιχα.

Στα παραπάνω στάδια η εκμετάλλευση λαμβάνει χώρα στους κατώτερους υψομετρικά ορόφους και σταδιακά κινείται προς τα πάνω σύμφωνα με την μέθοδο εκμετάλλευσης. Εκεί σημειώνονται μετακινήσεις 2.53cm, 2.91cm, 3.17cm, 3.25cm, 3.66cm, 3.80cm, 3.90cm στην περιοχή άνω του κοιτάσματος. Παράλληλα στην περιοχή του κοιτάσματος οι μετακινήσεις παίρνουν τιμές 1.30cm, 1.95cm, 3.25cm, 3.90cm, 4.55cm και 5.20cm. Ενώ κάτω από το κοίτασμα παρατηρούνται μετακινήσεις από 1.60cm στα όρια του μαρμάρου με τον βιοτιτικό – αμφιβολιτικό γνεύσιο έως 1.95cm, 2.60cm στο στρώμα του μαρμάρου.



Εικόνα 64. Μετακινήσεις της βραχόμαζας στα στάδια 16 και 17.

Στα στάδια 16 και 17 η εκμετάλλευση έχει προχωρήσει στους δεύτερους υψομετρικά ορόφους και οι μετακινήσεις φαίνονται υψηλές. Συγκεκριμένα, εξωτερικά του κοιτάσματος και γύρω από αυτό παρατηρούνται μετατοπίσεις με τιμές 9.00cm, 10.5cm, 12.00cm, 12.40cm, 13.00cm στην περιοχή πάνω από την εκμετάλλευση και 4.50cm, 7.50cm, 10.50cm στην περιοχή κάτωθι του. Επίσης στο εσωτερικό του κοιτάσματος οι μετακινήσεις παρουσιάζουν τιμές από 3.00cm, 4.50cm, 6.00cm, 7.50cm, 10.50cm μέχρι και 18.00cm.



Εικόνα 65. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο προσομοίωσης 27.

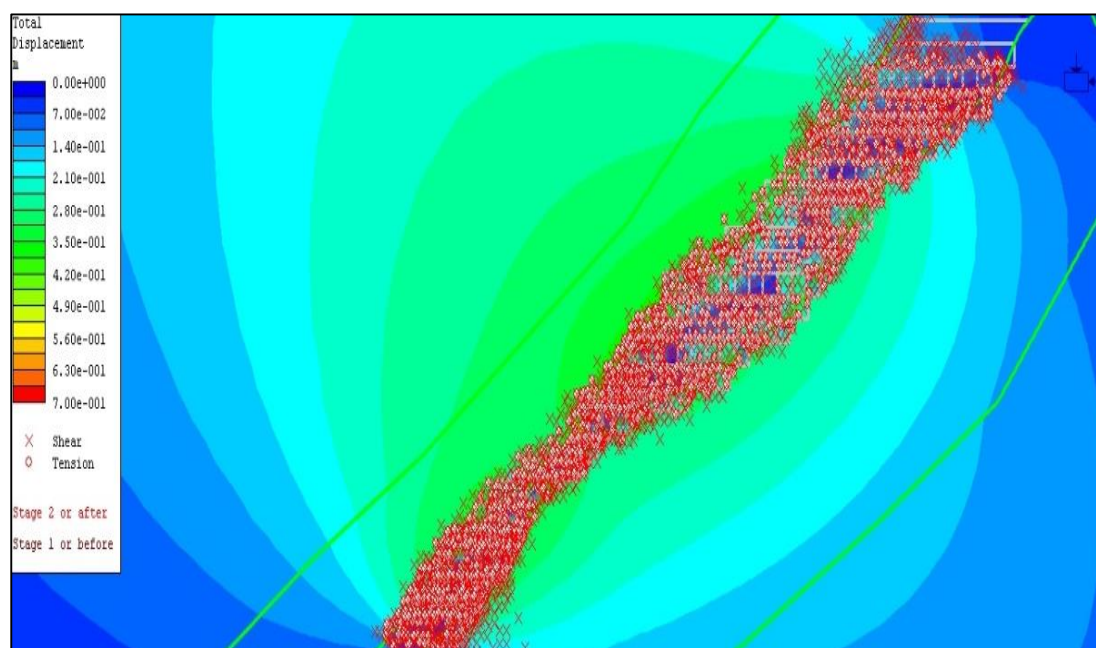
Στο τελευταίο στάδιο του συγκεκριμένου παραμετρικού μοντέλου οι μετακινήσεις της βραχομάζας που παρατηρούνται έχουν τιμές 21.00cm, 24.50cm, 28.00cm έως 30.20cm, στο χώρο του αμφιβολίτη ενώ στο στρώμα μαρμάρου οι τιμές των μετακινήσεων κυμαίνονται από 28.00cm έως 31.50cm πάνω από το κοίτασμα και από 21.00cm έως 24.50cm κάτω από αυτό.

Πίνακας 15. Συνολικές μετακινήσεις της βραχομάζας στο συγκεκριμένο παραμετρικό μοντέλο.

| Στάδια Προσομοίωσης | Μετακινήσεις (πάνω από το κοίτασμα) | Μετακινήσεις (στην περιοχή του κοιτάσματος) |
|---------------------|-------------------------------------|---|
| 2 | 1.25cm | 2.00cm |
| 8 | 3.90cm | 7.15cm |
| 16 | 13.5cm | 18.00cm |
| 22 | 30.00cm | 54.80cm |
| 27 | 31.50cm | 52.5cm |

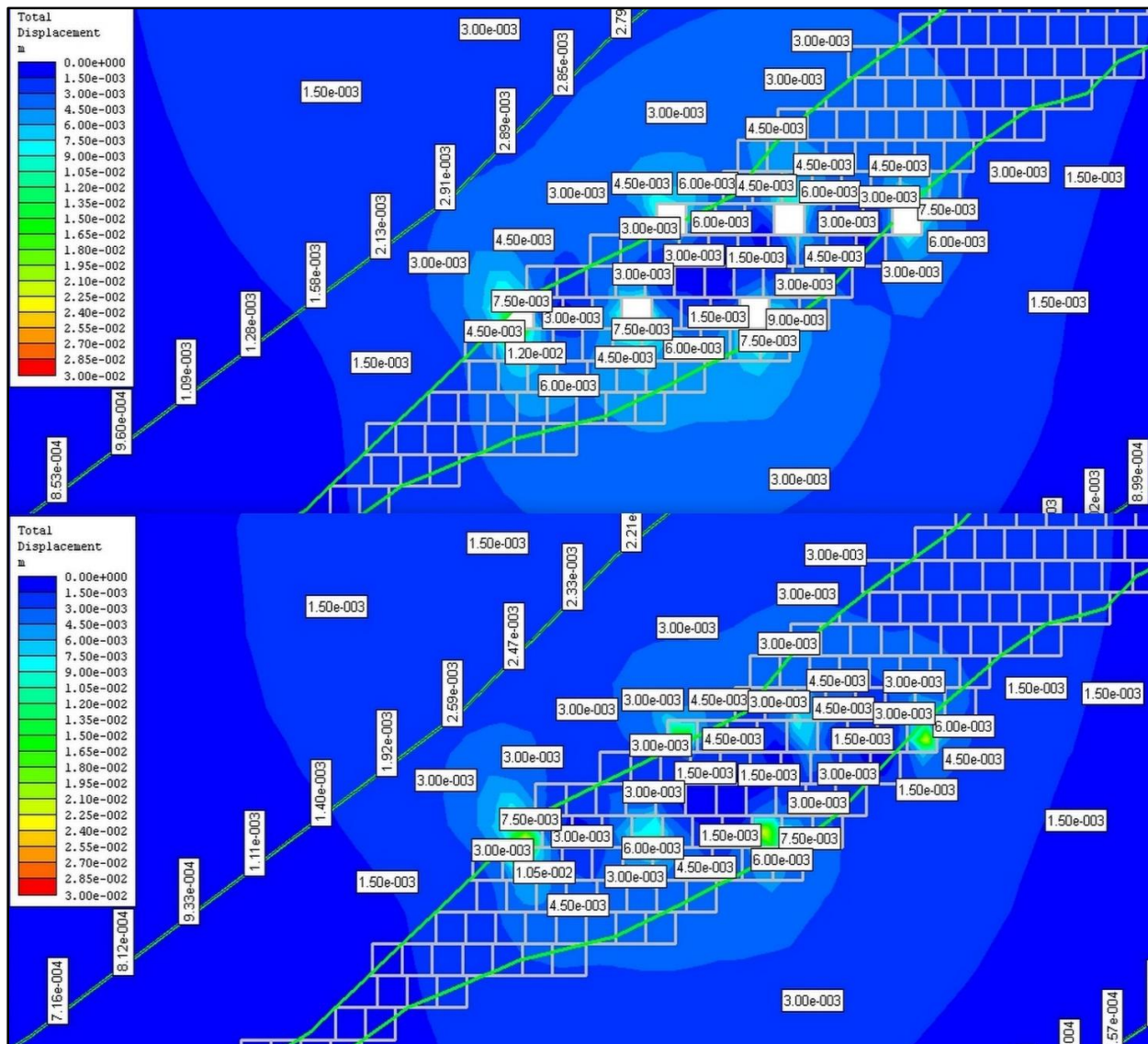
Τα στοιχεία αστοχίας στο μοντέλο όπου μεταβάλλεται ο συντελεστής k δίνονται στην παρακάτω εικόνα. Μεγάλος αριθμός των στοιχείων αυτών έχουν επεκταθεί εκτός των ορίων του κοιτάσματος.

Αρκετά στοιχεία αστοχίας που οφείλονται σε διάτμηση (x), βρίσκονται στο ύψος των υψηλότερων ορόφων αλλά και στο χαμηλότερο τμήμα της εκμετάλλευσης μέσα στα όρια του μαρμάρου. Επίσης κάτω από την μέση της εκμετάλλευσης η πλαστική περιοχή είναι αρκετά πυκνή με την παρουσία πολλών στοιχείων αστοχίας. Οι μέγιστες αποστάσεις στοιχείων αστοχίας από την οροφή του κοιτάσματος ξεκινούν από 4.585m και φτάνουν τα 10.605m (στο υψηλότερο σημείο της εκμετάλλευσης) με ενδιάμεσες αποστάσεις τα 5.558m, 6.631m, 7.809m, 8.564m. Ενώ από το δάπεδο του κοιτάσματος στοιχεία αστοχίας απέχουν 3.478m, 4.464m, 6.970m, 7.985m και στο χαμηλότερο υψομετρικό σημείο φτάνουν την μέγιστη απόσταση των 15.768m και 16.389m.



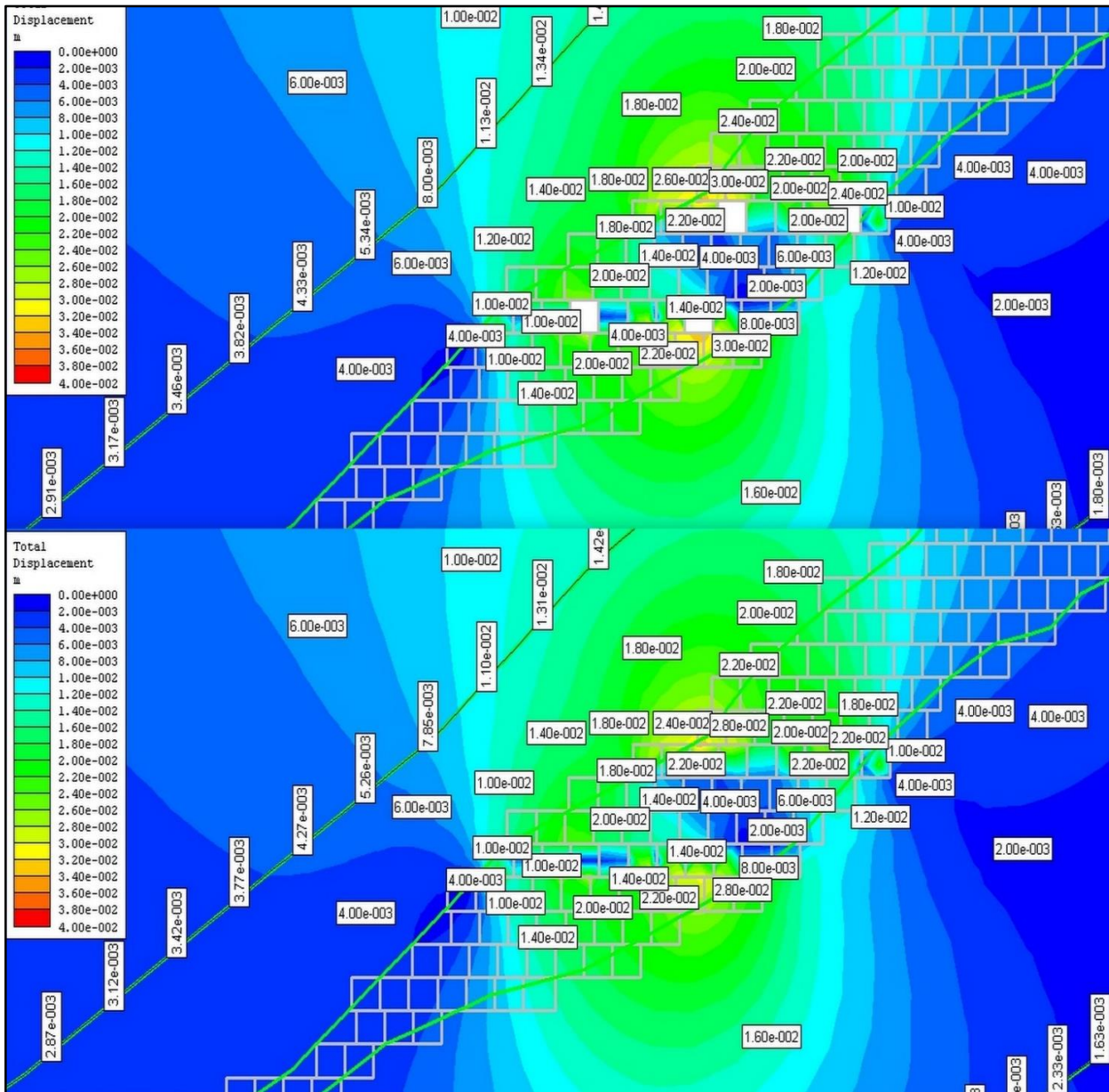
Εικόνα 66. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο στην παραμετρική ανάλυση μεταβολής του k .

6.5 Μοντέλο Προσομοίωσης Ομάδας Διαδοχικών Ορόφων Εκμετάλλευσης, χωρίς στοιχεία υποστήριξης



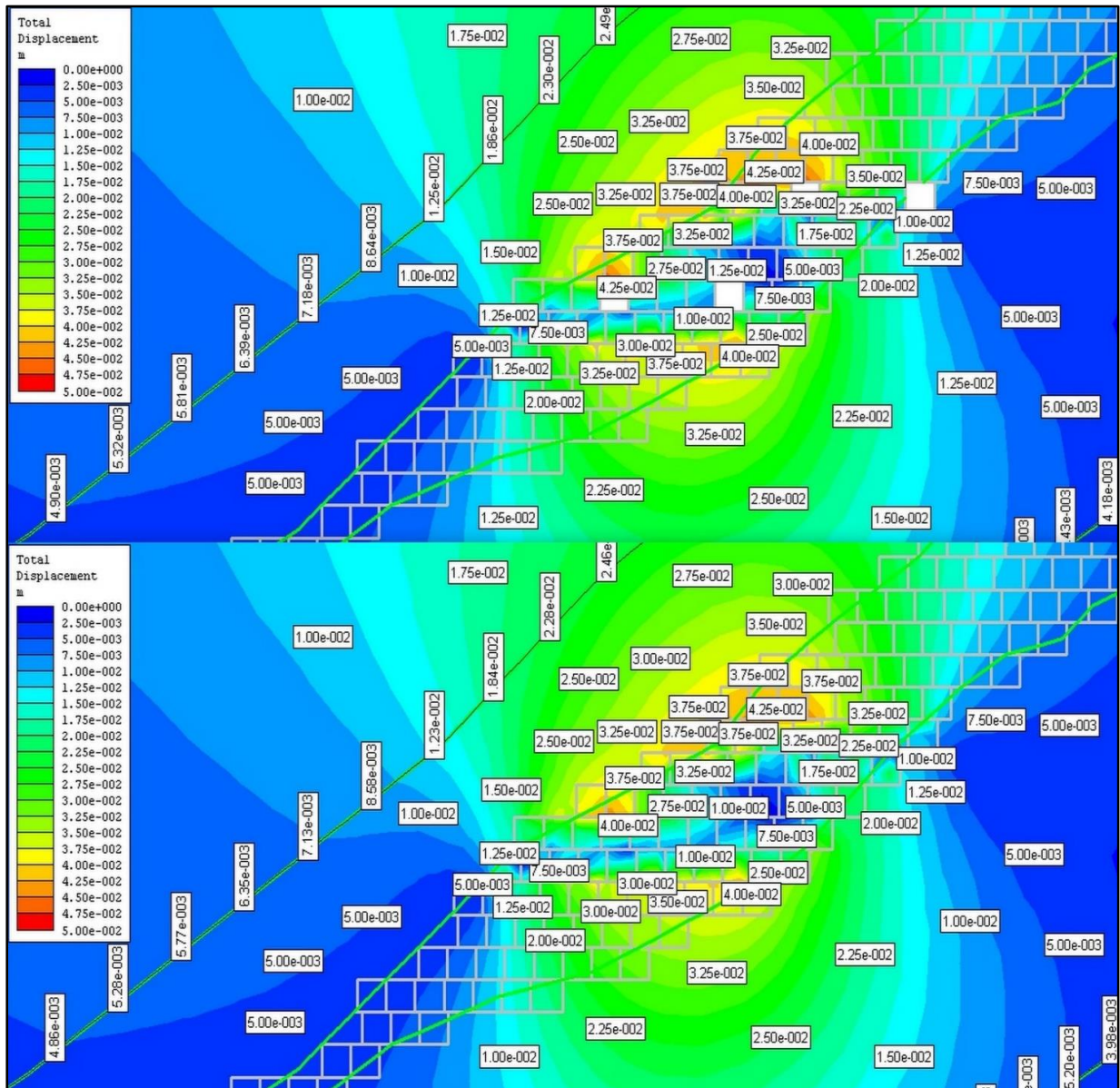
Εικόνα 67. Στάδιο 2 (πάνω) και 3 στην εκμετάλλευση ομάδας διαδοχικών ορόφων.

Στα αρχικά στάδια οι μετακινήσεις της βραχύμαζας από την εκμετάλλευση της ομάδας ορόφων παρατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα της τάξης των χιλιοστών. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε τιμές 1.10mm, 1.50mm, 1.92mm, 2.47mm, 3.00mm, 4.50mm γύρω από την εκμετάλλευση. Ενώ μέσα στο κοίτασμα, στους κατώτερους ορόφους της ομάδας έχουμε μέγιστη μετακίνηση 1.05cm και ελάχιστη 1.50mm. Ενδιάμεσες τιμές είναι 3.00mm, 4.50mm, 6.00mm και 7.50mm.



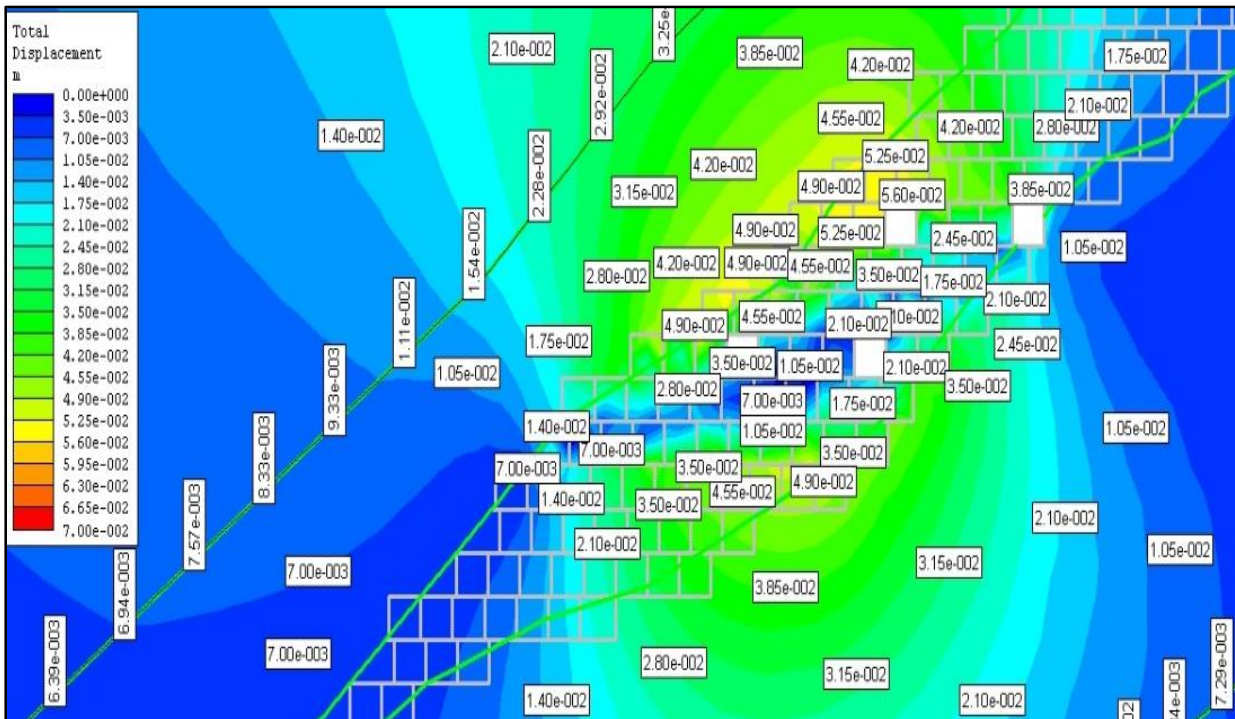
Εικόνα 68. Μετακινήσεις της βραχώμαζας στα στάδια προσομοίωσης 8 (πάνω) και 9.

Όσο προοδεύει η εκμετάλλευση στα στάδια 8 και 9 οι μετακινήσεις παίρνουν τιμές 4.27mm, 5.26mm, 6.00mm, 7.86mm, 1.00cm, 1.10cm, 1.31cm, 1.80cm στη περιοχή άνω του κοιτάσματος και γύρω από αυτό, ενώ κάτω από το κοιτάσμα παρατηρούμε τιμές 2.00mm και 1.60cm. Στο εσωτερικό της περιοχής όπου πραγματοποιείται η εκμετάλλευση της ομάδας ορόφων, έχουμε μετακινήσεις των 8.00mm, 6.00mm, 4.00mm, 2.00mm, 1.00cm, 1.40cm, 2.20cm και 2.40cm.



Εικόνα 69. Μετακινήσεις στα στάδια 16 και 17 της προσομοίωσης.

