

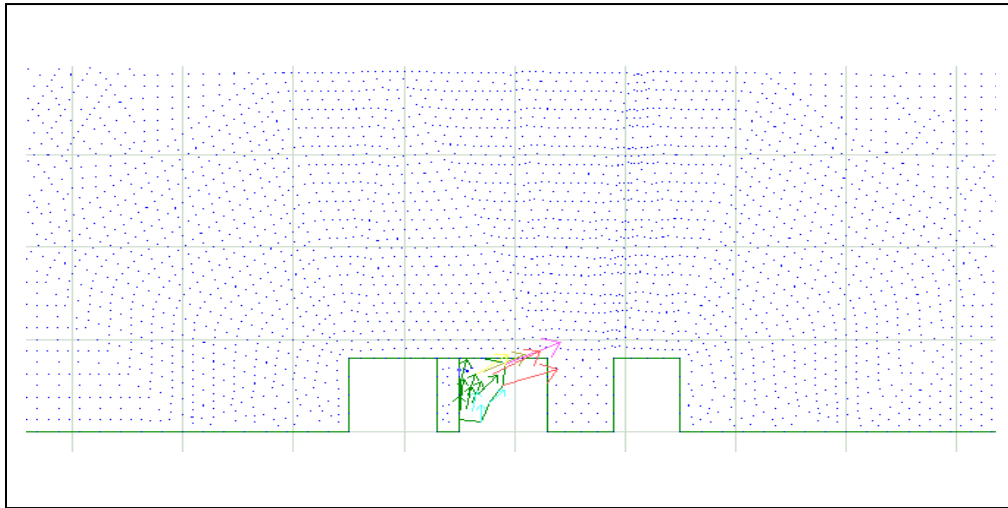


ΔΙΠΛΩΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ  
ΑΚΑΡΙΑΙΑΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΕΣ  
ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



Επιβλέπων καθηγητής: ΝΟΜΙΚΟΣ ΠΑΥΛΟΣ

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π

ΙΩΑΝΝΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΟΥ

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

## Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών « Σχεδιασμός και κατασκευή υπόγειων έργων» του ΕΜΠ.

Μελετήθηκε το φαινόμενο της ακαριαίας διάρρηξης ή έκρηξης του πετρώματος (rockburst), το οποίο αποτελεί ένα σύνθετο πλέον πρόβλημα στον τομέα της μεταλλευτικής. Πολλά ορυχεία σε μεγάλα βάθη, αλλά και βαθιές σήραγγες στον Καναδά, τη Νότια Αφρική, την Αυστραλία, τη Σουηδία, τις ΗΠΑ, την Κίνα, και ορισμένες άλλες χώρες έχουν βιώσει rockbursts σε διάφορους βαθμούς.

Είναι σοβαρό πρόβλημα όχι μόνο επειδή είναι εμπόδιο για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων σε μεγάλο βάθος, αλλά και για την ασφάλεια των εργαζομένων.

Θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νομικό Παύλο για την καθοδήγησή του και τις πολύτιμες συμβουλές του στην υλοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της ακαριαίας διάρρηξης ή έκρηξης του πετρώματος (rockburst) κατά τη διάνοιξη σιηράγγων ή μεταλλευτικών ανοιγμάτων σε μεγάλα βάθη.

Αρχικά, μελετήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση του συγκεκριμένου φαινομένου, οι μηχανισμοί με τους οποίους προκύπτει απελευθέρωση ενέργειας στο πέτρωμα, καθώς και οι κατηγορίες των τύπων rockburst. Διαπιστώνεται ότι, η απελευθέρωση αυτή συχνά σχετίζεται με δυναμικές φορτίσεις που επιβάλλονται στο πέτρωμα. Ακόμη, αναλύθηκαν οι τρόποι αντιμετώπισης, αλλά και πρόληψης του φαινομένου.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν μοντέλα προσομοίωσης στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών UDEC 5. Με τη στατική και τη δυναμική επίλυση των μοντέλων μελετήθηκαν οι παράμετροι που μπορούν να αποτελέσουν δείκτες της δυνατότητας εμφάνισης rockburst, όπως η ταχύτητα των κόμβων του μοντέλου καθώς και οι μετακινήσεις πριν και μετά την επιβολή δυναμικής φόρτισης. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην κινητική ενέργεια του συστήματος, η οποία προκύπτει ότι αυξάνεται ραγδαία κατά την εκδήλωση του φαινομένου στο αριθμητικό μοντέλο.

Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των στατικών και των δυναμικών επιλύσεων στα στάδια της ανάλυσης των διαφόρων μοντέλων.

## Abstract

In the present thesis, the phenomenon of rockburst failure of roadway and deep mines surrounding rock was studied.

Initially, the factors influencing the manifestation of this phenomenon were studied, the mechanisms which occur the energy release in the rock, as well as the categories of rockburst types. This release is related to the dynamic charges imposed on the rock. In addition, the ways of dealing with the phenomenon, as well as the ways of preventing it, were analyzed.

Then, simulation models were created in the Distinct Elements program UDEC 5. The grid velocity was studied with the static and the dynamic solution of the models. In the same way, the displacements before and after the imposition of dynamic loading were studied.

Finally, the results of static and dynamic solutions in the analysis stages of the various models are compared.