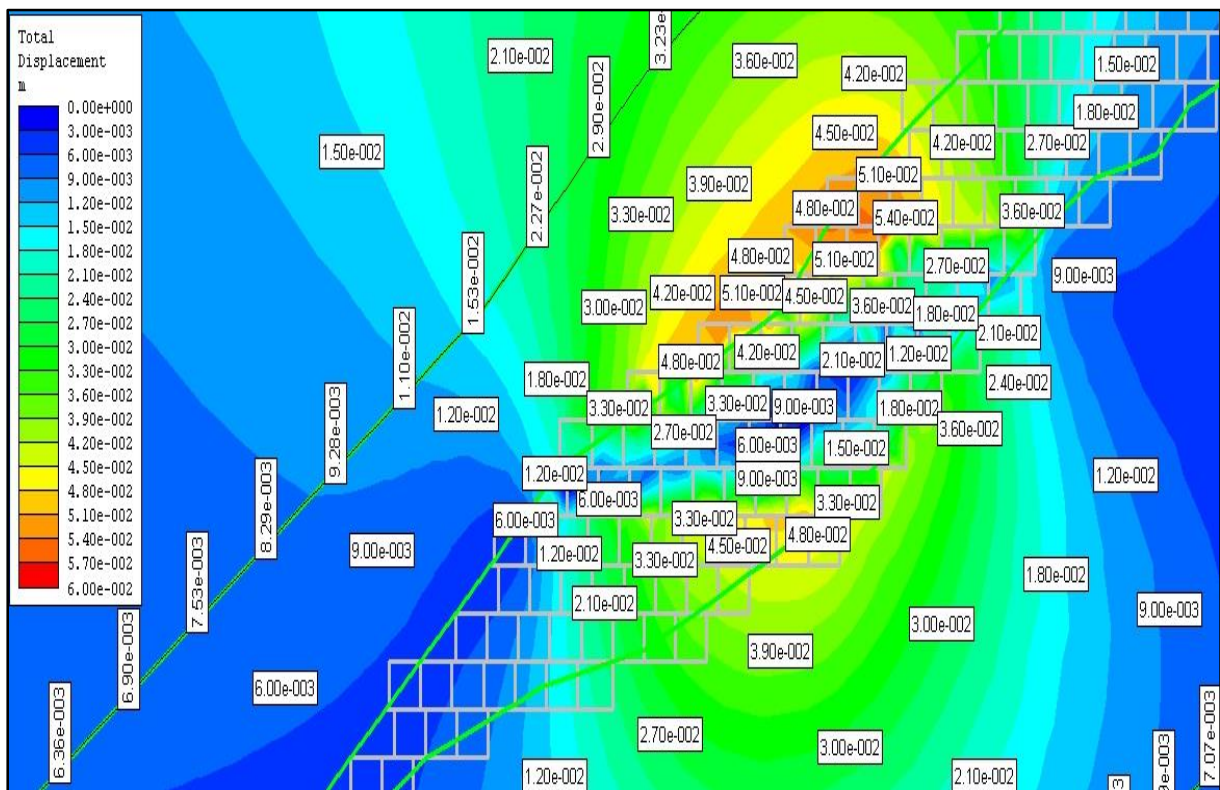
Στην εκμετάλλευση της ομάδας ορόφων στα στάδια 16 – 17 παρατηρούνται μετακινήσεις της τάξης 5.00mm, 6.35mm, 7.13mm, 8.58mm στην περιοχή γύρω από το πάτωμα της ομάδας ορόφων, το οποίο πριν αρχίσει η εκμετάλλευσή τους έχει πληρωθεί με υλικό λιθογόμωσης. Γύρω από το σημείο της εκμετάλλευσης υπάρχουν μεγαλύτερες μετακινήσεις με τιμές 1.00cm, 1.25cm, 1.75cm, 1.84cm, 2.28cm, 2.50cm, 3.00cm, 3.25cm, 3.50cm, 3.75cm. Στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις παίρνουν τιμές 1.25cm – 1.00cm, 3.25cm – 3.00cm, 4.00cm – 3.75cm, 4.25cm – 4.00cm όπου η δεύτερες μετακινήσεις είναι εκείνες μετά την λιθογόμωση της στοάς, ενώ οι τιμές 5.00mm, 7.50mm, 1.00cm, 1.25cm, 1.75cm, 2.00cm, 2.75cm, 3.75cm, 4.25cm είναι κοινές και στα δύο στάδια.



Εικόνα 70. Στάδιο 24^ο από την εκμετάλλευση ομάδας ορόφων στον τελευταίο υψομετρικό επίπεδο.

Όσο προχωράει η εκμετάλλευση οι μετακινήσεις αυξάνονται. Στην περιοχή γύρω και πάνω από το κοίτασμα παρατηρούνται τιμές 1.05cm, 1.40cm, 1.54cm, 1.75cm, 2.10cm, 2.80cm, 3.15cm. Παράλληλα κάτω από το κοίτασμα παρατηρούνται μετακινήσεις της τάξης 1.05cm, 2.10cm, 3.15cm και 3.85cm. Μέσα στο τμήμα της εκμετάλλευσης κοντά στις εξορυσσόμενες στοές λαμβάνουμε τιμές 2.10cm, 2.45cm, 3.50cm, 3.85cm, 4.55cm και 5.60cm. Ενώ στα λιθογομωμένα τμήματα της εκμετάλλευσης συναντώνται τιμές 7.00mm, 1.05cm, 1.75cm, 2.10cm, 2.45cm, 2.85cm, 3.50cm. Στην λιθογομωμένη οροφή έχουμε συνολικές μετακινήσεις των 1.75cm, 2.10cm, 2.80cm και 4.20cm.

Φτάνοντας στο τελικό στάδιο παρατηρούμε τις τελικές τιμές των μετακινήσεων από την εκμετάλλευση των ορόφων στο μέσο του κοιτάσματος. Στην περιφέρεια παρατηρούνται μετακινήσεις 1.20cm, 1.50cm, 1.80cm, 2.10cm, 2.70cm, 3.00cm, 3.30cm, 3.60cm, 3.90cm, 4.50cm πάνω και κάτω από το κοιτάσμα. Στα όρια του κοιτάσματος, στο στάδιο όπου όλο το μέταλλευμα από την ομάδα ορόφων έχει εξορυχθεί και έχει αντικατασταθεί με το υλικό λιθογόμωσης σημειώνονται μετακινήσεις από 9.00mm, 6.00mm έως 4.50cm και 5.10cm. υπάρχουν και ενδιάμεσες τιμές μετακινήσεων 1.50cm, 1.80cm, 2.70cm, 3.30cm, 3.60cm, 4.20cm και 4.50cm.



Εικόνα 71. Τελικό στάδιο του μοντέλου της ομάδας διαδοχικών ορόφων. Στάδιο 25°.

Ακολουθούν πίνακες όπου καταγράφονται οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων στα διάφορα στάδια του μοντέλου εκμετάλλευσης της ομάδας διαδοχικών ορόφων χωρίς στοιχεία υποστήριξης.

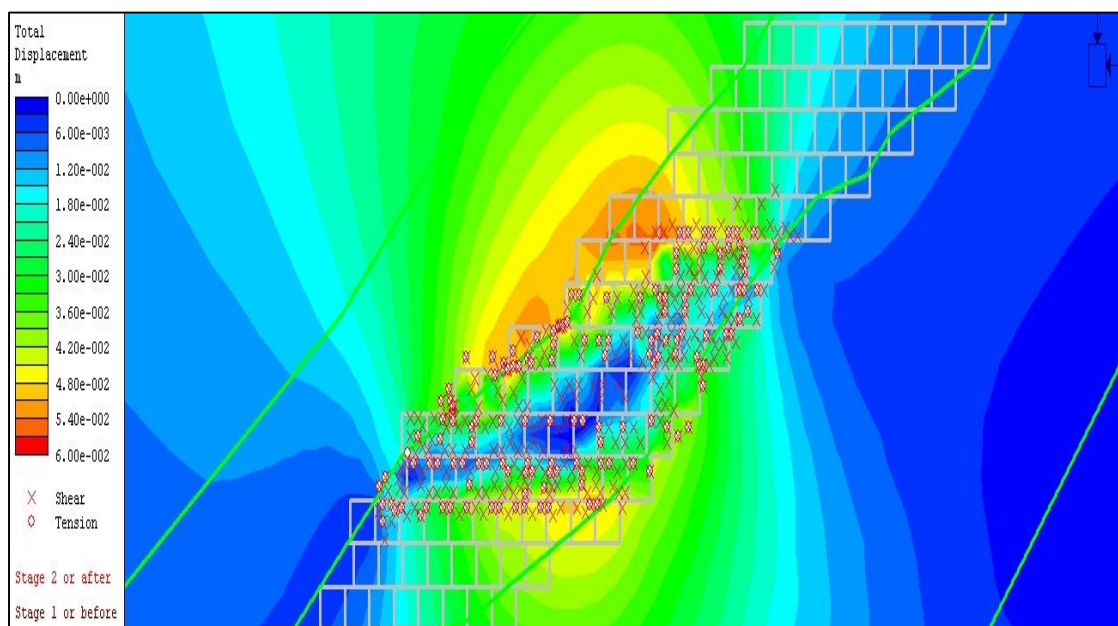
Πίνακας 16 Μετακινήσεις στην περιοχή πάνω από το κοιτάσμα.

| Στάδια Εκμετάλλευσης | Μέγιστες Μετακινήσεις |
|----------------------|-----------------------|
| 2 | 4.50mm |
| 8 | 1.80cm |
| 16 | 3.25cm |
| 25 | 4.20cm |

Πίνακας 17. Συνολικές μετακινήσεις στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

| Στάδια Εκμετάλλευσης | Μέγιστες Μετακινήσεις |
|----------------------|-----------------------|
| 2 | 9.00mm |
| 8 | 2.40cm |
| 16 | 4.25cm |
| 25 | 5.40cm |

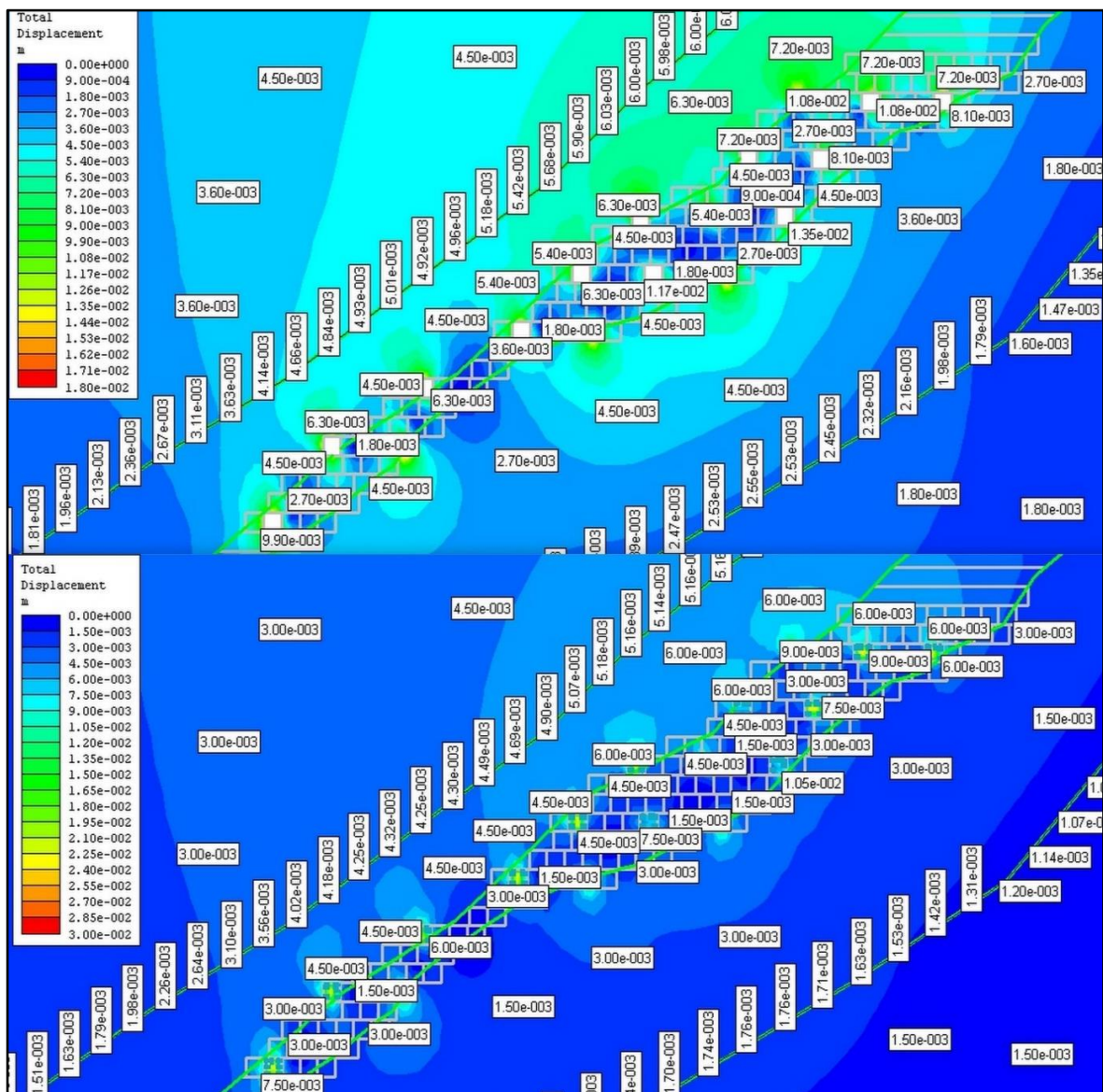
Τα στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο περιορίζονται στα όρια της εκμετάλλευσης της ομάδας ορόφων και παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί. Οι μέγιστες αποστάσεις που παρουσιάζουν από τα όρια του κοιτάσματος είναι 3.927m από την οροφή και 2.915m από το δάπεδο με ενδιάμεσες αποστάσεις 2.000m, 2.511m και 2.793m.



Εικόνα 72. Στοιχεία αστοχίας στο ομοίωμα ομάδας ορόφων, χωρίς υποστήριξη.

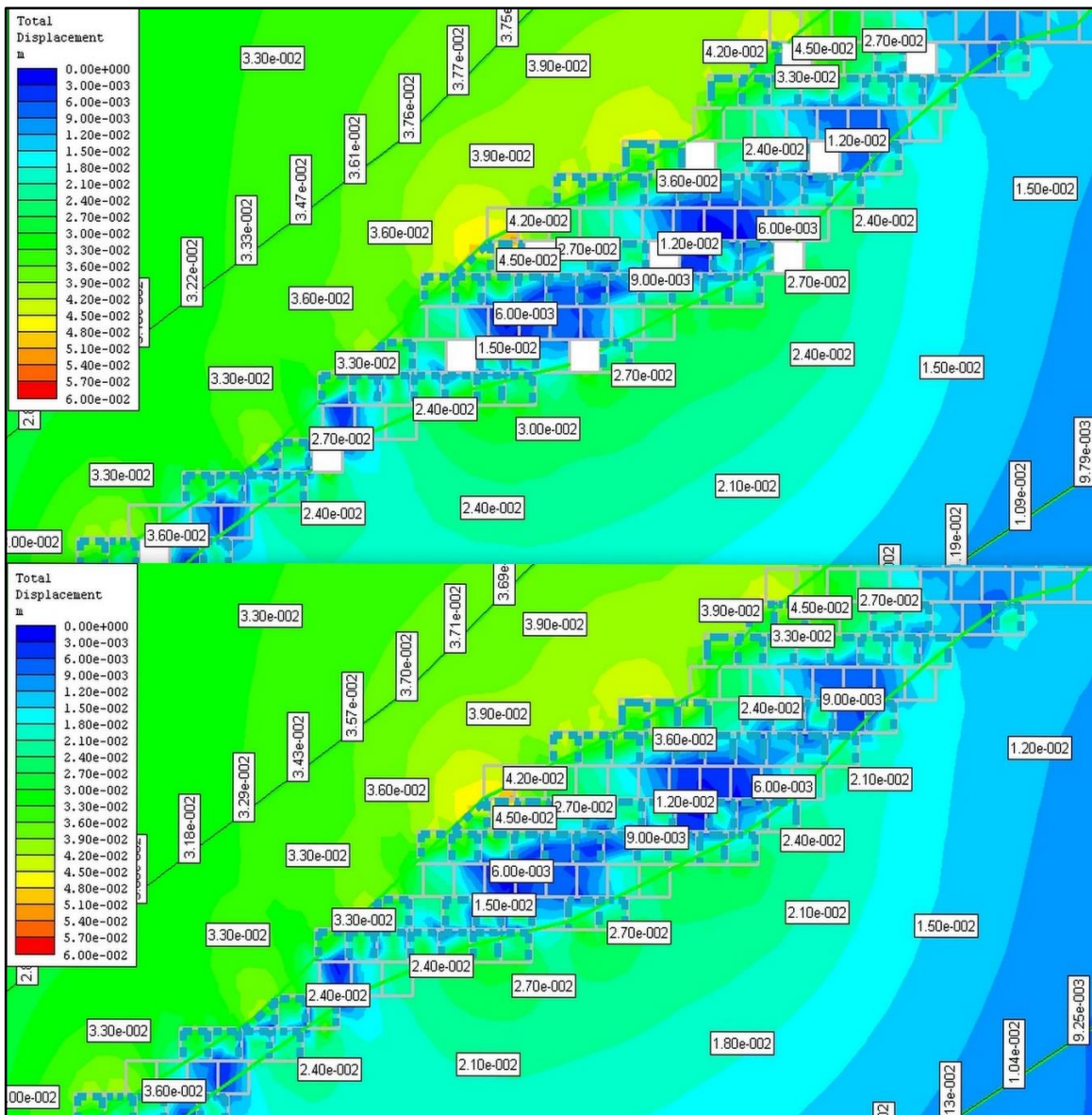
6.6 Μοντέλο Προσομοίωσης Ομοιώματος Συνολικής Εκμετάλλευσης με χρήση μέσων υποστήριξης

Στα αρχικά στάδια της συγκεκριμένης προσομοίωσης, όπου χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέσο υποστήριξης και έπειτα ακολούθησε η λιθογόμωση των εξοφλημένων στοών, παρατηρήθηκαν μετακινήσεις με τιμές 3.60mm, 4.50mm, 5.40mm 6.30mm, 7.20mm στην περιοχή του τεκτονικού αμφιβολίτη και του μαρμάρου. Στο τμήμα εσωτερικά της εκμετάλλευσης λαμβάνονται τιμές από 1.80mm έως 1.17cm στο 2^ο στάδιο και από 1.80mm έως 1.05cm.

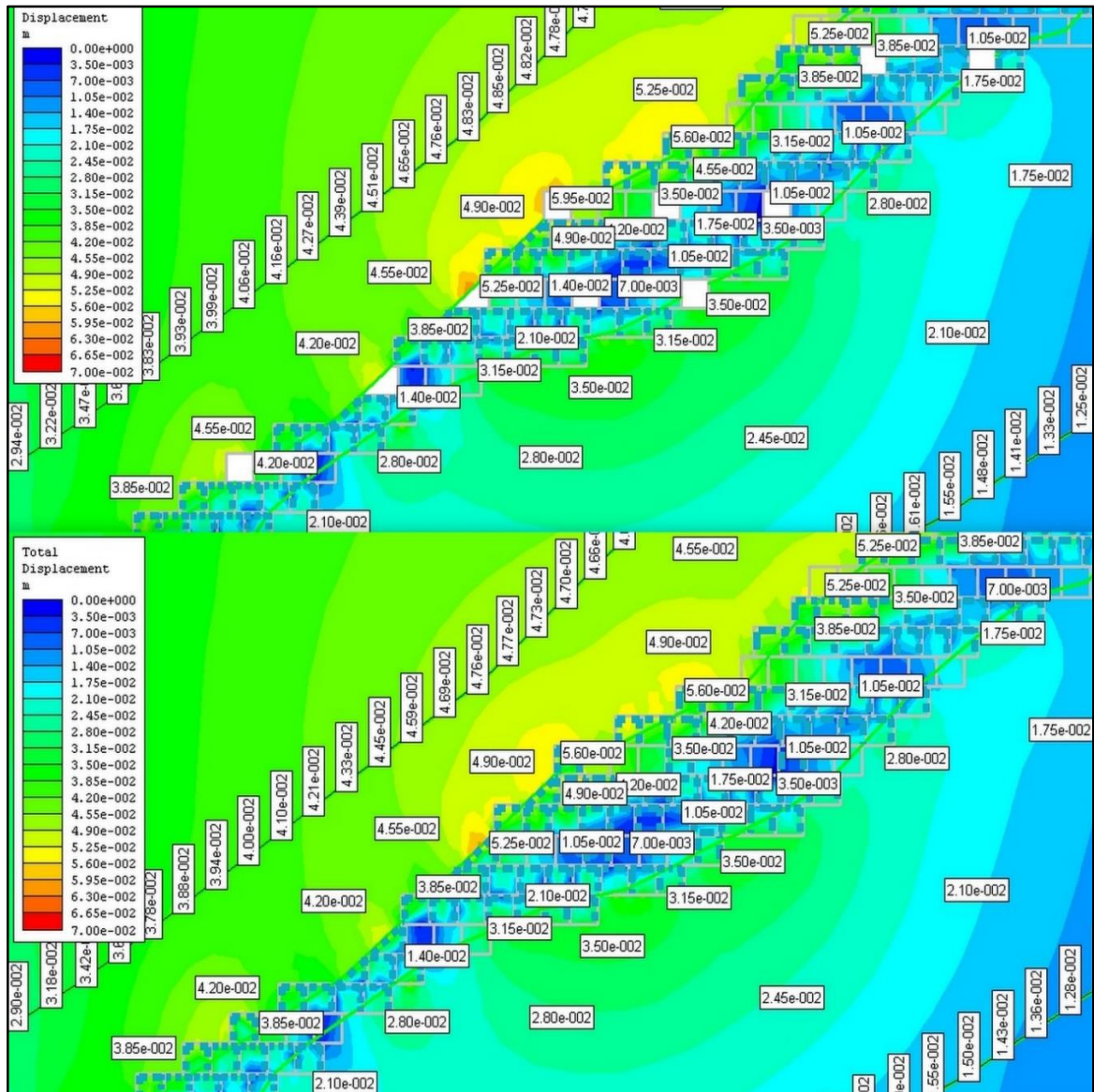


Εικόνα 73. Μετακινήσεις της βραχώμαζας στα αρχικά στάδια της εκμετάλλευσης, στάδια 2 και 4.

Στα στάδια 20 – 22 που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται μετακινήσεις με τιμές 3.30cm, 3.60cm, 3.90cm και 4.20cm στο τμήμα άνω της εκμετάλλευσης. Παράλληλα στο κοίτασμα, γύρω από τις στοές εκμετάλλευσης η βραχώμαζα μετακινείται κατά 9.00mm, 6.00mm, 1.20cm, 2.70cm, 3.30cm, 3.60cm και 4.50. στην περιοχή που βρίσκεται κάτω από το κοίτασμα, στρώμα μαρμάρου, οι μετακινήσεις λαμβάνουν τιμές από 8.53mm, 1.50cm έως 3.00cm με ενδιάμεσες 2.10cm και 2.40cm για το στάδιο 20. Ενώ για το στάδιο 22 παρουσιάζει τιμές από 8.00mm, 1.20cm μέχρι 2.70cm.

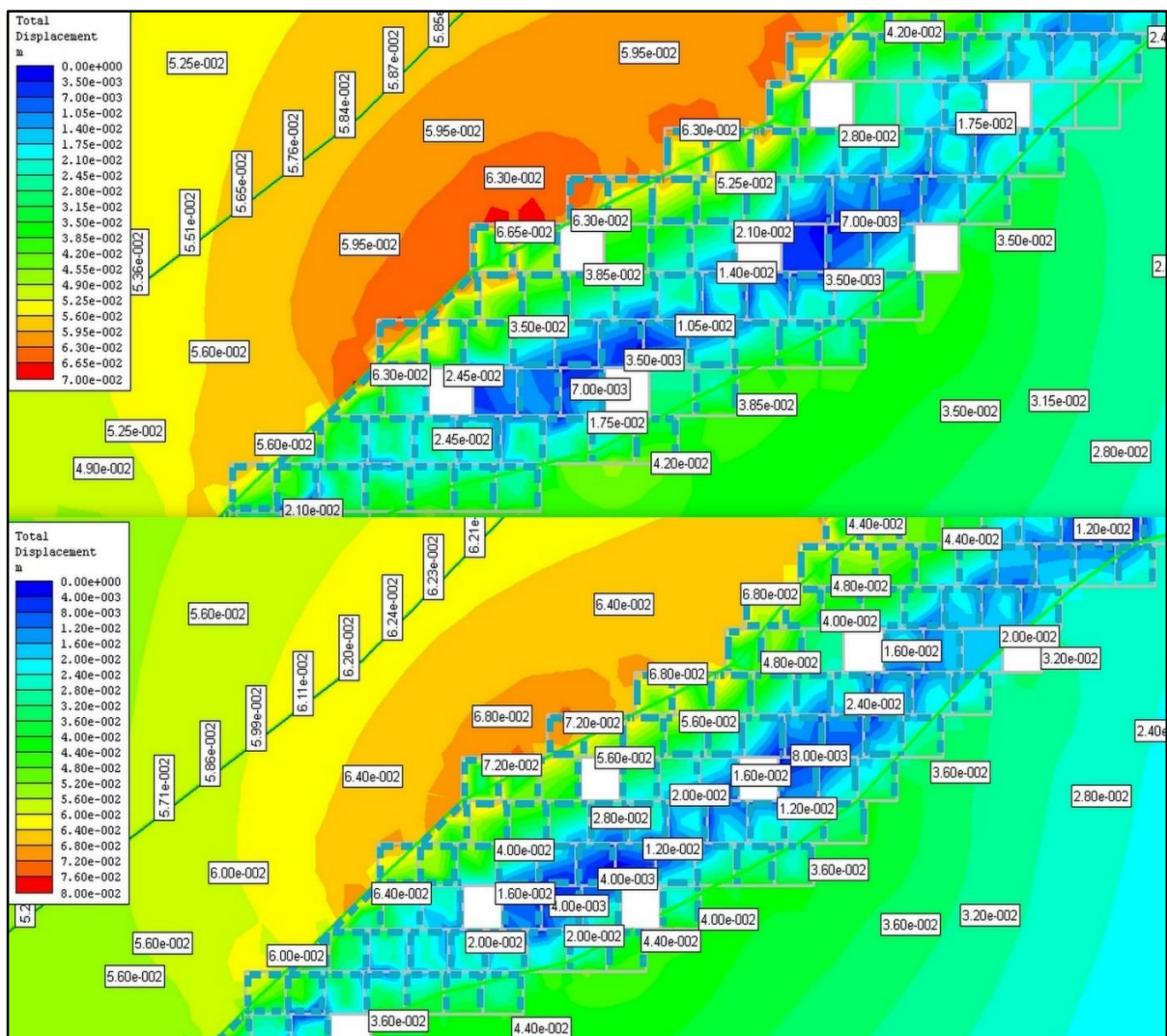


Εικόνα 74. Μετακινήσεις στα προσομοιωτικά στάδια 20 και 22, με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Εικόνα 75. Μετακινήσεις στα στάδια 26 και 28 του μοντέλου με χρήση υποστήριξης.

Οι συνολικές μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στα στάδια έχουν τιμές που κυμαίνονται στα 4.00cm όπως, 4.10cm, 4.20cm, 4.33cm, 4.59cm, 4.76cm, 4.90cm για το τμήμα που βρίσκεται πάνω από το κοίτασμα και κοντά σε αυτό, στο στρώμα μαρμάρου. Μέσα στα όρια του κοιτάσματος οι μετακινήσεις που λαμβάνουν τιμές 3.50mm, 7.00mm, 1.05cm, 1.75cm, 2.80cm, 3.50cm, 4.90cm, 5.25cm. Ενώ συγκριτικά μεταξύ των δύο σταδίων υπάρχουν διαφορές αφού λόγω της υποστήριξης και της λιθογόμωσης οι μετακινήσεις κυμάνθηκαν από 4.20cm σε 3.85cm, από 4.50cm σε 4.20cm, από 1.40cm σε 1.05cm, από 1.05cm σε 7.00mm και από 3.85cm σε 3.50cm.



Εικόνα 76. Συνολικές μετακινήσεις στα στάδια προσομοίωσης 32 και 35.

Καθώς η εκμετάλλευση προχωρεί, οι εργασίες μεταφέρονται σε ανώτερους υψομετρικά ορόφους και οι μετακινήσεις μεγαλώνουν παίρνοντας τιμές 5.60cm, 6.00cm, 6.40cm, 6.80cm άνω και 2.40cm, 2.80cm, 3.20cm, 3.60cm κάτω από το κοίτασμα. Παράλληλα μέσα στα όρια του κοιτάσματος παρουσιάζονται μετακινήσεις από 4.00mm, 8.00mm, 1.60cm, 2.00cm και φτάνουν έως τα 5.60cm. Η μέγιστη μετακίνηση παρατηρείται λίγο πιο πάνω από την μέση της εκμετάλλευσης, στα όρια με το στρώμα του μαρμάρου και έχει την τιμή των 7.20cm.

Πίνακας 18. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας μέσα στο σώμα του κοιτάσματος στο ομοίωμα του μεταλλείου με χρήση υποστήριξης.

| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις | Ελάχιστες Μετακινήσεις |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Στάδιο 4 | 7.50mm | 1.50mm |
| Στάδιο 22 | 4.50cm | 6.00mm |
| Στάδιο 32 | 5.25cm | 1.05cm |
| Στάδιο 37 | 5.60cm | 1.20cm |
| Στάδιο 49 | 5.60cm | 1.20cm |

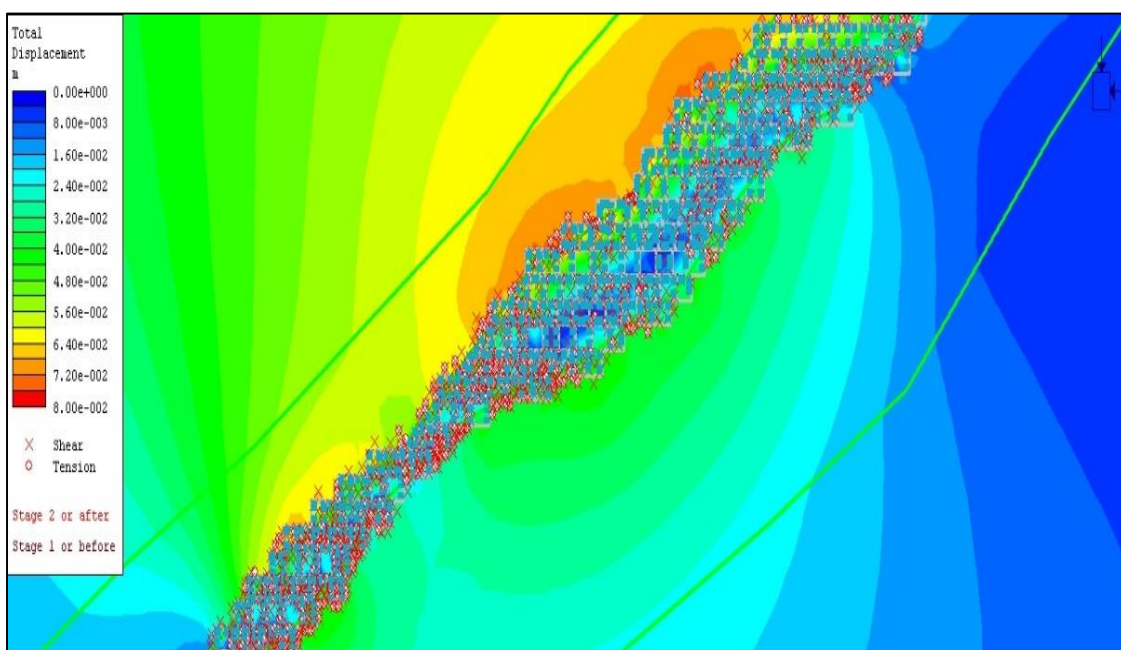
Πίνακας 19. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας στην περιοχή πάνω από το κοιτάσμα στο ομοίωμα του μεταλλείου με χρήση υποστήριξης.

| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις | Ελάχιστες Μετακινήσεις |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Στάδιο 4 | 6.00mm | 3.00mm |
| Στάδιο 22 | 3.90cm | 3.30cm |
| Στάδιο 32 | 6.30cm | 5.25cm |
| Στάδιο 37 | 6.80cm | 5.60cm |
| Στάδιο 49 | 6.80cm | 5.60cm |

Πίνακας 20. Τιμές μετακινήσεων της βραχόμαζας στην περιοχή κάτω από το κοίτασμα στο ομοίωμα του μεταλλείου με χρήση υποστήριξης.

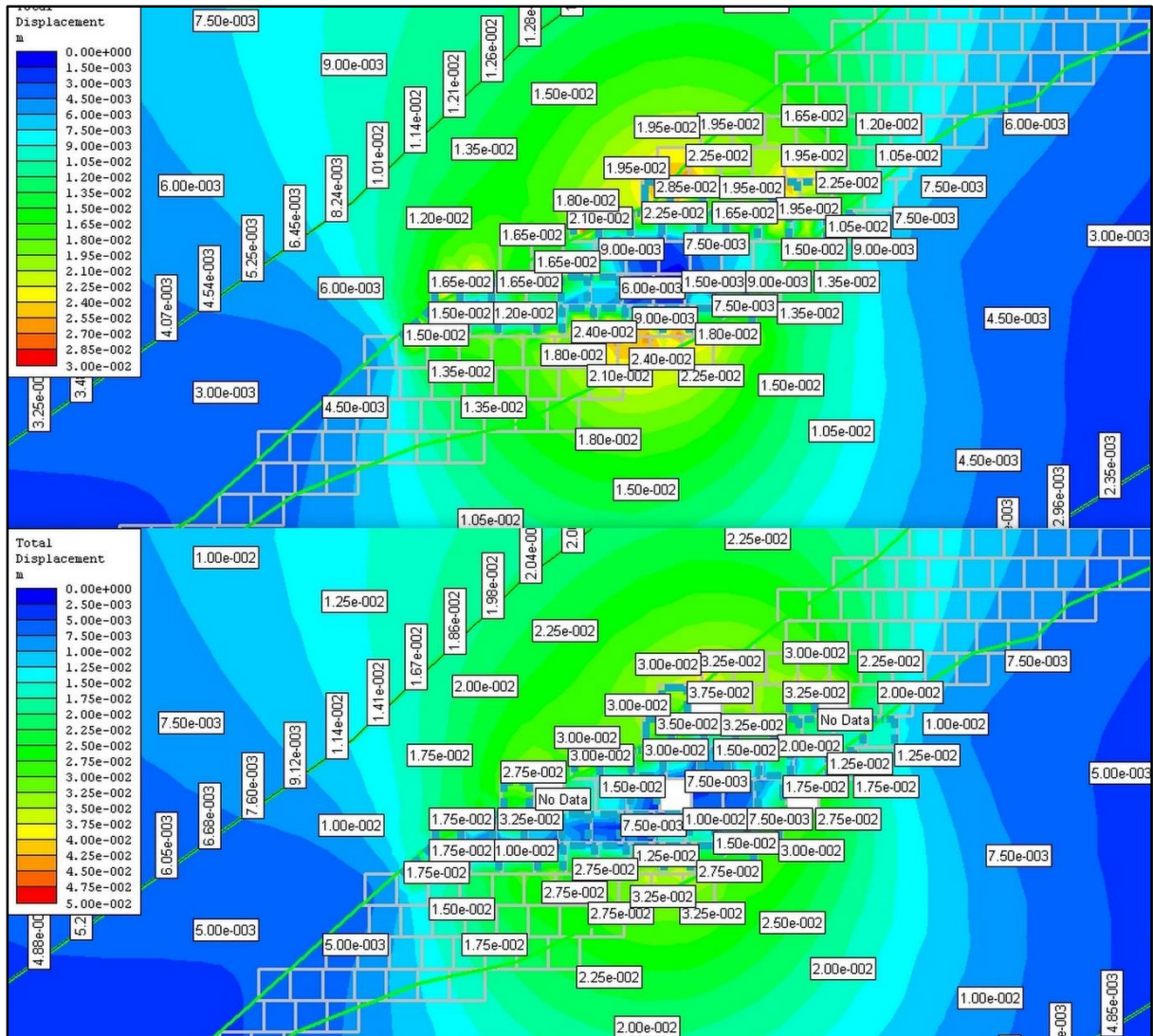
| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις | Ελάχιστες Μετακινήσεις |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Στάδιο 4 | 3.00mm | 1.20mm |
| Στάδιο 22 | 2.70cm | 9.00mm |
| Στάδιο 32 | 3.50cm | 1.75cm |
| Στάδιο 37 | 3.60cm | 2.00cm |
| Στάδιο 49 | 3.60cm | 2.80cm |

Τα στοιχεία αστοχίας δίνονται στην παρακάτω εικόνα ανάλυσης. Οι μέγιστες αποστάσεις των στοιχείων από την οροφή του κοιτάσματος είναι 4.564m και από το δάπεδο 4.651m. Επίσης στοιχεία αστοχίας μέσα στο σώμα του μαρμάρου απέχουν ενδιάμεσες αποστάσεις από την εκμετάλλευση κατά 2.993m, 3.212m και 3.846m.



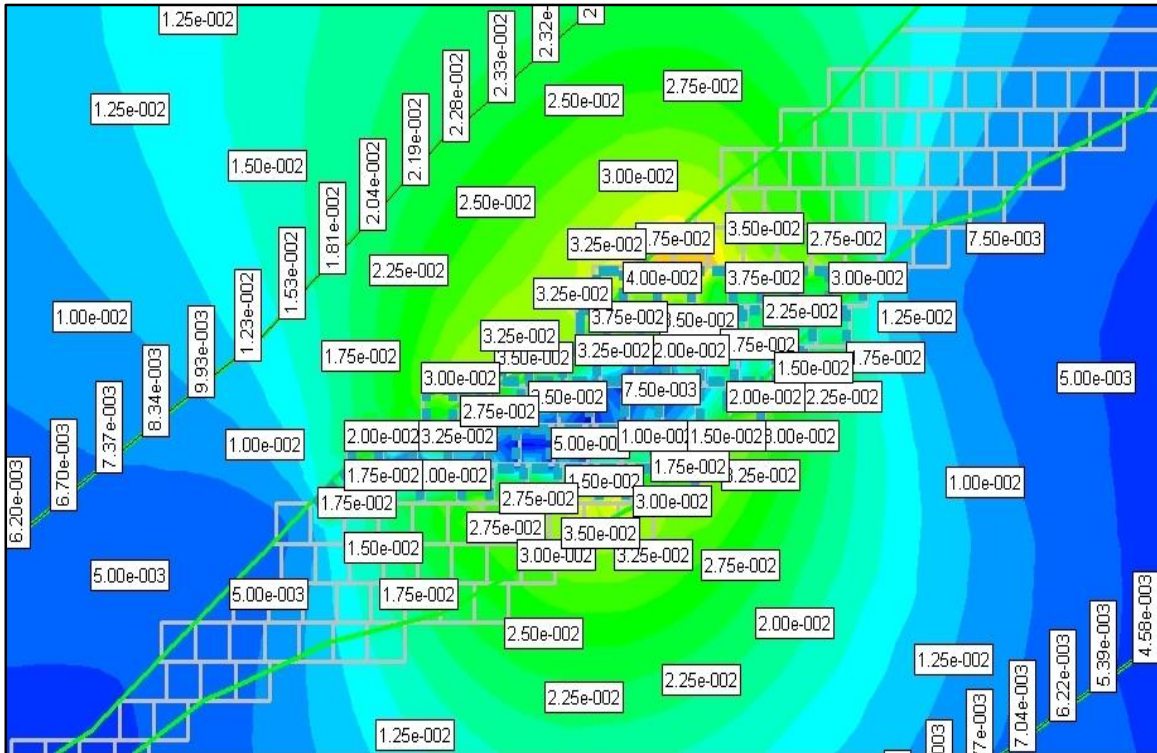
Εικόνα 78. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της συνολικής εκμετάλλευσης με χρήση υποστήριξης.

με μεγαλύτερη την 2.10cm και μικρότερη την 3.00mm αλλά υπάρχουν μετακινήσεις 4.50mm, 7.50mm, 9.00mm, 1.05cm, 1.20cm, 1.35cm.



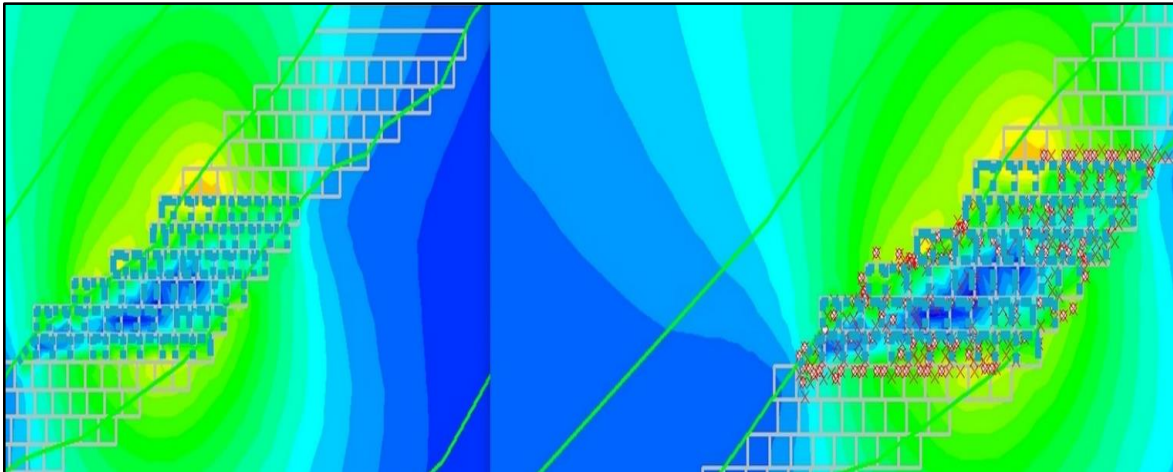
Εικόνα 80. Μετακινήσεις στα προσομοιωτικά στάδια 19^ο και 29^ο.

Μεταξύ των δύο σταδίων που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα μεσολαβούν 10 ενδιάμεσα στάδια. Σε αυτά οι μετακινήσεις μεταβλήθηκαν από 6.00mm σε 7.50mm, από 7.50mm σε 1.00cm, από 9.00mm σε 1.25cm, από 6.00mm σε 1.00cm, από 1.20cm σε 1.75cm, από 1.35cm σε 2.00cm, από 1.50cm σε 2.25cm στην περιοχή πάνω από το κοιτάσμα. Στο τμήμα εσωτερικά του κοιτάσματος παρουσιάζονται μετακινήσεις που παίρνουν τιμές από 6.00mm σε 7.50mm, 9.00mm σε 1.50cm, 1.65cm σε 3.25cm, 1.95cm σε 3.25cm, 2.25cm σε 3.00cm.



Εικόνα 81. Μετακινήσεις στο τελικό στάδιο.

Στο τελικό στάδιο της εκμετάλλευσης ομάδας ορόφων το μέταλλευμα στο κεντρικό μέρος του κοιτάσματος έχει αντικατασταθεί πλήρως, από την υποστήριξη και το σώμα της λιθογόμωσης. Οι μετακινήσεις που προκαλούνται πάνω από την εκμετάλλευση και περιμετρικά (στον αμφιβολίτη και το μάρμαρο) παίρνουν τιμές 1.00cm, 1.25cm, 1.50cm, 1.81cm, 2.04cm, 2.28cm, 2.50cm, 3.00cm, 3.25cm. Στον κύριο κορμό του κοιτάσματος όπου γίνεται η εκμετάλλευση η βραχομάζα μετακινείται κατά 7.50mm, 5.00mm, 1.00cm, 1.50cm, 2.00cm, 3.25cm, 3.75cm και 4.00cm. Ενώ στο τμήμα κάτω από το κοιτάσμα υπάρχουν μετακινήσεις των 7.04mm, 1.00cm, 1.25cm, 2.00cm, 2.25cm, 2.50cm και 2.75cm.



Εικόνα 82. Τελικό στάδιο προσομοίωσης διαδοχικών ορόφων με χρήση liner. Στάδιο 37, στοιχεία αστοχίας (δεξιά).

Συνολικά οι μέγιστες μετακινήσεις της βραχόμαζας στην εκμετάλλευση ομάδας ορόφων με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες για τα στάδια προσομοίωσης 2, 8, 19, 37.

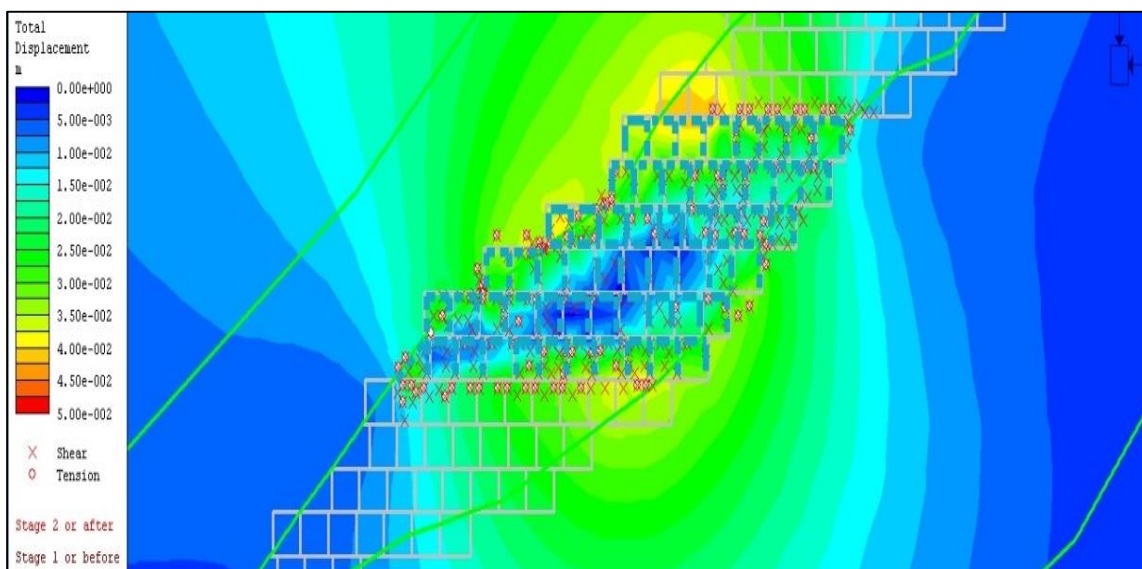
Πίνακας 21. Μέγιστες μετακινήσεις της βραχόμαζας πάνω από ην περιοχή της εκμετάλλευσης.

| Στάδια Εκμετάλλευσης | Μέγιστες Μετακινήσεις |
|----------------------|-----------------------|
| 2 | 3.00mm |
| 8 | 9.00mm |
| 19 | 1.50cm |
| 37 | 3.00cm |

Πίνακας 22. Συνολικές μετακινήσεις στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης καθώς προχωρούν τα στάδια.

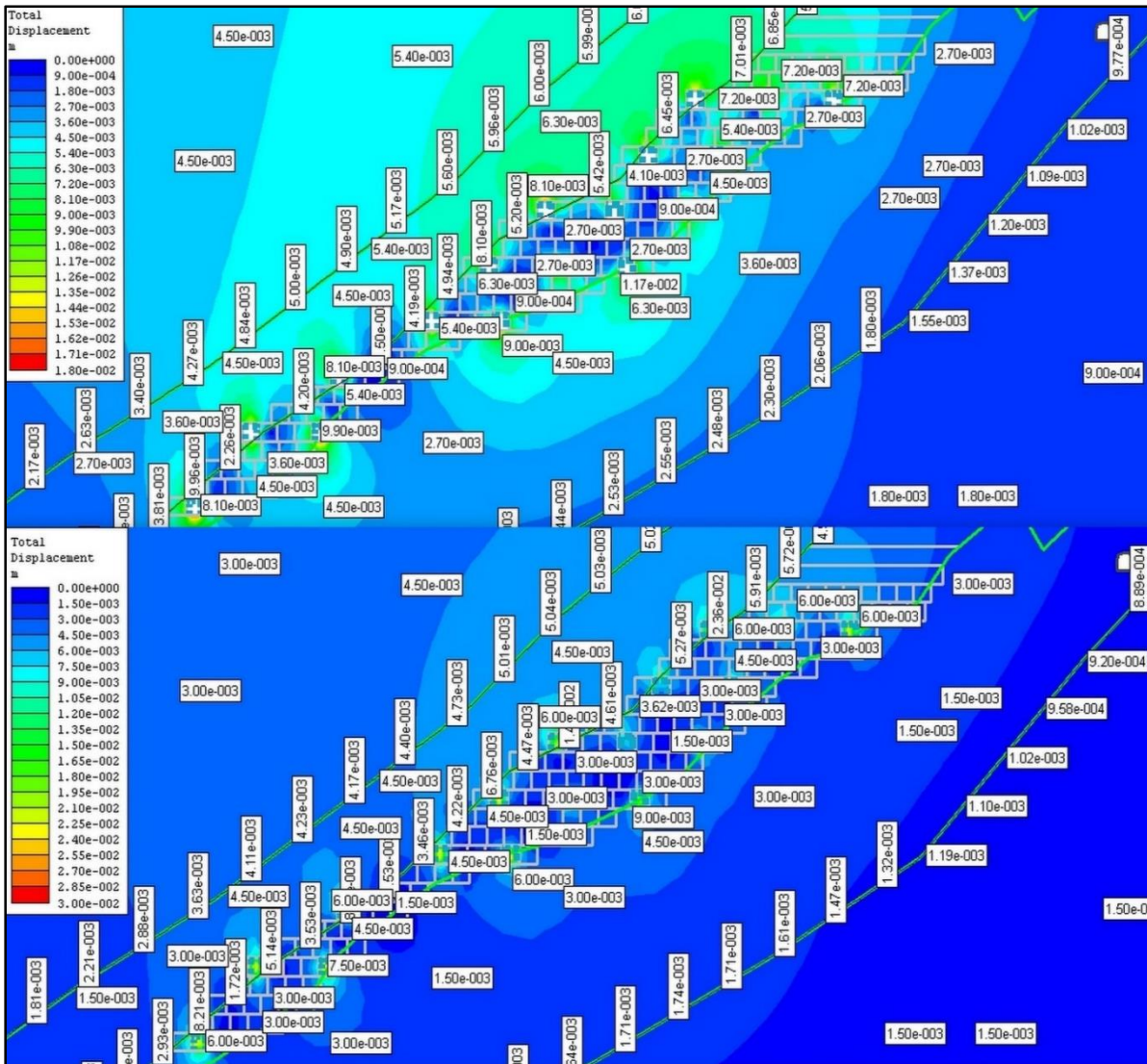
| Στάδια Εκμετάλλευσης | Μέγιστες Μετακινήσεις |
|----------------------|-----------------------|
| 2 | 7.50mm |
| 8 | 2.25cm |
| 19 | 2.40cm |
| 37 | 3.50cm |

Στο τελικό στάδιο του συγκεκριμένου μοντέλου μελετώνται τα στοιχεία αστοχίας με βάση την ανάλυση. Οι μέγιστες αποστάσεις που παρουσιάζουν από τα όρια του κοιτάσματος είναι 4.030m από την οροφή και 2.955m από το δάπεδο, με ενδιάμεσες αποστάσεις 0.559m, 1.108m και 2.776m.



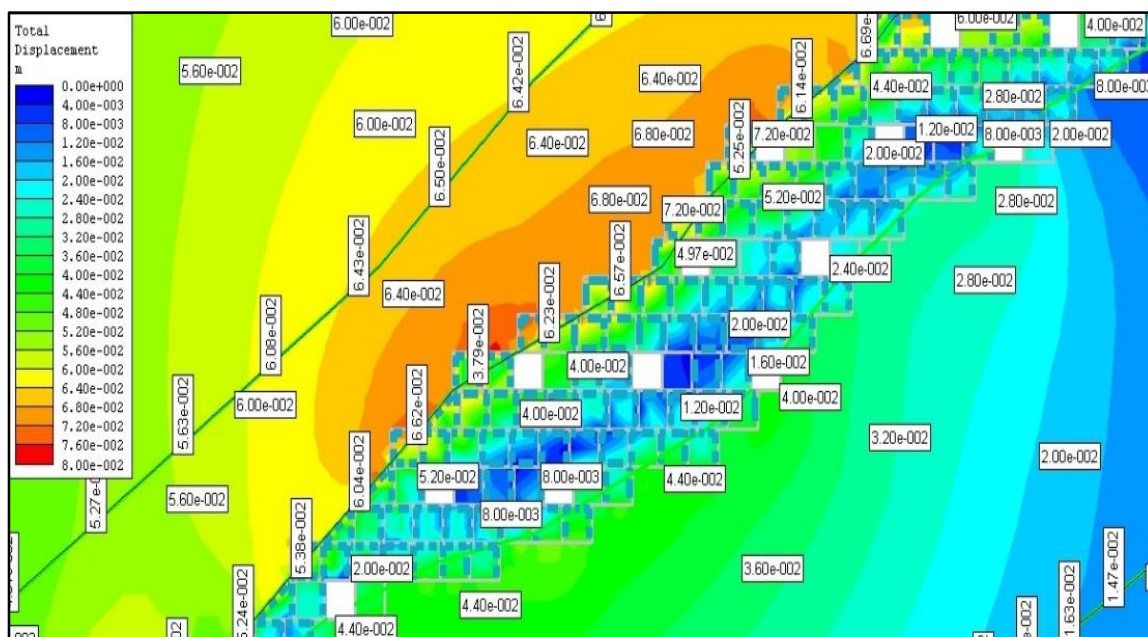
Εικόνα 83. Στοιχεία αστοχίας στο στάδιο όπου ολοκληρώνεται η εκμετάλλευση της ομάδας ορόφων.

6.8 Μοντέλο Προσομοίωσης με μεταβολή στο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος



Εικόνα 84. Μετακινήσεις στα στάδια 3 και 4 του μοντέλου με μείωση του πάχους στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στο μοντέλο αυτό αντικαταστήσαμε τα 10cm της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με 5cm, οπότε η υποστήριξη που θα προσφέρει το σκυρόδεμα θα είναι μικρότερης αντοχής και οι μετακινήσεις αναμένονται μεγαλύτερες. Στα αρχικά στάδια του μοντέλου αυτού οι μετακινήσεις είναι μικρής τάξης και γύρω από την εκμετάλλευση λαμβάνουν τιμές 1.50mm, 3.00mm, 4.50mm στο 4^ο στάδιο ενώ 2.70mm, 3.60mm, 4.50mm, 5.40mm στο 3^ο στάδιο. Μέσα στην εκμετάλλευση η βραχόμαζα μετακινείται κατά 0.90mm, 2.70mm, 3.60mm, 4.10mm, 4.50mm, 5.40mm, 7.20mm, 8.10mm, 1.17cm στο 3^ο στάδιο και στο 4^ο λαμβάνονται τιμές 1.50mm, 3.00mm, 3.62mm, 4.50mm, 6.00mm, 7.50mm, 9.00mm.

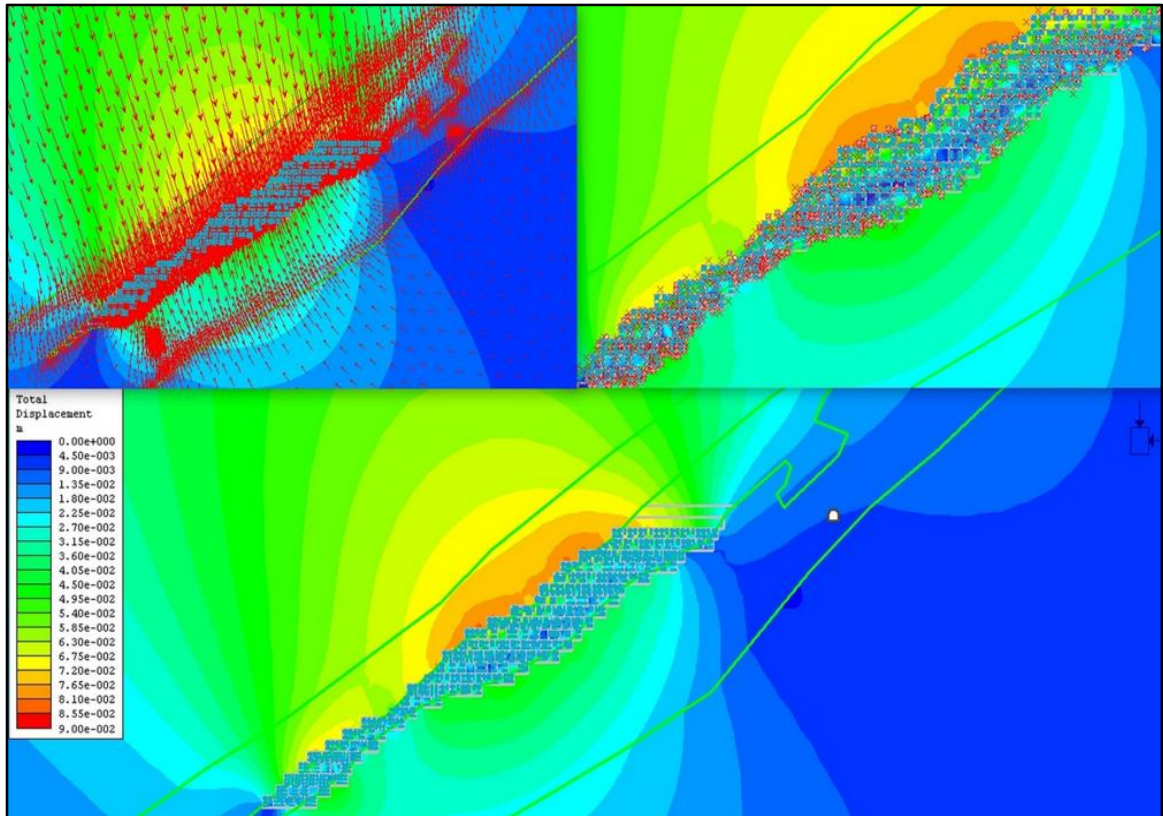


Εικόνα 86. Στάδιο προσομοίωσης 32 στο μοντέλο με υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυροδέμα πάχους 5cm.

Οι μετακινήσεις στο στάδιο 32 παίρνουν τιμές, 5.60cm, 6.00cm, 6.43cm, 6.80cm περιμετρικά στο κοίτασμα και πάνω από αυτό, ενώ κάτω από την περιοχή της εκμετάλλευσης λαμβάνουν τιμές 1.20cm, 1.47cm, 2.00cm, 2.80cm, 3.20cm, 3.60cm, 4.00cm και 4.40cm. Μέσα στην περιοχή του κοιτάσματος συναντάμε μετακινήσεις 8.00mm, 1.20cm, 1.60cm, 2.00cm, 4.00cm, 4.40cm στο κάτω μέρος του και στο άνω 8.00cm, 1.20cm, 2.00cm, 2.40cm, 2.80cm, 4.40cm, 4.97cm, 5.20cm, 7.20cm.

Πίνακας 23. Μετακινήσεις της βραχώμαζας γύρω από την εκμετάλλευση, σε σχέση με το πάχος της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

| Πάχος Σκυροδέματος | 10cm | 5cm |
|--------------------|--------|--------|
| Στάδιο 4 | 6.00mm | 6.00mm |
| Στάδιο 22 | 3.90cm | 4.20cm |
| Στάδιο 32 | 5.95cm | 6.40cm |
| Στάδιο 37 | 6.40cm | 6.75cm |
| Στάδιο 49 | 6.80cm | 7.20cm |

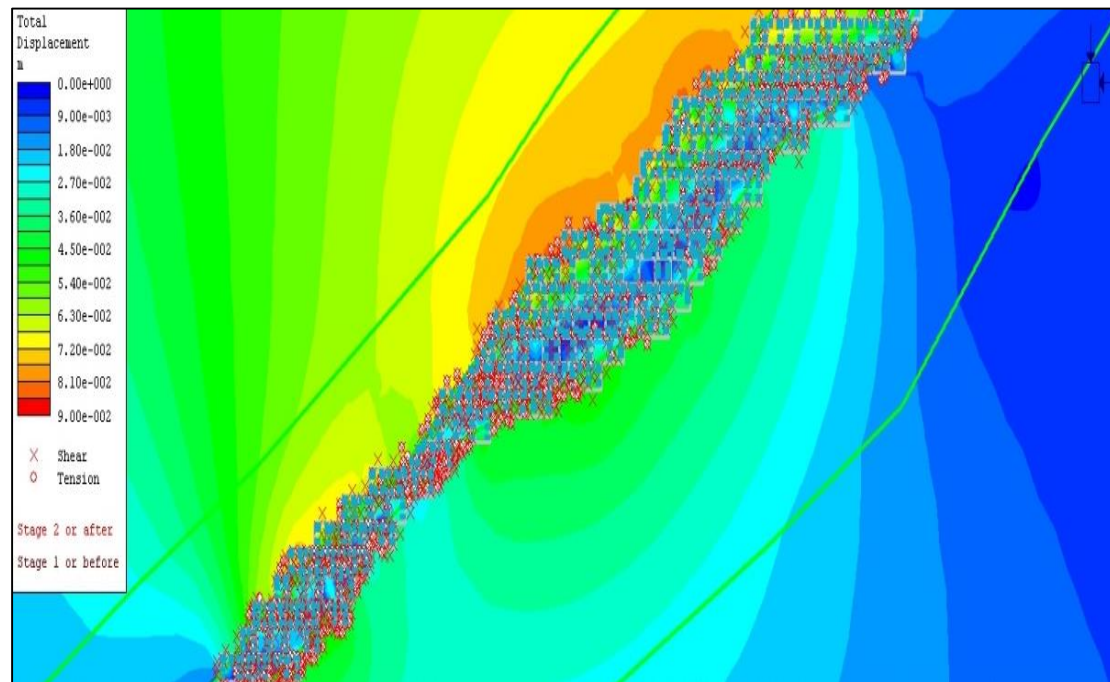


Εικόνα 87. Τελικό στάδιο εκμετάλλευσης με υποστήριξη. Στοιχεία αστοχίας (πάνω δεξιά) και διανύσματα παραμόρφωσης (πάνω αριστερά).

Πίνακας 24. Μετακινήσεις της βραχόμαζας μέσα στο σώμα του κοιτάσματος, σε σχέση με το πάχος της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

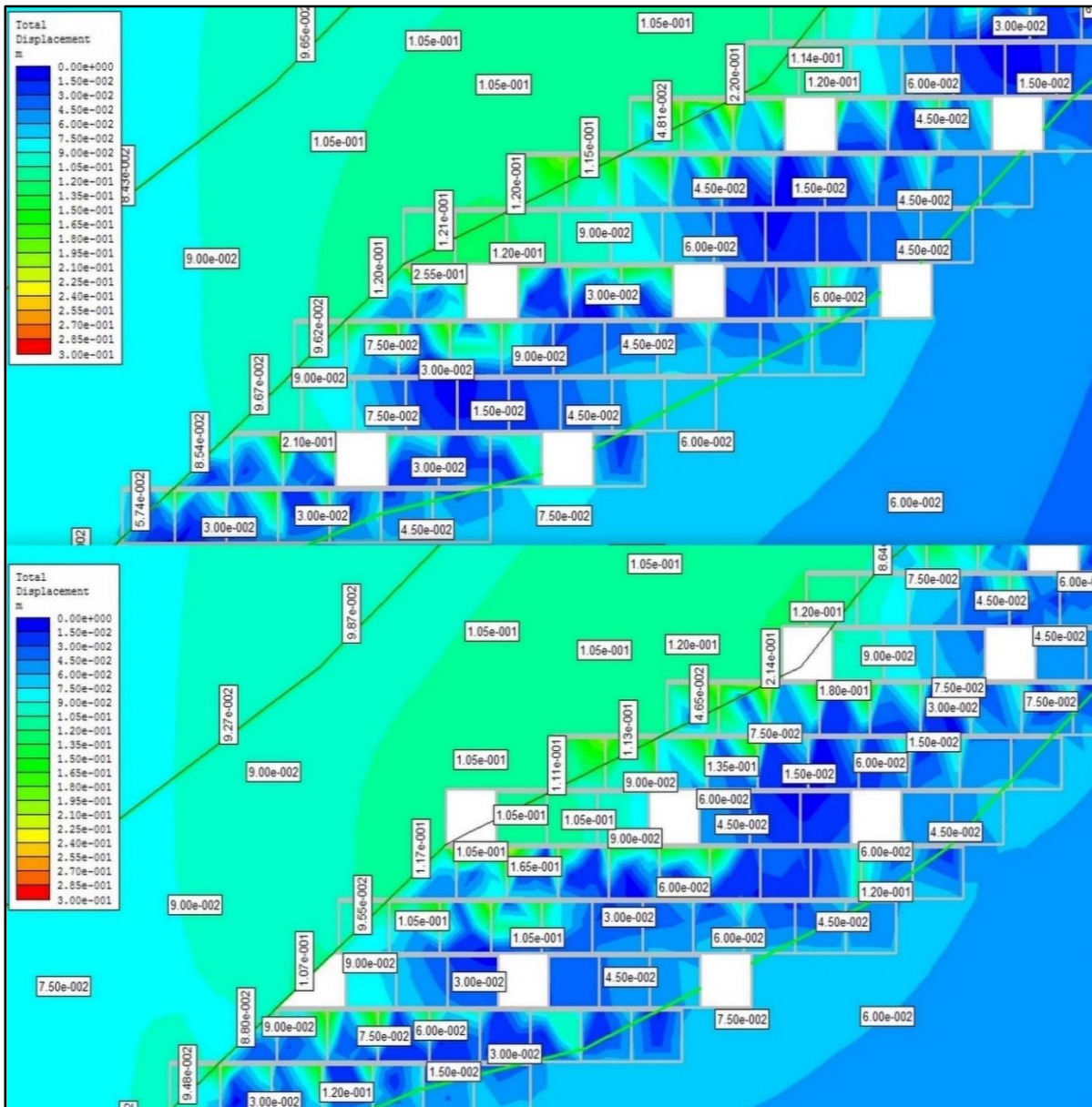
| Πάχος Σκυροδέματος | 10cm | 5cm |
|--------------------|--------|--------|
| Στάδιο 4 | 7.50mm | 7.50mm |
| Στάδιο 22 | 4.50cm | 5.04cm |
| Στάδιο 32 | 5.25cm | 6.14cm |
| Στάδιο 37 | 5.60cm | 6.30cm |
| Στάδιο 49 | 5.60cm | 6.75cm |

Στο συγκεκριμένο μοντέλο όπου μεταβάλλεται το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όσον αφορά την πλαστικοποίηση της βραχώμαζας, γίνεται η μελέτη των στοιχείων αστοχίας.



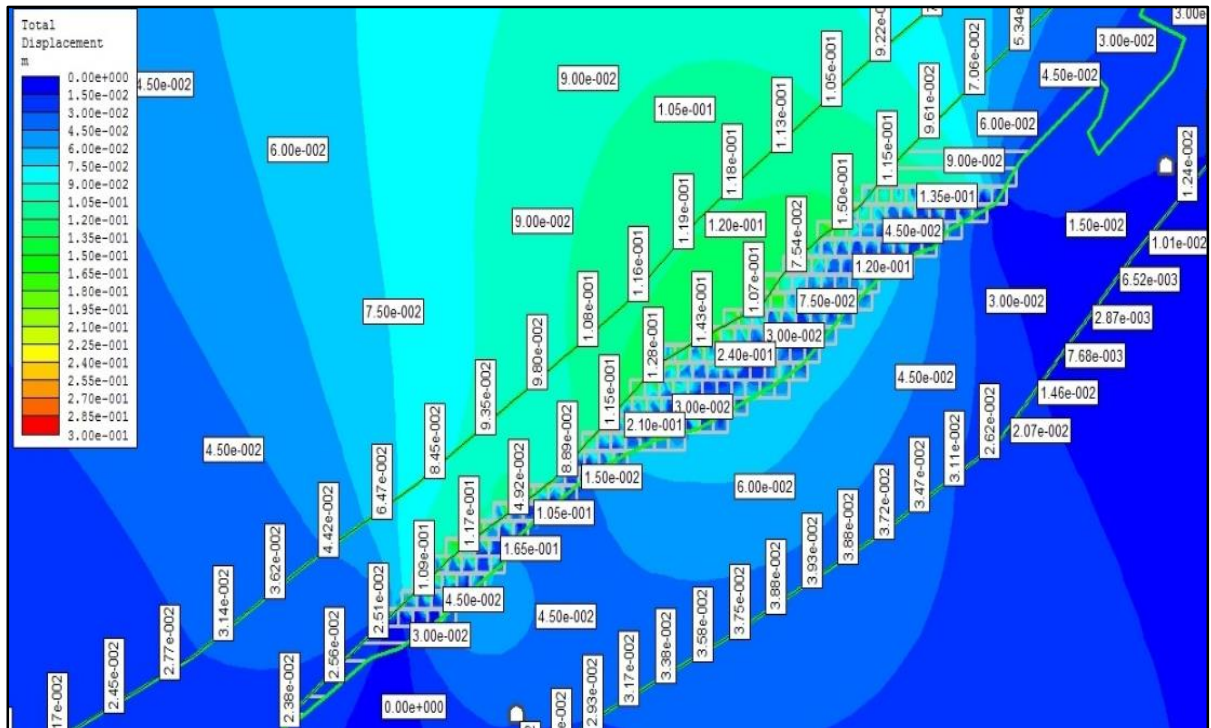
Εικόνα 88. Στοιχεία αστοχίας σε διάτμηση και σε εφελκυσμό στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης με πάχος στρώσης σκυροδέματος 5cm.

Η πλαστικοποίηση της βραχώμαζας περιορίζεται στα όρια του κοιτάσματος που έχει πλέον αντικατασταθεί πλήρως από στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm και το υλικό λιθογόμωσης. Κάποια στοιχεία αστοχίας βρίσκονται σε μέγιστες αποστάσεις από τα σύνορα της εκμετάλλευσης σε ένα εύρος τιμών από 2.482m έως 4.583m από την οροφή του κοιτάσματος ενώ μέγιστη απόσταση στοιχείου αστοχίας από το πάτωμα του κοιτάσματος είναι τα 4.705m.



Εικόνα 90. Μετακινήσεις στα στάδια 16 – 18 του μοντέλου με κενό στην οροφή των στοών εκμετάλλευσης.

Στο μοντέλο αυτό και στα συγκεκριμένα στάδια παρατηρούμε μεγάλες συνολικές μετακινήσεις λόγω του κενού των 20cm στην οροφή. Αναλυτικά έχουμε διακυμάνσεις από 7.50cm, 9.00cm, 9.87cm, 10.5cm , 12cm στα όρια του μαρμάρου και μέσα σε αυτό, στη περιοχή πάνω από το κοίτασμα και 7.50cm, 6.00cm, 4.50cm κάτω από αυτό. Μέσα στο κοίτασμα, στα όρια της εκμετάλλευσης έχουμε μετακινήσεις 4.65cm, 8.80cm, 9.55cm, 10.7cm, 11cm στο πάνω μέρος και στο κάτω 3.00cm, 4.50cm, 7.50cm ενώ στο εσωτερικό 1.50cm, 3.00cm, 4.50cm, 6.00cm, 7.50cm, 9.00cm, 10.5cm, 10.35cm και 12.00cm.



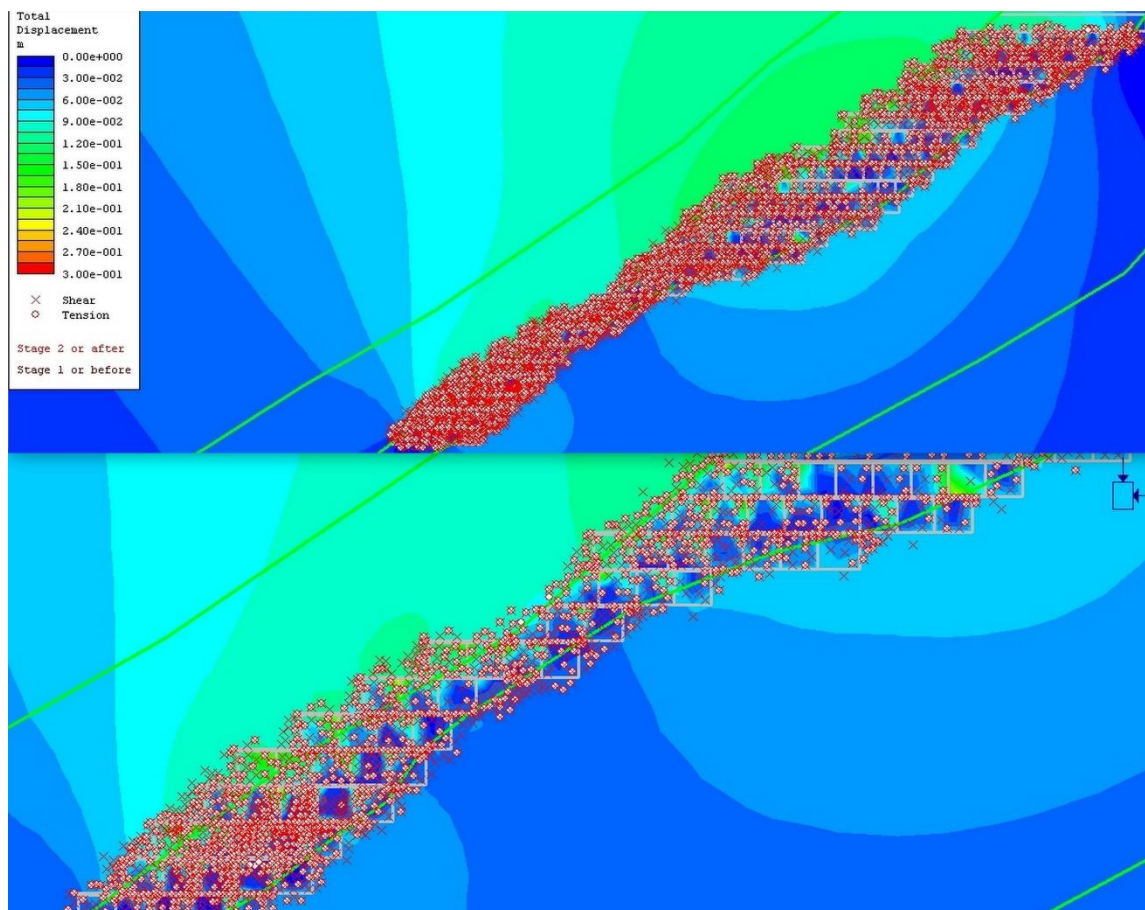
Εικόνα 91. Τελικό στάδιο με κενά στους ανώτερους ορόφους. Στάδιο 31.

Στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης του συγκεκριμένου μοντέλου παρατηρήθηκαν μετακινήσεις, στην περιβάλλουσα το κοίτασμα, βραχόμαζα της τάξης 4.50cm, 6.00cm, 7.50cm, 9.00cm, 9.80cm, 10.5cm, 11.6cm και 12.00cm στην περιοχή πάνω από το κοίτασμα. Στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης σημειώνονται μετακινήσεις 1.50cm, 3.00cm, 4.50cm, 4.92cm, 7.50cm, 8.80cm, 9.00cm, 10.90cm, 11.50cm, 12.00cm, 13.50cm, 21.00cm και 24.00cm ως μέγιστη τιμή. Κάτω από το κοίτασμα παρατηρούνται τιμές από 2.87mm, 7.68mm, 1.50cm, 3.00cm - 4.50cm, 6.00cm.

Πίνακας 25. Μέγιστες μετακινήσεις στην περιοχή εσωτερικά της εκμετάλλευσης

| Στάδια Προσομοίωσης | Μέγιστες Μετακινήσεις |
|---------------------|-----------------------|
| 2 | 9.00mm |
| 8 | 7.50cm |
| 16 | 12.00cm |
| 22 | 15.00cm |
| 31 | 24.00cm |

Στο συγκεκριμένο μοντέλο στο οποίο δεν πετυχαίνεται η 100% πλήρωση κάποιων στοών αλλά παραμένει κενό 20cm στην οροφή, στοιχεία αστοχίας είτε διάτμησης, είτε εφελκυσμού δεν περιοζόνται εντός των ορίων της εκμετάλλευσης. Σημαντικός αριθμός αυτών βρίσκεται εντός του στρώματος μαρμάρου που περιβάλλει την εκμετάλλευση.



Εικόνα 92. Στοιχεία αστοχίας στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης με το κενό 20cm. Κατώτερο υψομετρικά τμήμα της εκμετάλλευσης (κάτω).

Επομένως, η πλαστική ζώνη βρίσκεται εκτός του ορίου του μεταλλεύματος. Στους ορόφους που βρίσκονται λίγο πιο χαμηλά, υψομετρικά από το μέσο της εκμετάλλευσης τα στοιχεία είναι πιο πολλά σε αριθμό και έχουν πυκνή διάταξη. Πάνω από το μέσο της εκμετάλλευσης η διάταξή τους είναι πιο αραιή. Κάποια στοιχεία αστοχίας βρίσκονται σε μέγιστες αποστάσεις από τα σύνορα της εκμετάλλευσης σε ένα εύρος τιμών από 2.944m έως 4.993m από την οροφή του κοιτάσματος με ενδιάμεσες μέγιστες αποστάσεις τα 3.741m, 3.944m, 4.093m, 4.215m, 4.693m, 4.810m. Αντίστοιχα η μέγιστη απόσταση στοιχείου αστοχίας από το πάτωμα του κοιτάσματος είναι τα 4.313m με στοιχεία να βρίσκονται επίσης σε αποστάσεις 2.307m, 3.426m, 3.632m.

7 Συμπεράσματα – Σχόλια

Συνολικά τα 12 μοντέλα προσομοιώσεων, έδωσαν μεγάλο αριθμό στοιχείων επί των συνολικών μετακινήσεων της βραχόμαζας, γύρω από τα όρια της εκμετάλλευσης αλλά και στο εσωτερικό αυτής. Αν εξαιρέσουμε τα δύο μοντέλα με την μεταβολή του λόγου των οριζοντίων με τις κατακόρυφες τάσεις k και εκείνο με το κενό 20cm σε συγκεκριμένες οροφές του μεταλλείου όπου οι μετακινήσεις έλαβαν αρκετά μεγάλες τιμές τα υπόλοιπα μοντέλα παρουσίασαν τιμές της τάξεως των εκατοστών. Το πληρωτικό υλικό με τις παρούσες γεωτεχνικές ιδιότητες παρουσιάζει θετική αλληλεπίδραση με τους υπόλοιπους σχηματισμούς.

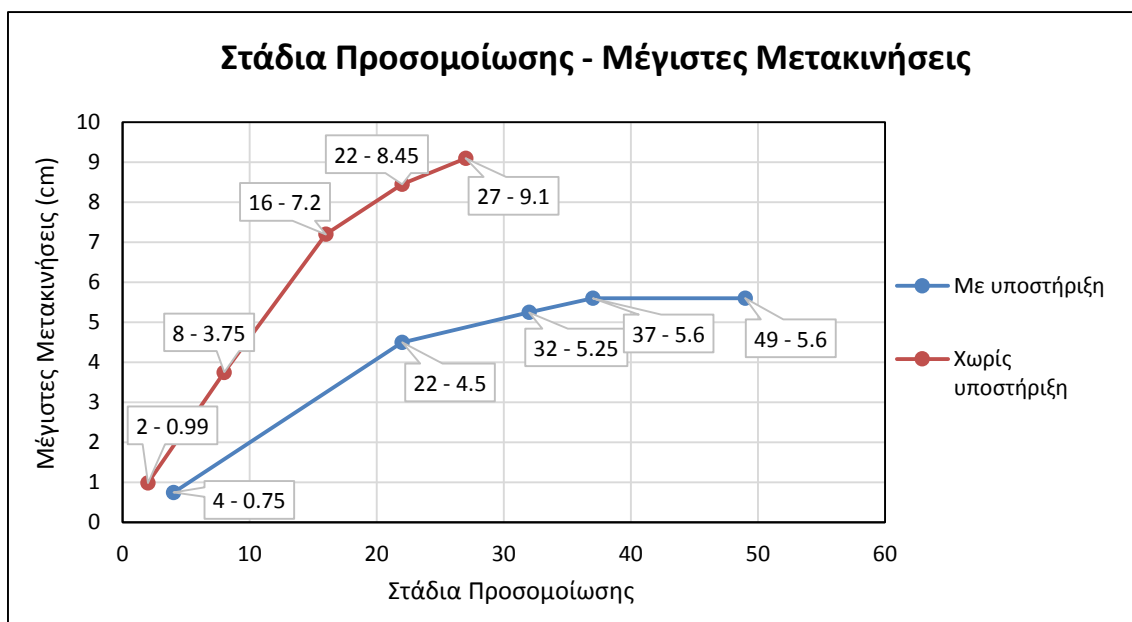
Όσον αφορά τα βασικά μοντέλα προσομοίωσης, τα ανυποστήρικτα, δυσμενών συνθηκών, όπου πραγματοποιήθηκε η απευθείας λιθογόμωση των εξορυσσόμενων κενών, παρουσίασαν μεγαλύτερες συνολικές μετακινήσεις στην έκταση της εκμετάλλευσης συγκριτικά με τα μοντέλα όπου γίνεται χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως μέτρο υποστήριξης.

Τα αποτελέσματα όσον αφορά τα παραμετρικές αναλύσεις ήταν λογικά και αναμενόμενα. Στο μοντέλο που ορίστηκε η μείωση της αντοχής σ_c σε μονοαξονική θλίψη του υλικού πλήρωσης οι τιμές μετακινήσεων που λήφθηκαν ήταν αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά με τις μετακινήσεις που συνέβησαν στο βασικό μοντέλο όπου η λιθογόμωση είχε την ισχύουσα αντοχή των 4MPa, που εφαρμόζεται στο μεταλλείο των Μαύρων Πετρών. Σε εκείνα τα μοντέλα όπου μεταβλήθηκαν το μέτρο ελαστικότητας και ο δείκτης GSI της λιθογόμωσης, η αύξησή τους επέφερε μικρότερες τιμές συνολικών μετακινήσεων περιμετρικά και εσωτερικά της εκμετάλλευσης, ενώ η ελάττωση τους είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες συνολικές μετακινήσεις. Στην αλλαγή του εντατικού πεδίου με μεταβολή στον λόγο k , παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στις μετακινήσεις από το βασικό ανυποστήρικτο μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα καταγράφηκαν σημαντικά μεγάλες τιμές μετακινήσεων στο παραμετρικό μοντέλο τόσο γύρω, όσο και μέσα στην περιοχή της εκμετάλλευσης. Στην παραμετρική ανάλυση, όπου κύρια μεταβολή ήταν η μείωση του πάχους της στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο μισό, σημειώθηκαν μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων στην έκταση της εκμετάλλευσης από ότι στο βασικό υποστηριζόμενο ομοίωμα. Τέλος στο προσομοιωτικό μοντέλο που περιλάμβανε την δημιουργία κενού 20cm στο ταβάνι των ορόφων εκείνων που δεν ήταν δυνατόν για τεχνικούς λόγους να

πληρωθούν 100%, σημειώθηκαν αρκετά μεγάλες τιμές συνολικών μετακινήσεων στην περίμετρο του κοιτάσματος αλλά και στο εσωτερικό της εκμετάλλευσης.

7.1 Ομοιώματα Συνολικής Εκμετάλλευσης με και χωρίς Υποστήριξη

Συγκρίνοντας από τα βασικά μοντέλα εκείνα που αφορούν την συνολική εκμετάλλευση του κοιτάσματος χωρίς χρήση μέσων υποστήριξης και με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, προκύπτουν στοιχεία που δείχνουν πως επιδρά η υποστήριξη στις μετακινήσεις της βραχόμαζας που περιβάλλει την εκμετάλλευση. Οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες στο μοντέλο με τις δυσμενείς συνθήκες μη υποστήριξης των στοών όπου πραγματοποιείται η απευθείας λιθογόμωση αμέσως μετά την εκσκαφή τους. Στο σχήμα που ακολουθεί καταγράφονται διαγραμματικά οι μέγιστες μετακινήσεις στα διάφορα στάδια των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν και φαίνονται οι διαφορές στις μετακινήσεις των σχηματισμών.



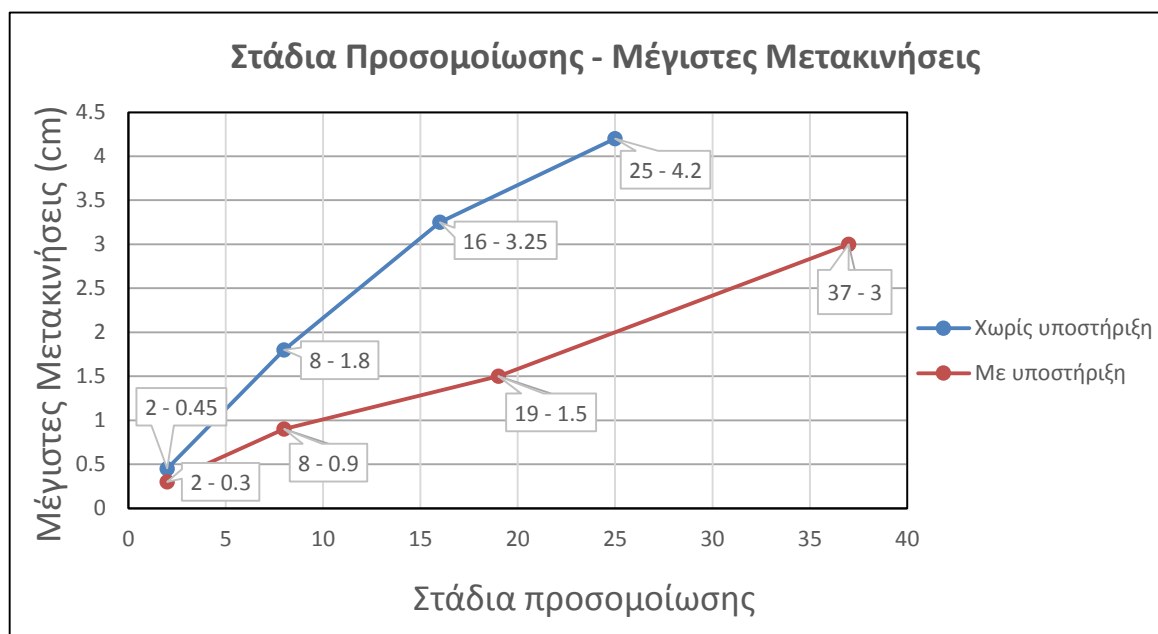
Διάγραμμα 4. Μέγιστες μετακινήσεις στα μοντέλα της συνολικής εκμετάλλευσης με και χωρίς χρήση μέτρων υποστήριξης.

Με τη βοήθεια του διαγράμματος καταγράφονται οι διαφορές στις μετακινήσεις που οφείλονται στην χρήση υποστήριξης. Οι μέγιστες μετακινήσεις στο μοντέλο όπου προηγείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της λιθογόμωσης είναι μικρότερες σε όλη την έκταση της εκμετάλλευσης. Στα τελικά στάδια των δύο βασικών μοντέλων 27 και 49

αντίστοιχα, καταγράφονται μετακινήσεις με τιμές 5.60cm σε εκείνο με την χρήση σκυροδέματος και 9.10cm σε αυτό όπου επικρατούν δυσμενείς συνθήκες.

7.2 Ομοιώματα Εκμετάλλευσης Ομάδας Ορόφων με και χωρίς υποστήριξη

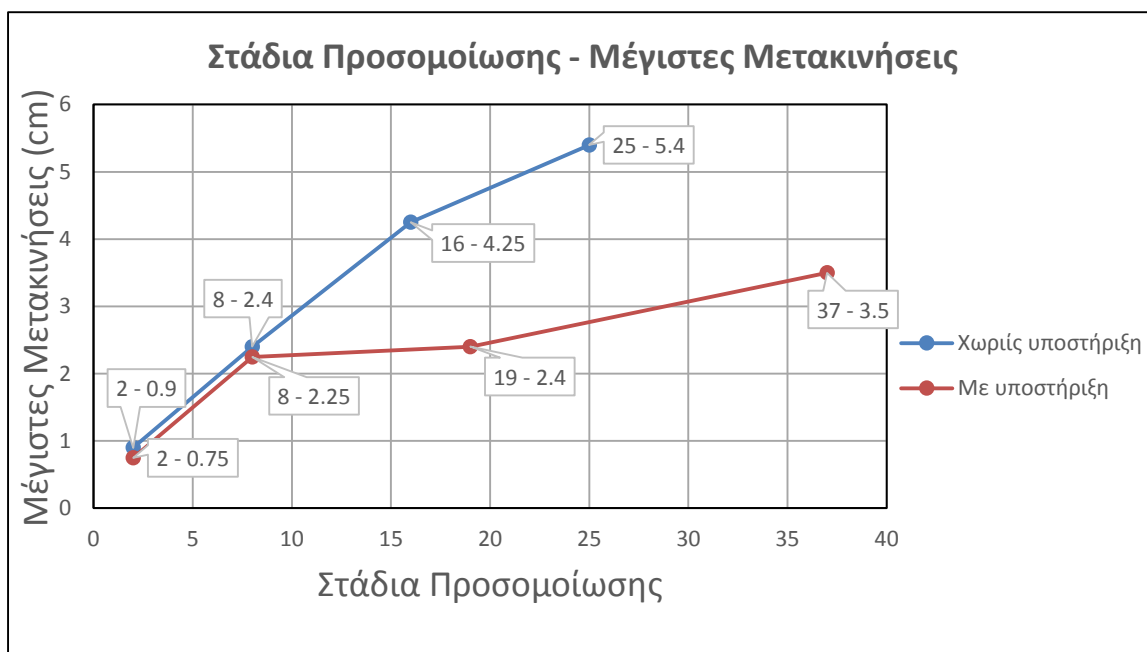
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τασικών αναλύσεων των δύο μοντέλων προσομοίωσης όπου πραγματοποιήθηκε η εκμετάλλευση συγκεκριμένης ομάδας ορόφων μεταλλεύματος με ή χωρίς χρήση υποστηρικτικών μέτρων προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα με τα μοντέλα της συνολικής εκμετάλλευσης. Ακολουθούν δύο διαγράμματα όπου αναγράφονται οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων της βραχόμαζας στην περιοχή πάνω από την εκμετάλλευση και στο εσωτερικό αυτής, στα διάφορα στάδια που αναλύθηκαν κατά την προηγούμενη ενότητα.



Διάγραμμα 5. Γραφική απεικόνιση των σταδίων της προσομοίωσης με τις μέγιστες μετακινήσεις πάνω από το κοίτασμα.

Ο αριθμός των σταδίων των δύο μοντέλων όπως έχει αναφερθεί διαφέρει, καθώς στην εκμετάλλευση με χρήση υποστήριξης πραγματοποιούνται περισσότερες εργασίες κατά την εξόρυξη του μεταλλεύματος. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα καθόλη την διάρκεια της εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις στο μοντέλο με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως στοιχείο υποστήριξης, οι μετακινήσεις είναι μικρότερες. Με μέγιστη τιμή αυτή των

3.00cm στο τελικό στάδιο 37 της εκμετάλλευσης σε αντίθεση με την αντίστοιχη μέγιστη μετακίνηση στο στάδιο 25 (τελικό) των 4.20cm.

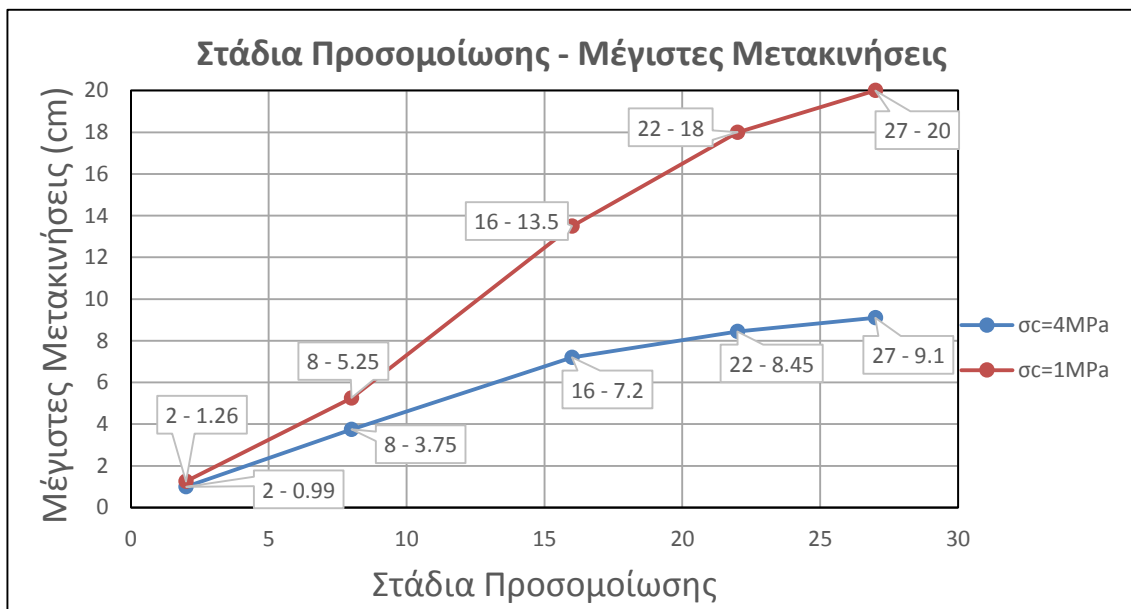


Διάγραμμα 6. Τα στάδια προσομοίωσης με τις μέγιστες συνολικές μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή εσωτερικά του κοιτάσματος.

Το διάγραμμα αυτό ασχολείται με τις μέγιστες μετακινήσεις των πετρωμάτων γύρω από τις στοές εκμετάλλευσης στα διάφορα στάδια που μελετήθηκαν. Παρατηρείται πως μέχρι και το, σχετικά αρχικό, 8^ο στάδιο διακρίνονται κοντινές τιμές μετακινήσεων στα 2.40cm στο μοντέλο όπου έγινε χρήση της λιθογόμωσης ως μέσο υποστήριξης και 2.25cm εκεί όπου είχαμε την παρουσία σκυροδέματος. Οι μέγιστες μετακινήσεις στα αντίστοιχα τελικά στάδια, όπου έχει ολοκληρωθεί η εκμετάλλευση της ομάδας ορόφων, είναι 3.50cm στο ομοίωμα με χρήση υποστήριξης πριν την λιθογόμωση και 5.40cm στο μοντέλο με τις δυσμενείς συνθήκες.

7.3 Παραμετρικά Μοντέλα

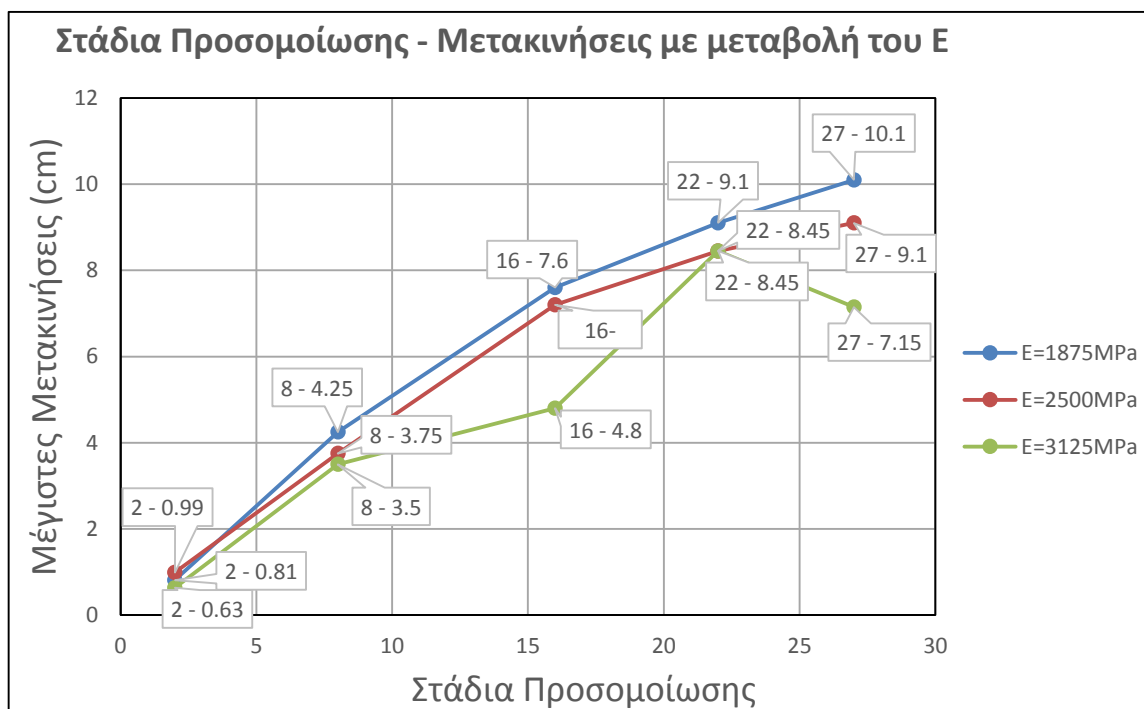
Αρχικά το μέγεθος που μεταβλήθηκε στα παραμετρικά μοντέλα είναι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συγκεκριμένου μοντέλου θα καθορίσουν το ποσοστό συμμετοχής του σημαντικότερου παράγοντα του μίγματος της λιθογόμωσης, το τσιμέντο. Μειώνοντας την αντοχή σ_c , μειώνεται και η ποσότητα του τσιμέντου που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του υλικού λιθογόμωσης. Οι τιμές των μετακινήσεων που καταγράφηκαν είναι αρκετά υψηλές. Η σύγκριση των μέγιστων τιμών των μετακινήσεων που παρατηρήθηκαν στα μοντέλα με αντοχή $\sigma_c=4\text{MPa}$ και 1MPa αντίστοιχα, πραγματοποιείται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 7. Μεταβολές των μετακινήσεων της βραχόμαζας με τα στάδια της προσομοίωσης με μεταβολή της αντοχής σ_c της λιθογόμωσης.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα οι διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων είναι αρκετά μεγάλες. Στα τελικά στάδια εντός της περιοχής του κοιτάσματος που έχει πλέον αντικατασταθεί με το σώμα της λιθογόμωσης σημειώνεται μέγιστη μετακίνηση 9.10cm στη μέγιστη αντοχή σ_c , ενώ 20.00cm στην ελάχιστη $\sigma_c=1\text{MPa}$.

Μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας του υλικού λιθογόμωσης επηρεάζονται οι μετακινήσεις των σχηματισμών γύρω από την εκμετάλλευση. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας τόσο καλύτερα τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σώματος της λιθογόμωσης και τόσο μικρότερες είναι οι μετακινήσεις της βραχόμαζας γύρω από το μεταλλείο. Στο διάγραμμα που ακολουθεί αναγράφονται οι μέγιστες μετακινήσεις που συμβαίνουν στα στάδια 2, 8, 16, 22 και 27 με την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού πλήρωσης των στοών.

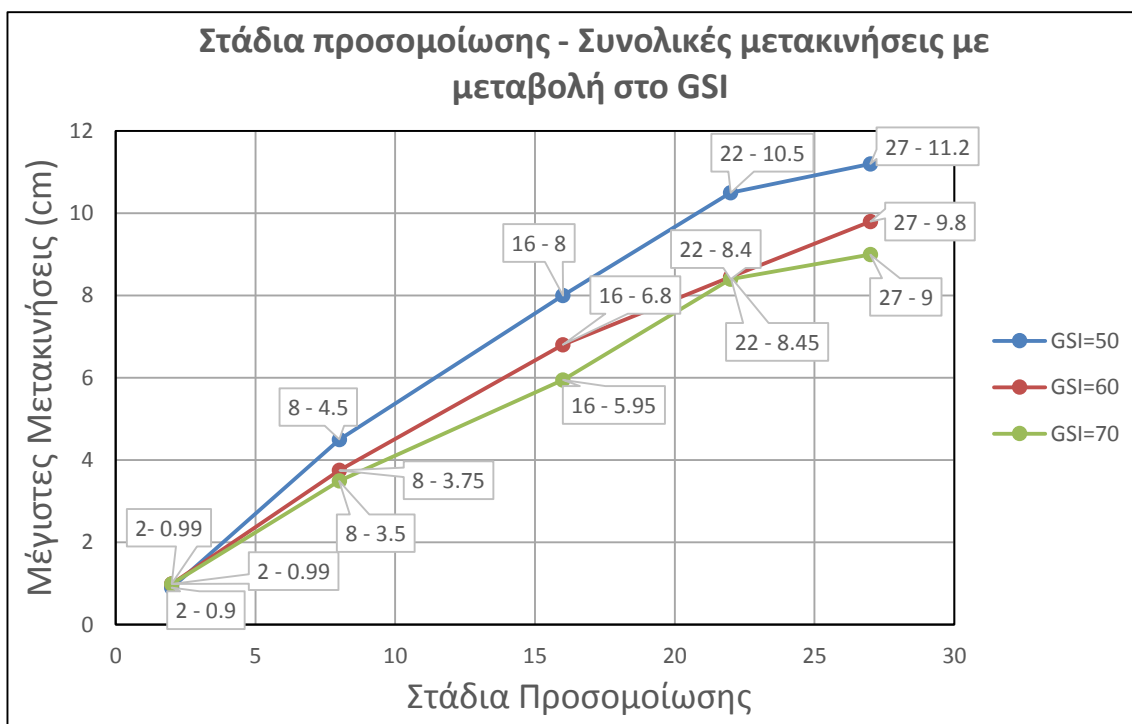


Διάγραμμα 8. Μεταβολές στις μετακινήσεις της βραχόμαζας στην περιοχή του κοιτάσματος με τα στάδια για τα διάφορα μέτρα ελαστικότητας E.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα στα τελικά στάδια έχουμε μετακινήσεις 7.15cm για το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας $E=3125\text{MPa}$, μία ενδιάμεση τιμή 9.10cm για το βασικό μοντέλο με $E=2500\text{MPa}$ και την μεγαλύτερη μετακίνηση των 10.10cm στη προσομοίωση με το ελάχιστο μέτρο Young $E=1875\text{MPa}$.

Στη παραμετρική περίπτωση όπου μεταβάλλουμε τον δείκτη GSI του υλικού λιθογόμωσης από 60 σε 70 και έπειτα σε 50 οι μετακινήσεις που καταγράφονται διαφέρουν. Όταν ο δείκτης παίρνει την μέγιστη τιμή του, το υλικό που αντικαθιστά το μετάλλευμα στις στοές του μεταλλείου προκαλεί μετακινήσεις μικρότερων τιμών τόσο στο σώμα της εκμετάλλευσης όσο και περιμετρικά αυτής. Ενώ το υλικό με δείκτη $GSI=50$ παρουσιάζει στο σύνολο του μεταλλείου μεγαλύτερες μετακινήσεις της

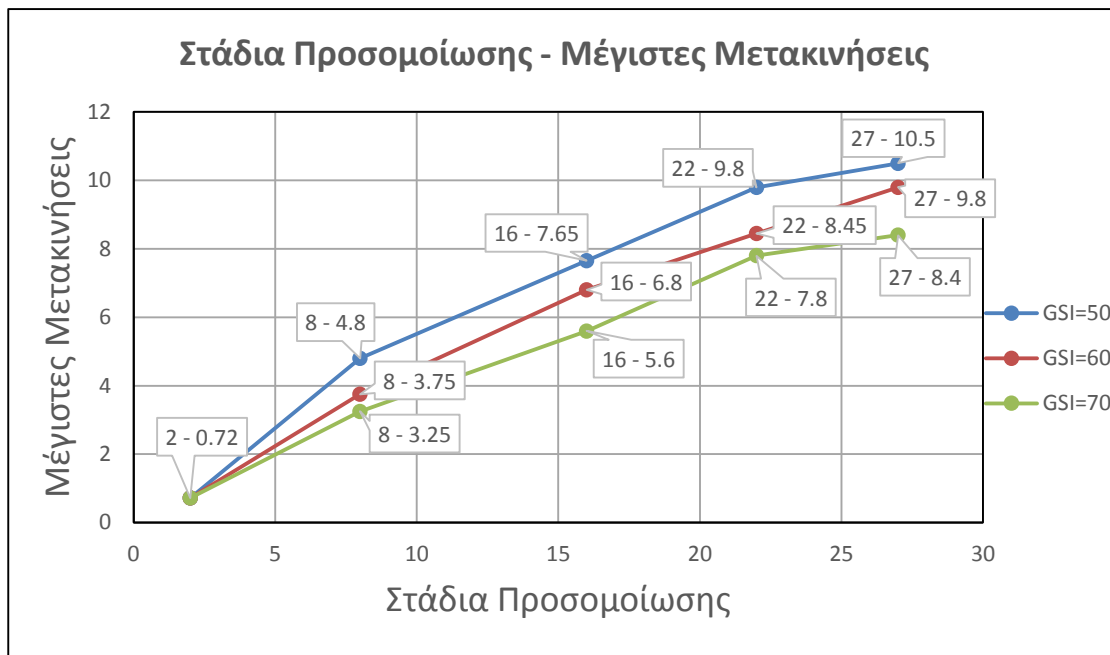
βραχώμαζας που το περιβάλλει. Αυτό φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί όπου παρουσιάζονται οι διαφορές των μετακινήσεων με τη μεταβολή του δείκτη GSI στο εσωτερικό της περιοχής της εκμετάλλευσης.



Διάγραμμα 9. Μέγιστες μετακινήσεις στους διάφορους δείκτες GSI με τα στάδια προσομοίωσης στην περιοχή της εκμετάλλευσης.

Στο διάγραμμα καταγράφονται οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων στα τελικά στάδια των μοντέλων από 9.00cm με τον μέγιστο δείκτη GSI=70, 9.80cm στο βασικό μοντέλο προσομοίωσης με GSI=60 και την μεγαλύτερη μετακίνηση 11.20cm στην ανάλυση με το μικρότερο δείκτη GSI.

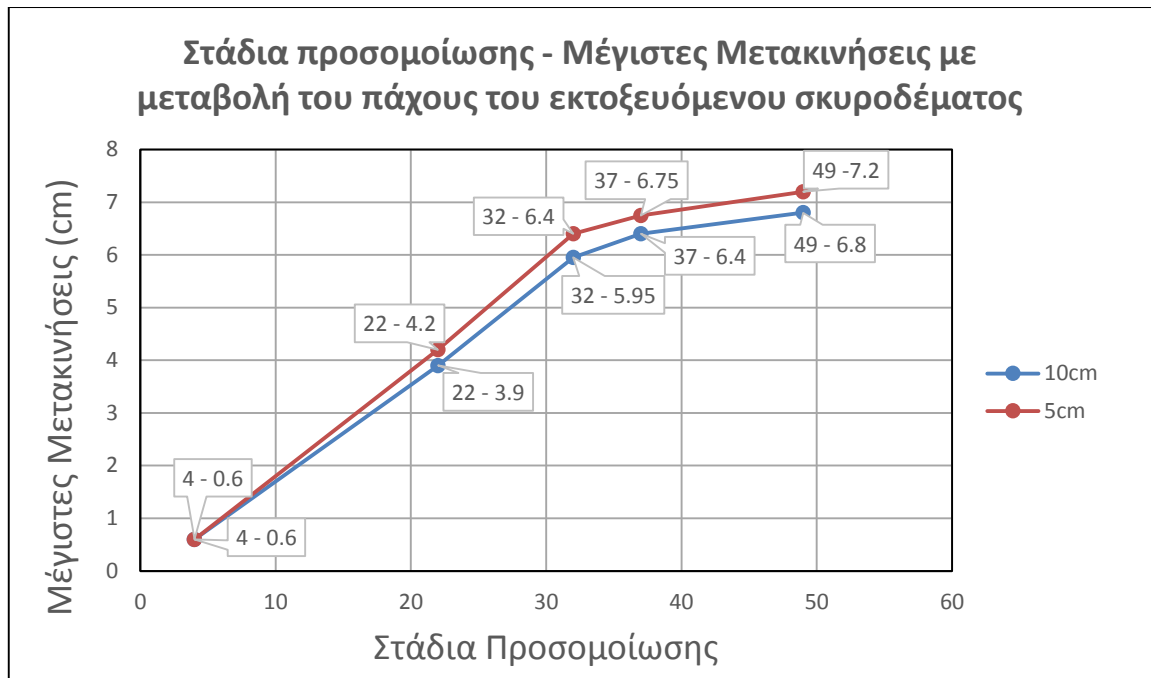
Παράλληλα στην περιοχή που περιβάλλει το μεταλλείο οι διαφορές των μετακινήσεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 10. Μεταβολές των μετακινήσεων με τα στάδια προσομοίωσης, στους διάφορους δείκτες GSI στην περιοχή γύρω από την εκμετάλλευση.

Όπως συνέβη στην περιοχή ανάπτυξης των στοών έτσι και στο τμήμα αυτό οι μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες για μικρότερο δείκτη GSI, 10.50cm στο τελικό στάδιο (27^ο) και μικρότερες 8.40cm για μεγάλο δείκτη GSI=70. Επίσης φαίνεται στο διάγραμμα πως καθ'όλη την διάρκεια της εκμετάλλευσης όσο προχωράνε τα στάδια, οι μετακινήσεις στο μοντέλο με το μικρότερο δείκτη GSI=50 παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές. Ταυτόχρονα στην προσομοίωση με το μέγιστο GSI σημειώνονται η μικρότερες μετακινήσεις της περιβάλλουσας το κοίτασμα βραχώμαζας σε όλα τα στάδια.

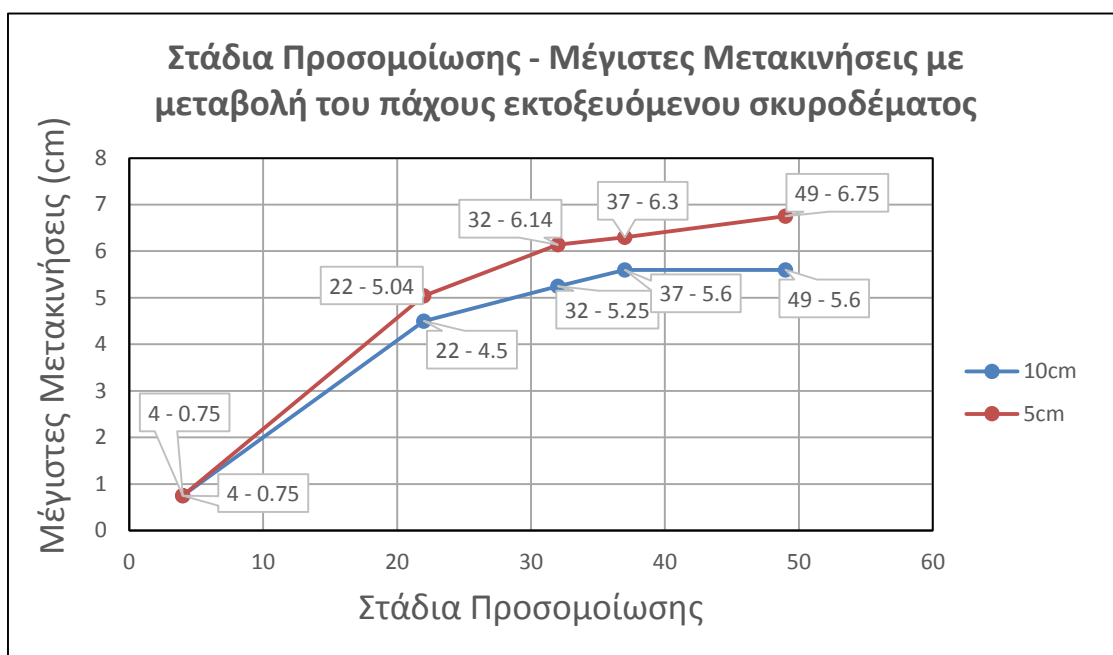
Στο μοντέλο όπου πραγματοποιήθηκε η μεταβολή του πάχους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (liner) και συγκεκριμένα η μείωσή του από 10cm σε 5cm παρατηρήθηκε αύξηση στις τιμές των μετακινήσεων. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς μειώνοντας το πάχος της στρώσης του σκυροδέματος μειώνεται η ικανότητα του να υποστηρίξει τις εξορυσσόμενες στοές εκμετάλλευσης. Στο διάγραμμα που φαίνεται στη συνέχεια απεικονίζονται οι μεταβολές στις μετακινήσεις της βραχώμαζας στην περιοχή γύρω από το κοίτασμα, για τα δύο πάχη του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



Διάγραμμα 11. Μεταβολές των μετακινήσεων της βραχόμαζας με τα στάδια εκμετάλλευσης για τα διαφορετικά πάχη εκτοξευόμενου σκυροδέματος γύρω από την εκμετάλλευση.

Στα τελικά στάδια όπου έχει ολοκληρωθεί η εκμετάλλευση σημειώνονται μικρότερες μετακινήσεις στο μοντέλο με το μεγαλύτερο πάχος liner, καθώς συγκρατούνται καλύτερα οι σχηματισμοί που περιβάλλουν το μεταλλείο. Ενώ μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων παρουσιάζονται σε όλα τα στάδια και συγκεκριμένα στα 4, 22, 32, 37 και 49 της προσομοίωσης στο μοντέλο με liner πάχους 5cm. Παρόλα αυτά οι διαφορές στις μετακινήσεις δεν είναι μεγάλες για την περιοχή που περιβάλλει την εκμετάλλευση. Πιο αναλυτικά στο στάδιο 32 σημειώνονται μετακινήσεις μεγέθους 5.95cm στο μοντέλο με το παχύτερο στρώμα σκυροδέματος ενώ στο ίδιο στάδιο η μέγιστη μετακίνηση για το παραμετρικό είναι 6.45cm. Στο τελικό στάδιο παρατηρείται μία διαφορά στις μετακινήσεις από τα 6.80cm στα 7.20cm.

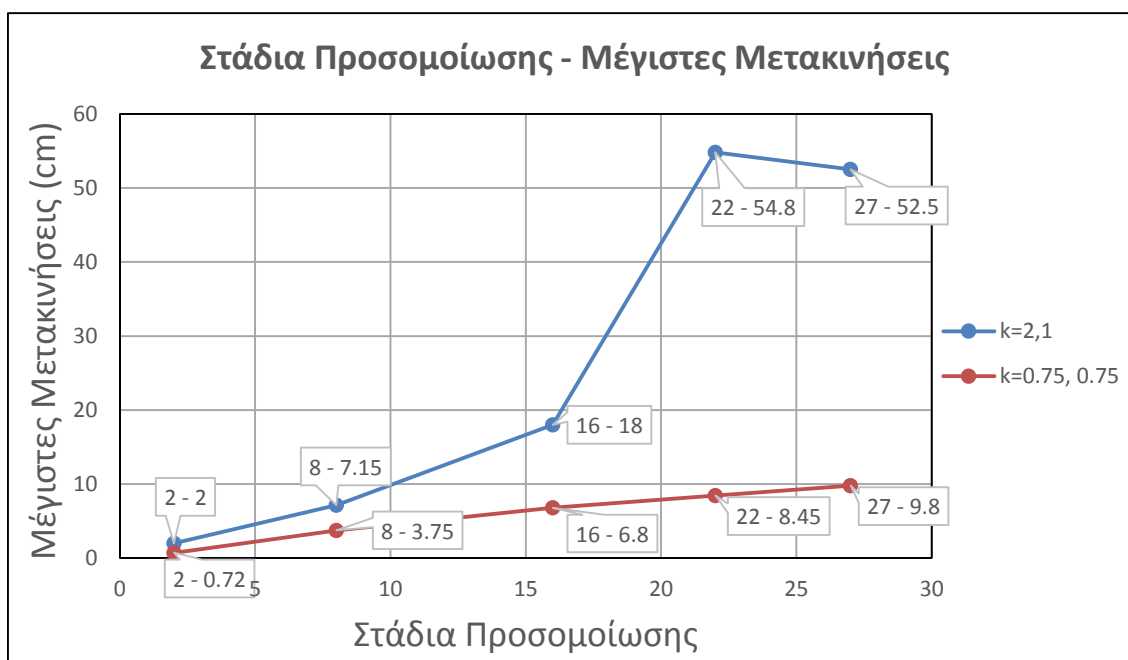
Στη περιοχή εντός του σώματος του κοιτάσματος σημειώνονται διαφορές στις μετακινήσεις της βραχόμαζας μεταξύ των δύο μοντέλων με διαφορετικό πάχος στο σκυρόδεμα, οι οποίες δίδονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 12. Μεταβολές των μετακινήσεων της βραχόμαζας με τα στάδια εκμετάλλευσης για τα διαφορετικά πάχη εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο εσωτερικό του κοιτάσματος.

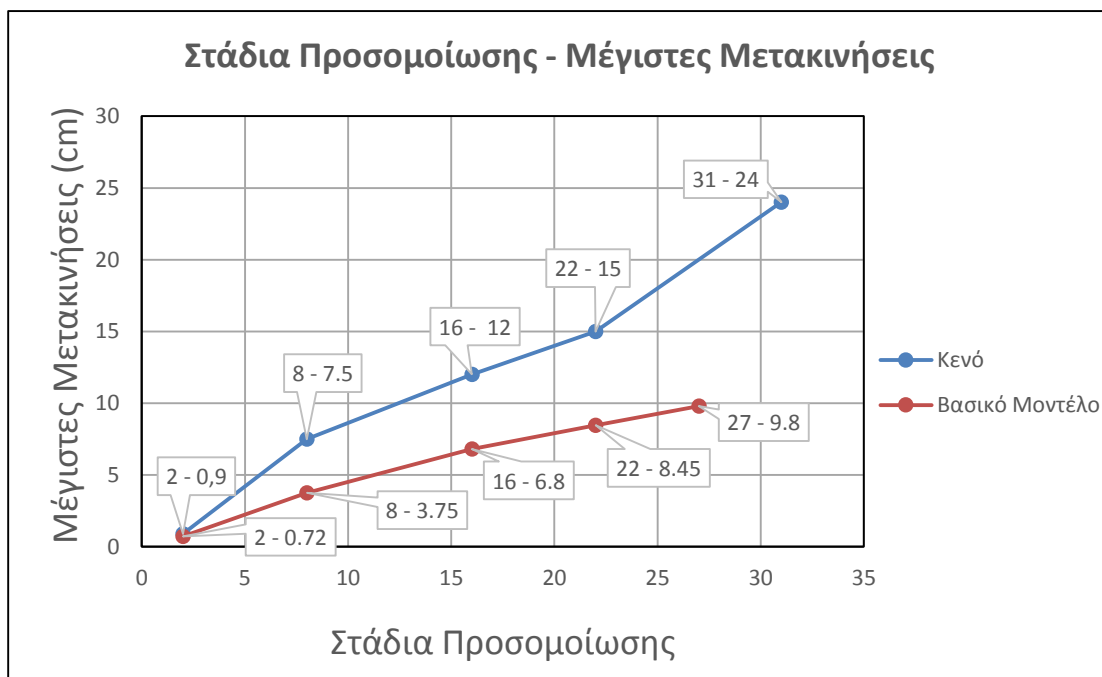
Οι συνολικές μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στο εσωτερικό του κοιτάσματος με χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος διαφορετικού πάχους στρώματος, παρουσιάζουν ανάλογες διακυμάνσεις, αλλά λίγο μεγαλύτερου μεγέθους, με εκείνες περιμετρικά του κοιτάσματος. Οι μεγαλύτερες τιμές των μετακινήσεων ανήκουν στο μοντέλο με το λεπτότερο στρώμα liner σε όλα τα στάδια της προσομοίωσης, γεγονός απόλυτα λογικό εξαιτίας της μικρότερης αντοχής στην παραλαβή φορτίων που παρουσιάζει. Συγκεκριμένα στο τελευταίο στάδιο η μέγιστη μετακίνηση είναι 6.75cm. Στο μοντέλο όπου γίνεται χρήση μεγαλύτερου πάχους στρώσης σκυροδέματος η μέγιστη τιμή μετακίνησης είναι 5.60cm.

Στο παραμετρικό μοντέλο όπου μεταβλήθηκε ο λόγος των οριζόντιων με τις κατακόρυφες τάσεις k , οι διαφορές στις μετακινήσεις που προέκυψαν από τις τασικές αναλύσεις καταγράφονται σχηματικά, στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 13. Στάδια προσομοίωσης με μέγιστες μετακινήσεις του βασικού μοντέλου και του παραμετρικού με μεταβολή του λόγου k .

Παρατηρείται ότι, οι διαφορές στις τιμές των μέγιστων μετακινήσεων είναι αρκετά μεγάλες μεταξύ των δύο μοντέλων στα συνολικά στάδια της προσομοίωσης. Στα στάδια 2, 8, 16, 22 και 27 που μελετήθηκαν κατά την ανάλυση, οι μετακινήσεις παίρνουν τιμές 0.72cm - 2.00cm, 3.75cm - 7.15cm, 6.80cm - 18.00cm, 8.45cm - 54.8cm και 9.80 - 52.5cm.



Διάγραμμα 14. Διαγραμματική απεικόνιση των μετακινήσεων της βραχόμαζας κατά τα διάφορα στάδια προσομοίωσης στο εσωτερικό του κοιτάσματος, στο βασικό μοντέλο και στο μοντέλο με κενό στις οροφές κάποιων ορόφων 20cm.

Οι διαφορές που καταγράφονται ανάμεσα στις μετακινήσεις των δύο μοντέλων είναι και σε αυτήν την ανάλυση αρκετά μεγάλες. Στο μοντέλο όπου αφήνεται 20cm κενό σε κάποιους όροφους μετά την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης οι μετακινήσεις κινούνται από 0.90cm στο αρχικό στάδιο έως 24.00cm στο τελευταίο (31) με ενδιάμεσες τιμές 7.50cm, 12.00cm, 15.00cm στα στάδια 8, 16 και 22. Ενώ από την άλλη μεριά στο βασικό μοντέλο οι μέγιστη μετακίνηση στο αντίστοιχο τελικό στάδιο (27) φτάνει τα 9.8cm.

8 Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ. 2010. Στοιχεία Γεωμηχανικής – Μηχανική Πετρωμάτων. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.
2. Σοφιανιός, Α. 2014. Υποστήριξη Υπόγειων Έργων. Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
3. Τερεζόπουλος, Ν. 2003. Μέθοδος Υπόγειων Εκμεταλλεύσεων. Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
4. Agoshkov, M., Borisov, S. & Boyarsky, V. 1988. Mining of Ores and Non-Metallic Minerals. Moscow: Mir Publishers.
5. B. H. G. Brady and E. T. Brown. ROCK MECHANICS For underground mining. Second Edition.
6. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΡΙΑ Μελετητική Α.Ε. (2011). Τεχνική Μελέτη Εκμετάλλευσης Μεταλλείου Μαύρων Πετρών, Τεχνική Εκθεση.
7. V. Chatziefstratiou. (2013). Rock mass classification and numerical modelling of the Olympias, Mine development.

9 Παράρτημα

Στο παράρτημα που ακολουθεί βρίσκονται συγκεντρωμένες κάποιες εικόνες όπως ακριβώς παρουσιάζονται ανωτέρω, με αποτελέσματα από τις αναλύσεις των μοντέλων σε διάφορα στάδια. Αρχικά, παραθέτονται εικόνες που απεικονίζουν τα παράθυρα προσδιορισμού των ιδιοτήτων - γεωτεχνικών παραμέτρων των γεωλογικών σχηματισμών που συνιστούν το περιβάλλον της εκμετάλλευσης αλλά και του υλικού λιθογόμωσης, όπως χρησιμοποιήθηκαν από το Phase2 για τον σχεδιασμό των μοντέλων και την εφαρμογή των προσομοιώσεων .

Παρουσιάζονται επίσης, εικόνες από τις αναλύσεις με τις μέγιστες μετακινήσεις σε στάδια προσομοίωσης που δεν εμφανίστηκαν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων. Τέλος στο παράρτημα περιλαμβάνονται εικόνες με τα διανύσματα παραμόρφωσης της βραχώμαζας γύρω από το μεταλλείο στα τελικά στάδια προσομοίωσης.

9.1 Ιδιότητες των Σχηματισμών

9.1.1 Μετάλλευμα

Define Material Properties

Μετάλλευμα

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): Ez (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Intact Comp. Strength (MPa): Dilation Parameter:

mb Parameter (peak): mb Parameter (resid):

s Parameter (peak): s Parameter (resid):

a Parameter (peak): a Parameter (resid):

Stage Properties Datum Dependent Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

9.1.2 Στρώμα Μαρμάρου

Define Material Properties

2. Στρώμα Μαρμάρου

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): Ez (MPa):

ν_{12} : ν_{13} : ν_{23} :

Strength Parameters

Failure Criterion: Material Type:

Intact Comp. Strength (MPa): Dilation Parameter:

mb Parameter (peak): mb Parameter (resid):

s Parameter (peak): s Parameter (resid):

a Parameter (peak): a Parameter (resid):

Stage Properties Datum Dependent Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Show only properties used in model

9.1.3 Βιοτιτικός – Αμφιβολιτικός Γνεύσιος

Define Material Properties
? ✕

- Μετάλλευμα
- Στρώμα Μαρμάρου
- Βιοτιτικός - Αμφιβολιτικός Γνεύσιος
- Λιθογόμωση
- Τεκτονικός Αμφιβολιτικός
- Παλιά εκμετάλλευση

Βιοτιτικός - Αμφιβολιτικός Γνεύσιος

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν12: ν13: ν23:

Strength Parameters

Failure Criterion: **BSI** Material Type:

Intact Comp. Strength (MPa): Dilation Parameter:

mb Parameter (peak): mb Parameter (resid):

s Parameter (peak): s Parameter (resid):

a Parameter (peak): a Parameter (resid):

Stage Properties

Datum Dependent

Unsaturated Shear Strength

Define Factors... Define Properties... Phi b: Air Entry (MPa):

Copy To...
Statistics...
 Show only properties used in model
OK
Cancel

9.1.4 Υλικό Λιθογόμωσης

Define Material Properties
? ✕

- Μετάλλευμα
- Στρώμα Μαρμάρου
- Βιοτιτικός - Αμφιβολιτικός Γνεύσιος
- Λιθογόμωση
- Τεκτονικός Αμφιβολιτικός
- Παλιά εκμετάλλευση

Λιθογόμωση

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν12: ν13: ν23:

Strength Parameters

Failure Criterion: **BSI** Material Type:

Intact Comp. Strength (MPa): Dilation Parameter:

mb Parameter (peak): mb Parameter (resid):

s Parameter (peak): s Parameter (resid):

a Parameter (peak): a Parameter (resid):

Stage Properties

Datum Dependent

Unsaturated Shear Strength

Define Factors... Define Properties... Phi b: Air Entry (MPa):

Copy To...
Statistics...
 Show only properties used in model
OK
Cancel

9.1.5 Τεκτονικός Αμφιβολίτης

? ✕

- Μετάλλευμα
- Στρώμα Μαρμάρου
- Βιοσπικός - Αμφιβολικός Γνεύ
- Λιθογώμωση
- Τεκτονικός Αμφιβολίτης
- Παλιά εκμετάλλευση

Τεκτονικός Αμφιβολίτης

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Field Stress & Body Force Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Isotropic Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν12: ν13: ν23:

Strength Parameters

Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown ⚙️ 📄 📊 Material Type: Plastic

Intact Comp. Strength (MPa): Dilation Parameter:

mb Parameter (peak): mb Parameter (resid):

s Parameter (peak): s Parameter (resid):

a Parameter (peak): a Parameter (resid):

Stage Properties
Define Factors...

Datum Dependent
Define Properties...

Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

Copy To...
Statistics...
 Show only properties used in model
 OK Cancel

9.1.6 Παλιότερες Εκμεταλλεύσεις

? ✕

- Μετάλλευμα
- Στρώμα Μαρμάρου
- Βιοσπικός - Αμφιβολικός Γνεύ
- Λιθογώμωση
- Τεκτονικός Αμφιβολίτης
- Παλιά εκμετάλλευση

Παλιά εκμετάλλευση

Name: Material Color:

Initial Element Loading: Field Stress & Body Force Unit Weight: (MN/m3):

Elastic Properties

Elastic Type: Isotropic Poisson's Ratio:

Young's Modulus (MPa): Young's Modulus (resid) (MPa):

E1 (MPa): E2 (MPa): E3 (MPa):

ν12: ν13: ν23:

Strength Parameters

Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown ⚙️ 📄 📊 Material Type: Plastic

Intact Comp. Strength (MPa): Dilation Parameter:

mb Parameter (peak): mb Parameter (resid):

s Parameter (peak): s Parameter (resid):

a Parameter (peak): a Parameter (resid):

Stage Properties
Define Factors...

Datum Dependent
Define Properties...

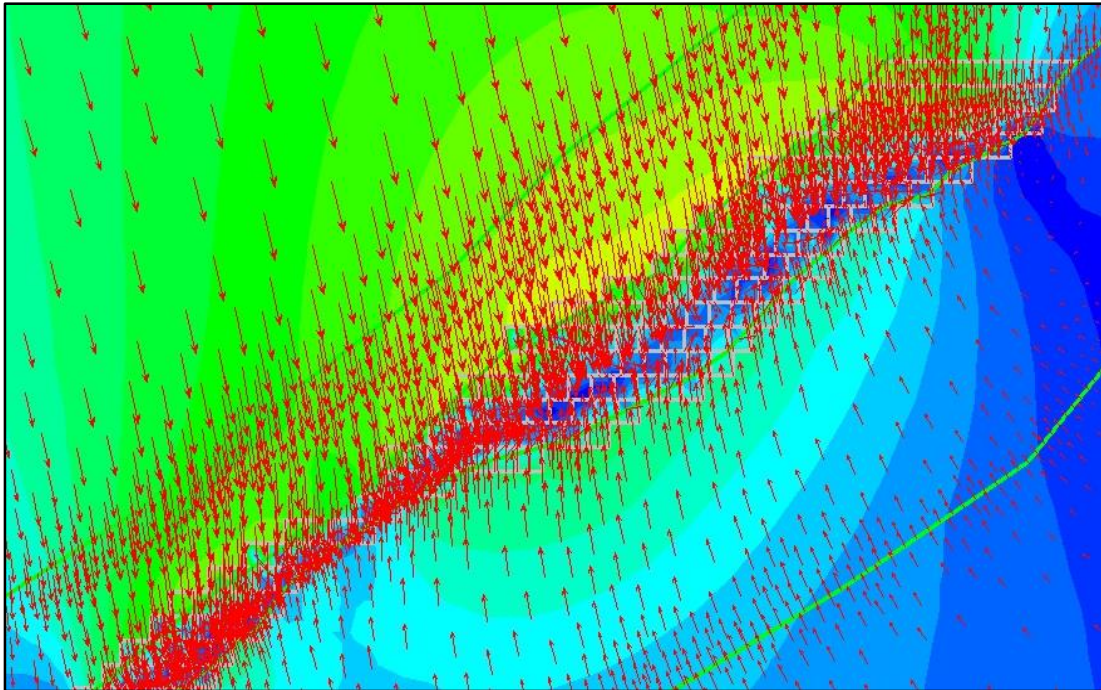
Unsaturated Shear Strength

Phi b: Air Entry (MPa):

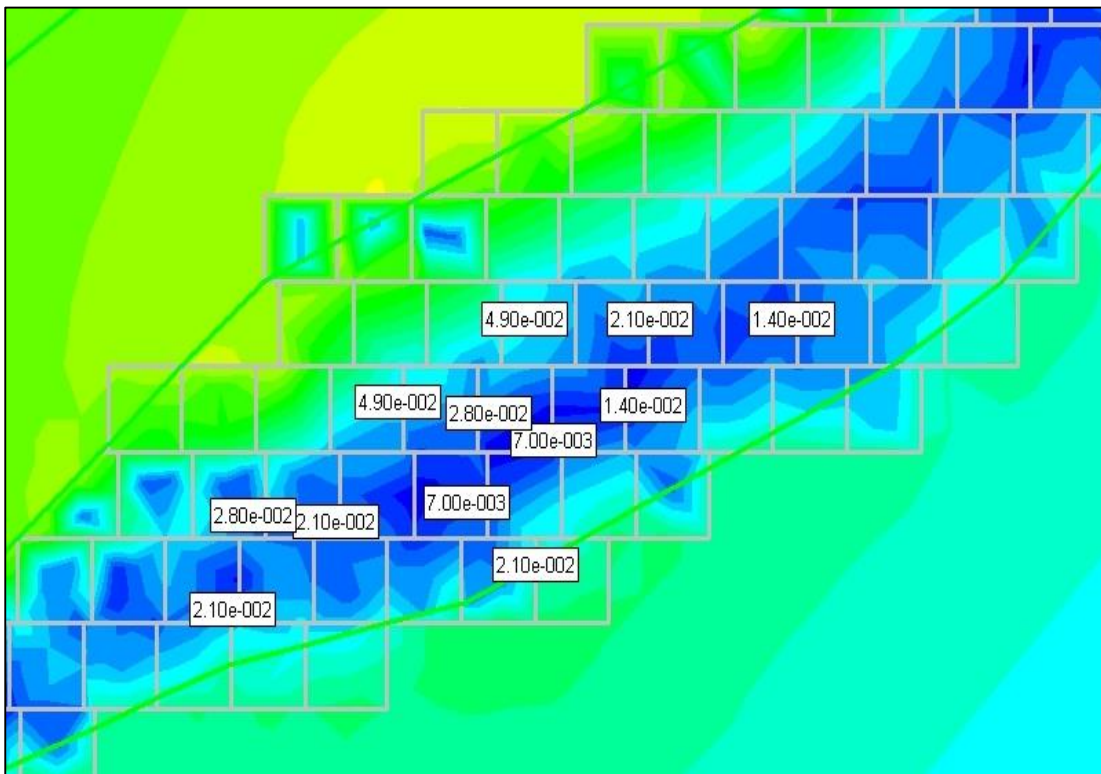
Copy To...
Statistics...
 Show only properties used in model
 OK Cancel

9.2 Συνολική Εκμετάλλευση χωρίς μέτρα υποστήριξης

9.2.1 Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (27°)

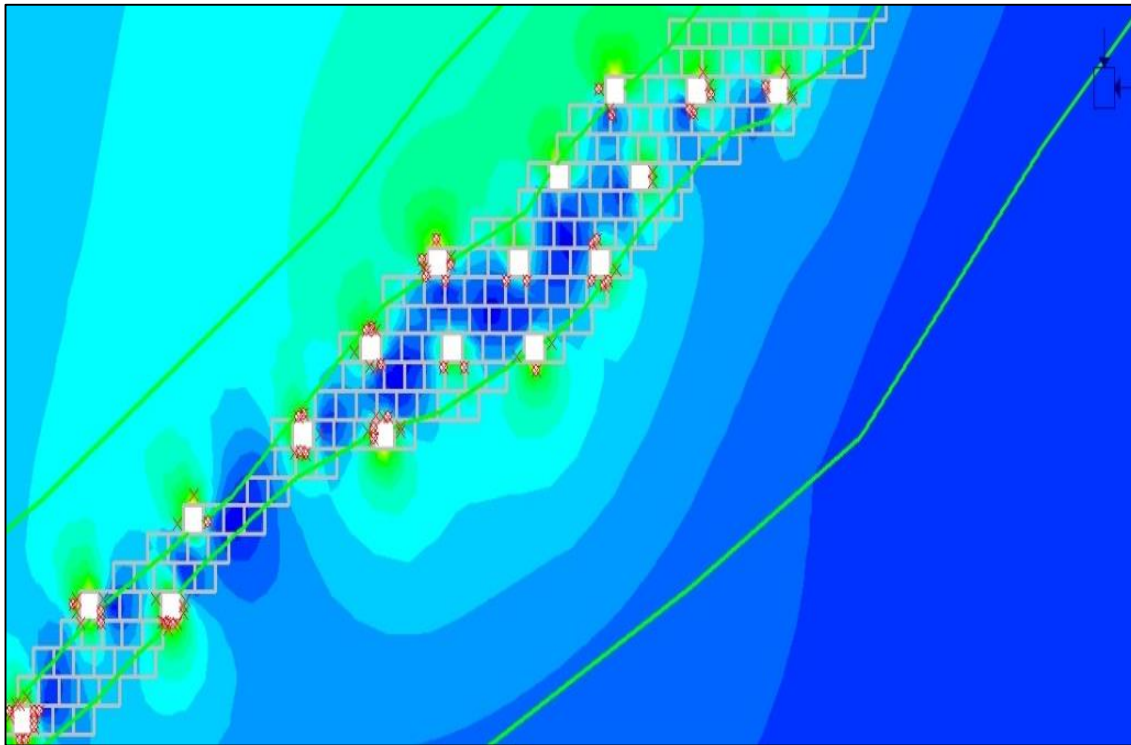


9.2.2 Συνολικές μετακινήσεις στο κέντρο της εκμετάλλευσης (27°)

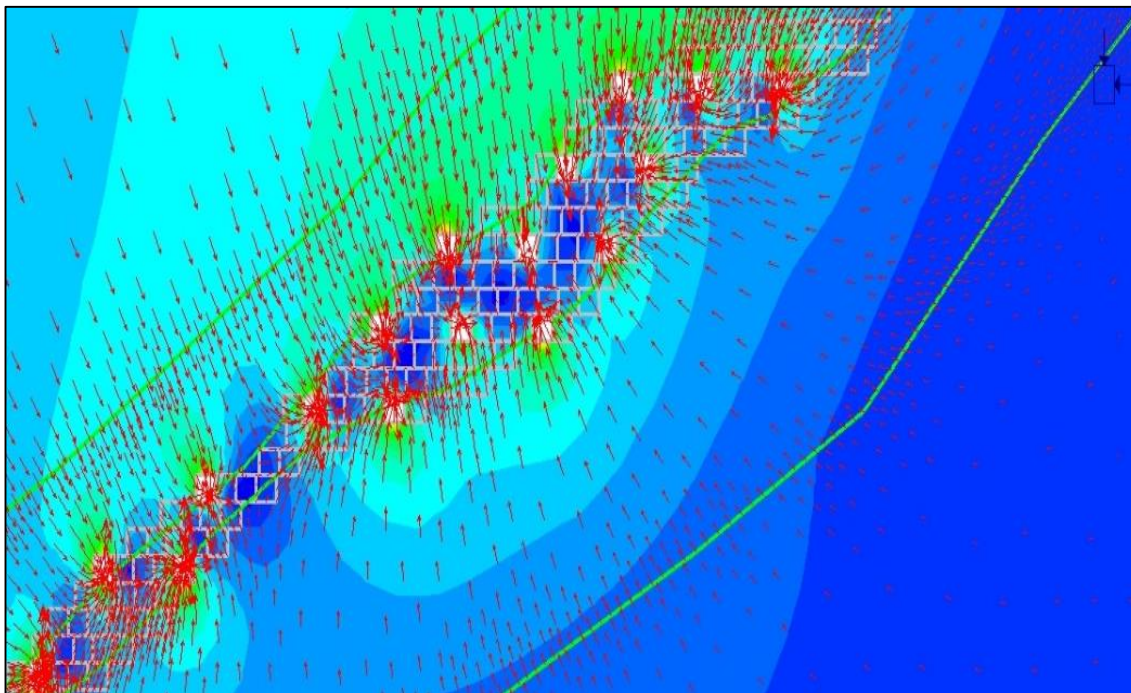


9.3 Συνολική εκμετάλλευση με μέτρα υποστήριξης

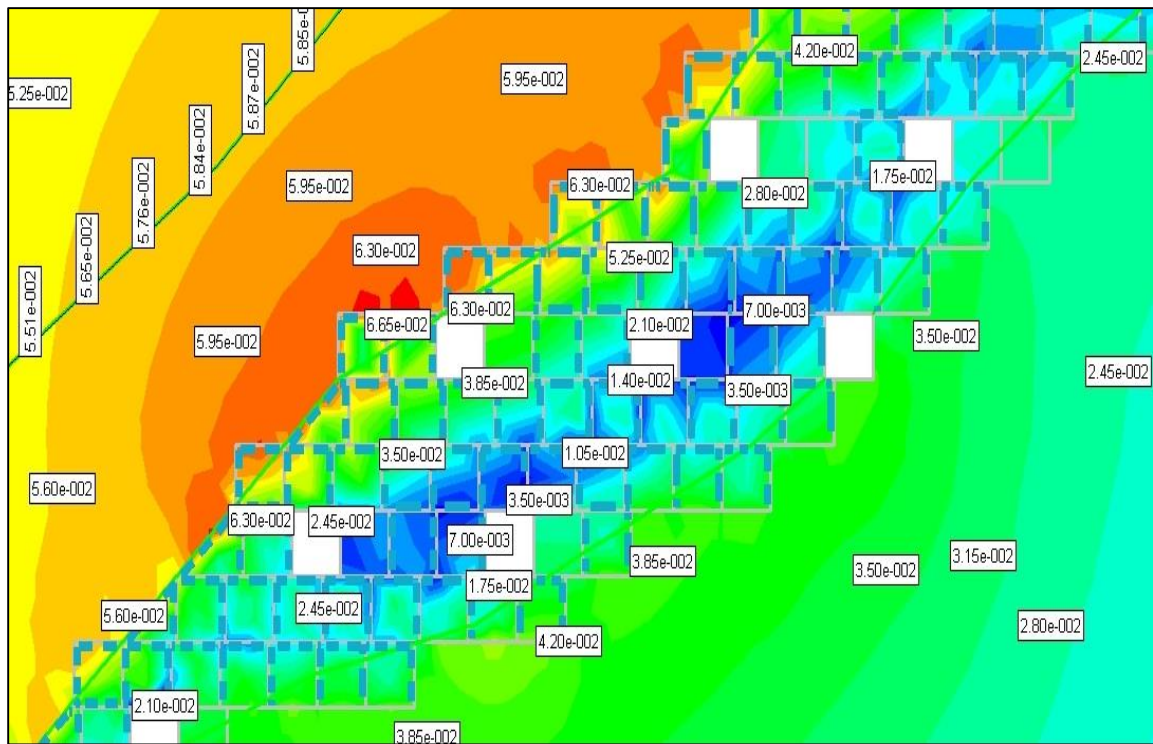
9.3.1 Στοιχεία αστοχίας στο αρχικό στάδιο (2^ο)



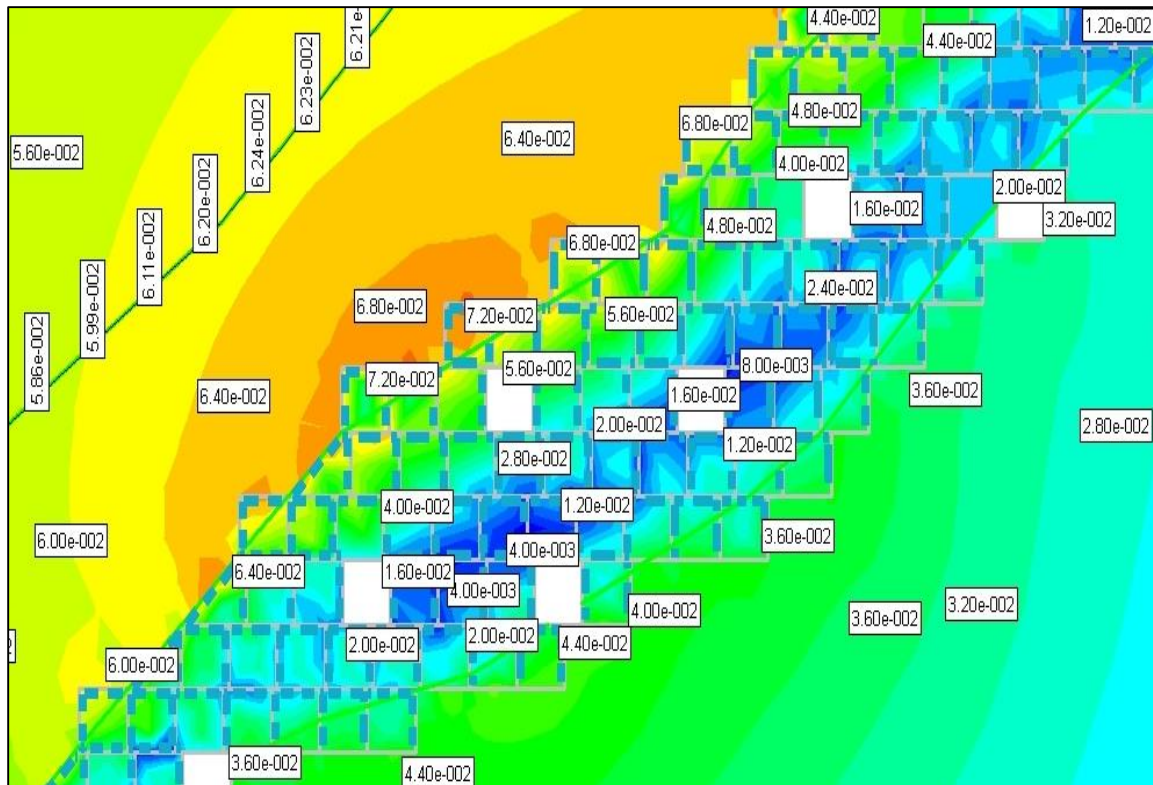
9.3.2 Διανύσματα παραμόρφωσης στο στάδιο 2ο



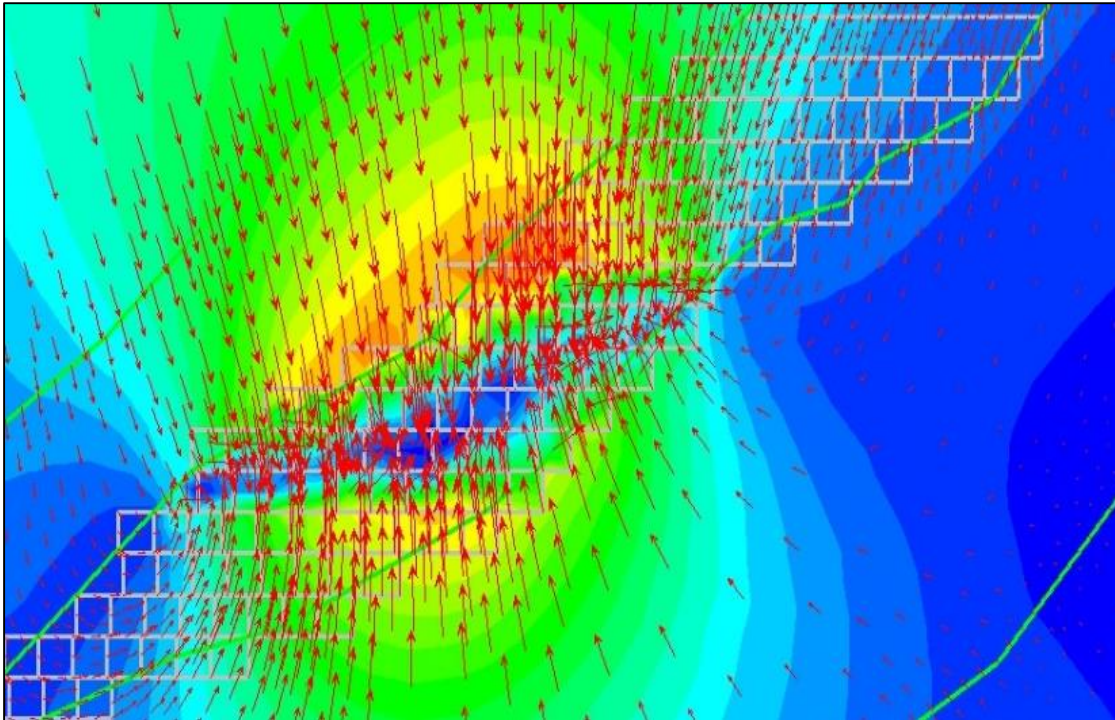
9.3.3 Συνολικές μετακινήσεις στο στάδιο 32°



9.3.4 Συνολικές μετακινήσεις στο στάδιο 35°

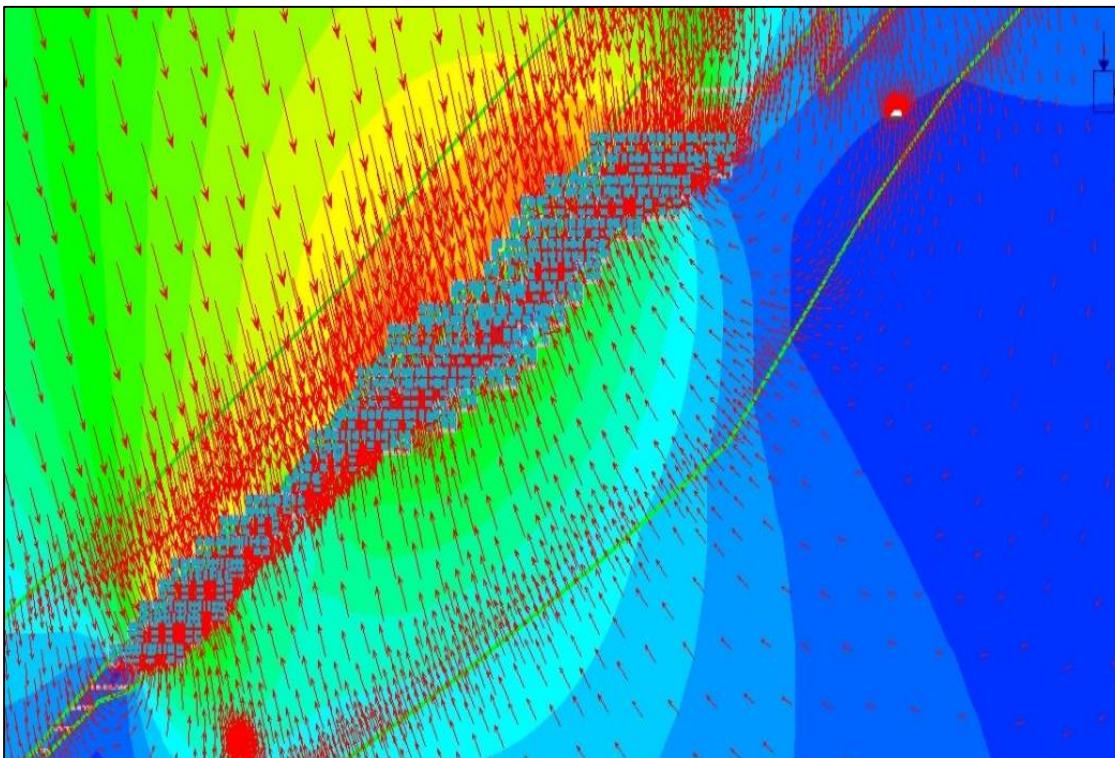


9.3.5 Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (49°)



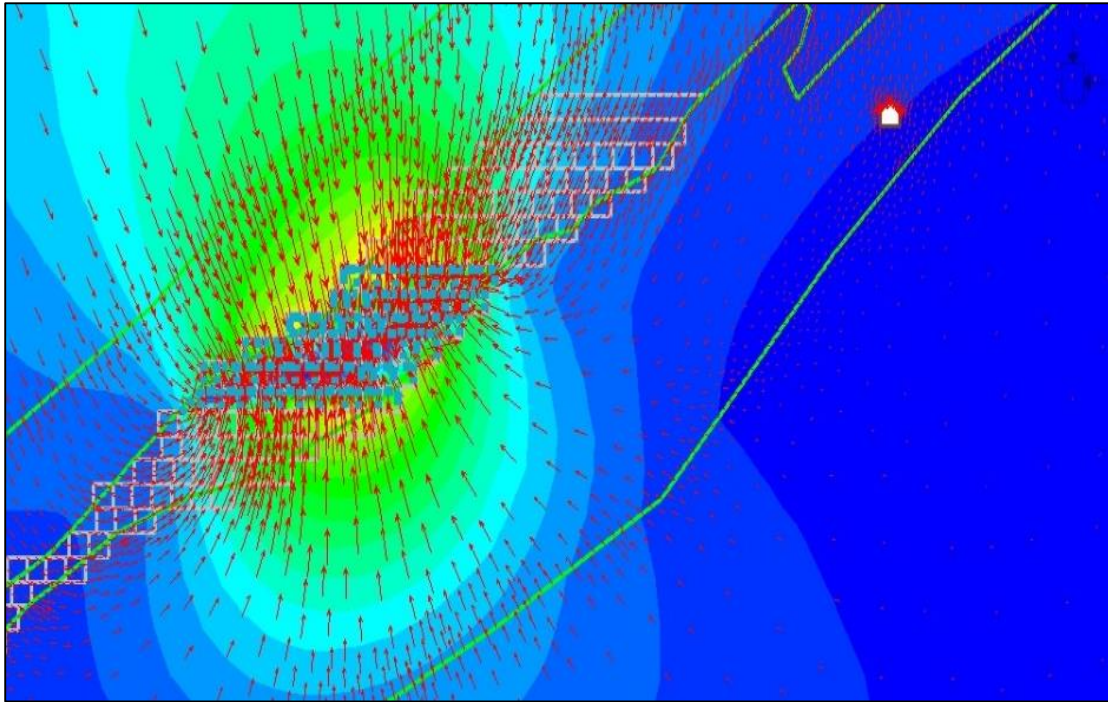
9.4 Ομάδα Ορόφων χωρίς υποστήριξη

9.4.1 Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (25°)



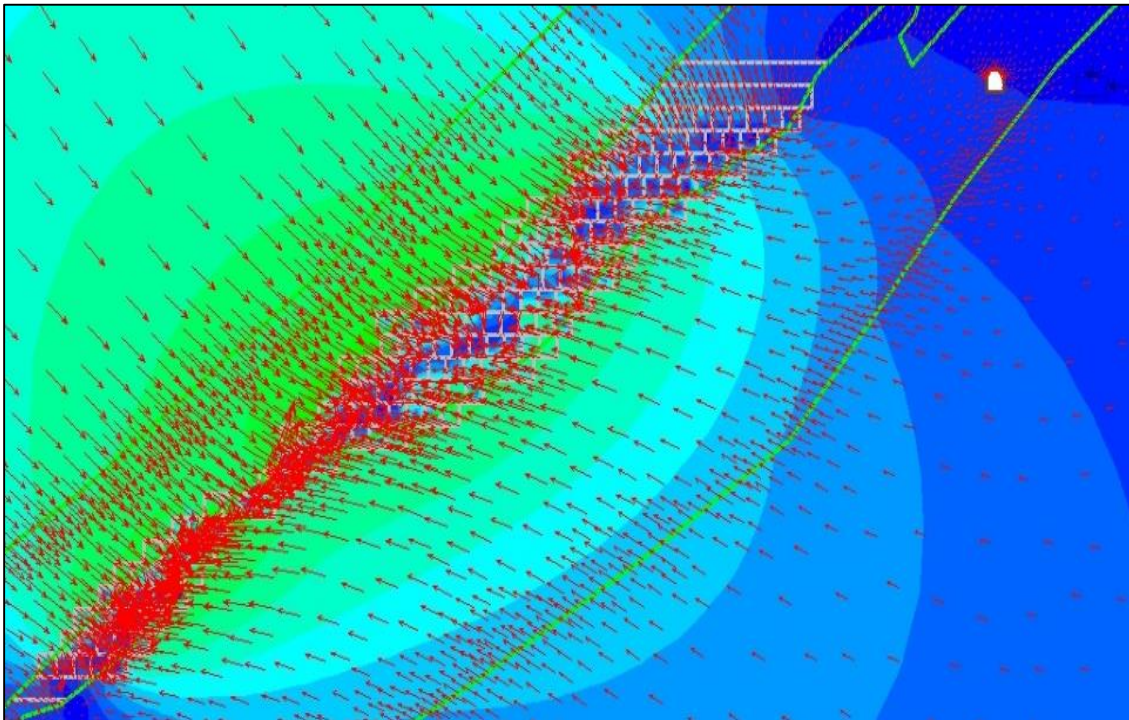
9.5 Ομάδα Ορόφων με υποστήριξη

9.5.1 Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο.



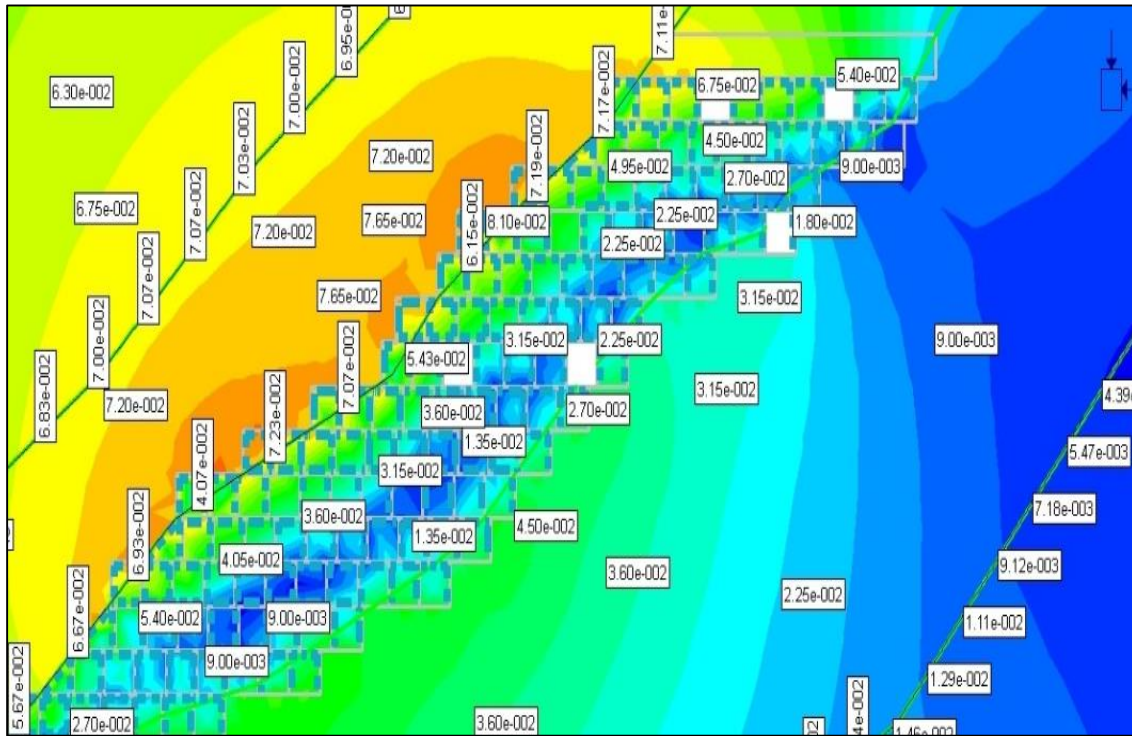
9.6 Συντελεστής k

9.6.1 Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο (27°)

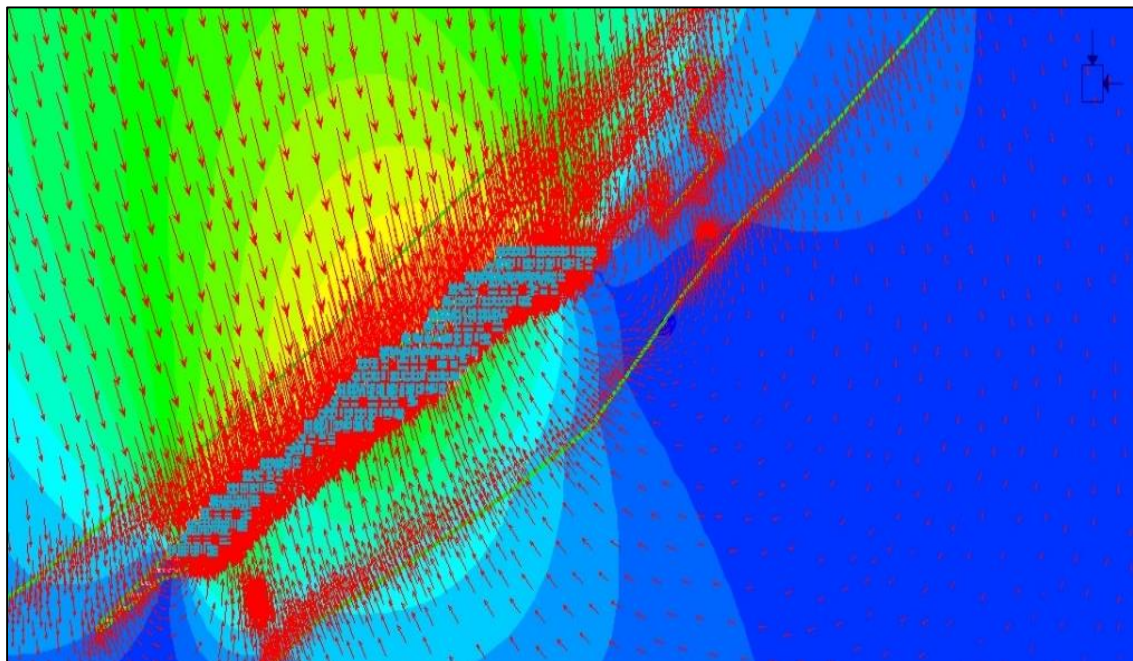


9.7 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 5cm

9.7.1 Συνολικές μετακινήσεις στο στάδιο 42°

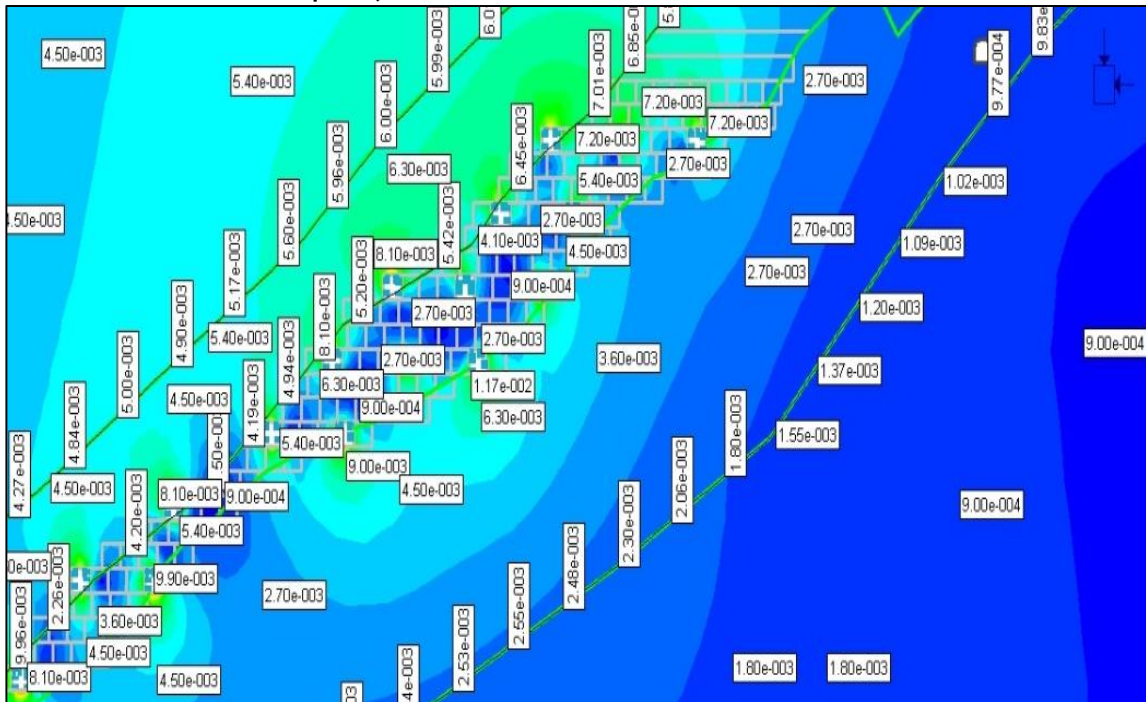


9.7.2 Διανύσματα παραμόρφωσης στο τελικό στάδιο.

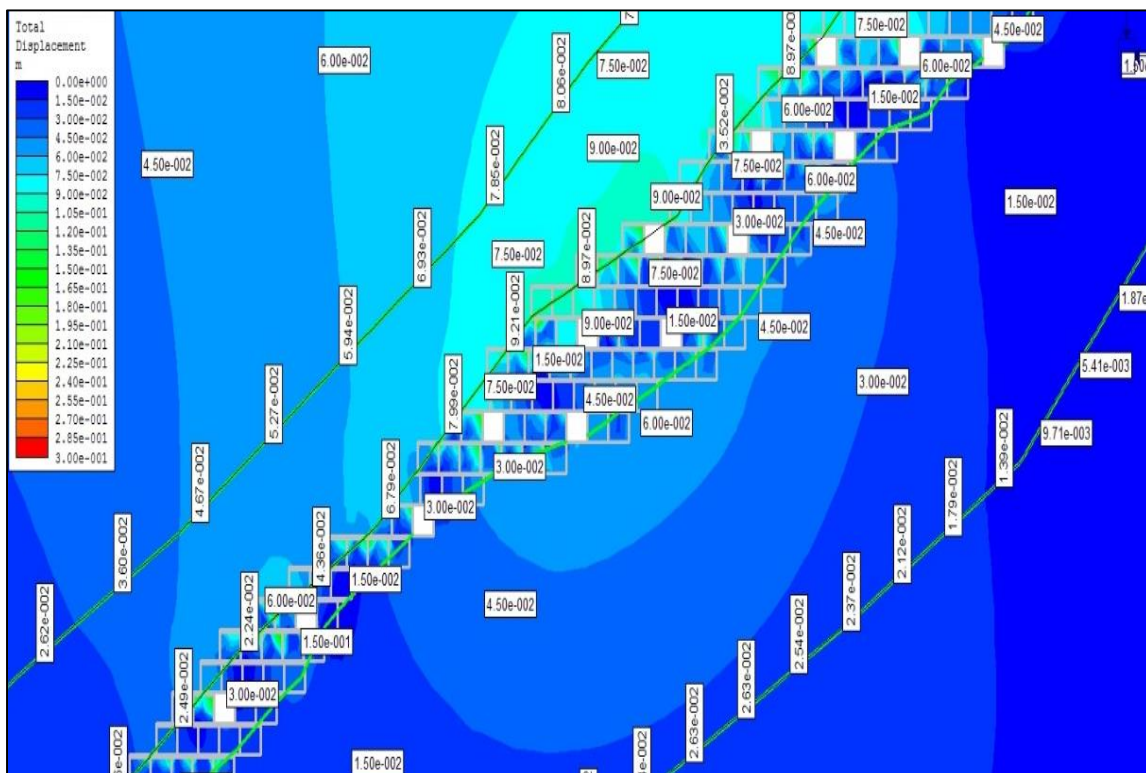


9.8 Κενό Οροφής 20cm

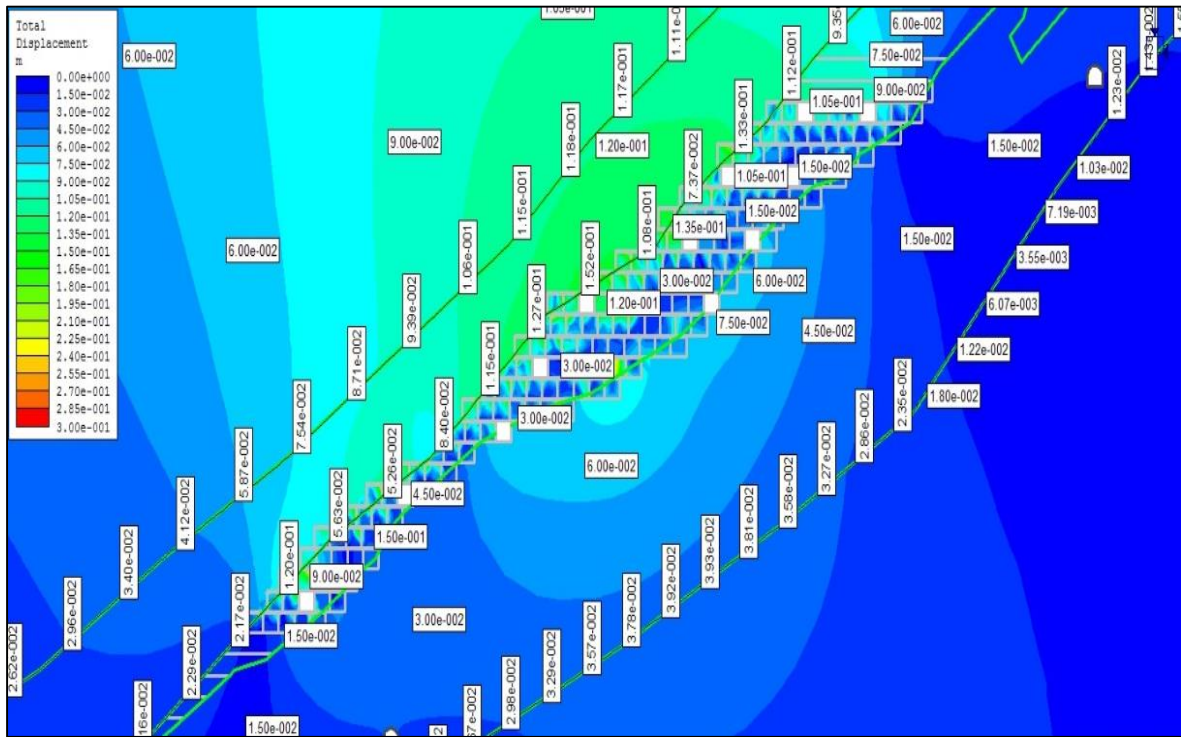
9.8.1 Μετακινήσεις στο στάδιο 3



9.8.2 Μετακινήσεις στο στάδιο 14

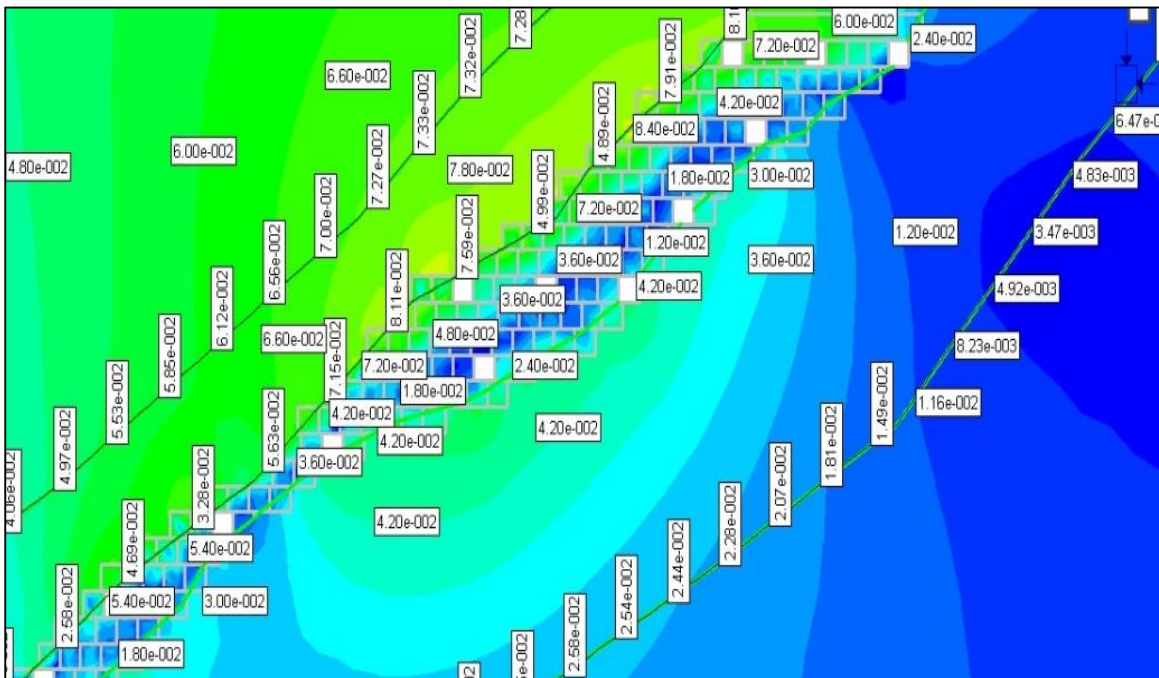


9.8.3 Μετακινήσεις στο στάδιο 22



9.9 GSI = 70

9.9.1 Μετακινήσεις στο στάδιο 22



9.10 GSI = 50

9.10.1 Μετακινήσεις στο στάδιο 22