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	8
1.1 Φαινόμενο εκρηκτικής διάρρηξης του πετρώματος (rockburst) .....	8
1.2 Έρευνα σχετικά με το φαινόμενο rockburst .....	10
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικά στοιχεία.....	11
2.1 Γενικά .....	11
2.2 Φυσικό εντατικό πεδίο .....	12
2.3 Παραμόρφωση του πετρώματος.....	14
2.3 Δυναμική συμπεριφορά .....	17
2.3.1 Γενικά.....	17
2.3.2 Δυναμικά φορτία και τοπικά κύματα.....	18
Κεφάλαιο 3. Ακαριαία διάρρηξη πετρωμάτων (Rockburst).....	19
3.1 Γενικά.....	19
3.2 Κατηγορίες Rockburst.....	20
3.3 Μηχανισμός διάρρηξης.....	25
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο του rockburst .....	28
Κεφάλαιο 4. Υποστήριξη .....	29
4.1 Μηχανισμός υποστήριξης.....	29
4.2 Αρχές σχεδιασμού συστημάτων υποστήριξης .....	31
4.2.1 Αποφυγή rockburst .....	31
4.2.2 Σχεδιασμός υποστήριξης.....	32
4.2.3 Αντιμετώπιση αδύναμου σημείου .....	33
4.2.3 Ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης .....	34
4.2.4 Απλότητα.....	37
4.2.5 Κόστος και όφελος.....	37
4.2.6 Πρόβλεψη και προσαρμογή .....	39
4.3 Σχεδιασμός υποστήριξης.....	41
4.4 Ηλώσεις σε συνθήκες rockburst.....	42
4.4.1 Ήλος τμηματικής πάκτωσης .....	42
4.4.2 Συστελλόμενος ήλος.....	44
4.4.3 Διαστελλόμενος ήλος.....	46
Κεφάλαιο 5. Προσομοίωση ακαριαίας διάρρηξης με κώδικα διακριτών στοιχείων.....	48
5.1 Universal Distinct Element Code (UDEEC) .....	48
5.2 Δυναμική ανάλυση .....	49
5.2.1 Γενικά.....	49

5.2.2 Διευκρινίσεις δυναμικής μοντελοποίησης.....	49
Κεφάλαιο 6. Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας.....	51
6.1 Αριθμητική προσομοίωση .....	51
6.1.1 Στατική ανάλυση .....	53
6.1.2 Δυναμική ανάλυση .....	56
Κεφάλαιο 7. Προσομοίωση εκσκαφής με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων .....	60
7.1 Αριθμητική προσομοίωση .....	60
7.1.1 Στατική ανάλυση.....	62
7.1.2 Δυναμική ανάλυση.....	68
7.2 Αλλαγή βάθους εκσκαφής .....	73
7.2.1 Δυναμική Ανάλυση .....	74
Συμπεράσματα .....	80
Βιβλιογραφία .....	82

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Φαινόμενο rockburst (mirageoscience.com) .....	8
Εικόνα 2: Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης με το βάθος (Νομικός, 2015). .....	13
Εικόνα 3: Μεταβολή του λόγου $k$ με το βάθος (Νομικός, 2015). .....	13
Εικόνα 4: (α) Καμπύλη τάσης-τροπής για ελαστική-πλαστική συμπεριφορά, (β) Καμπύλη τάσης-τροπής για πέτρωμα με κράτυνση, τέλεια πλαστικό και χαλάρωση (Νομικός, 2015) .....	16
Εικόνα 5: Διεύθυνση διαταραχής των υλικών σημείων κατά τη διάδοση του διαμήκους και του εγκάρσιου κύματος (Νομικός, 2015). .....	18
Εικόνα 6: Strainburst σε υποστηριζόμενη εκσκαφή (Kaiser, Cai, 2012) .....	21
Εικόνα 7: Μηχανισμός strainburst ( Mazaira, Conizec, 2015) .....	21
Εικόνα 8: Pillar burst (Jones et.al, 2019) .....	22
Εικόνα 9: Μηχανισμός fault slip burst (Charlie et. Al, 2019).....	22
Εικόνα 10: Μηχανισμός fault slip burst ( Mazaira, Conizec, 2015) .....	23
Εικόνα 11: Fault slip burst σε υποστηριζόμενη εκσκαφή (Saqib, 2013) .....	24
Εικόνα 12: Μηχανισμός διάρρηξης (Hudyma, 2004) .....	25
Εικόνα 13: Μηχανισμοί διάρρηξης (Kaiser, Cai, 2012) .....	26
Εικόνα 14: Μηχανισμός διόγκωσης (a) διάδοση ρωγματώσεων (b) δημιουργία πλακών πετρώματος (c) λυγισμός πλακών και έκρηξη του πετρώματος (Qiu, Feng et.al., 2014) .....	26
Εικόνα 15: Τροχιά τεμάχους (Soto, Vertugo, 2017) .....	27
Εικόνα 16: Κατηγορίες υποστήριξης (Kaiser, Cai, 2012).....	30
Εικόνα 17: Αρχές σχεδιασμού συστημάτων υποστήριξης (Kaiser, Cai, 2012) .....	31
Εικόνα 18: Παράδειγμα αποφυγής εκδήλωσης rockburst με αλλαγή μεθόδου εκμετάλλευσης (Cai, 2013).....	32
Εικόνα 19: Αστοχία μεταξύ πλέγματος και ηλώσεων (Cai, 2013).....	33
Εικόνα 20: Βελτίωση κλίσης πλέγματος με χρήση παραμορφώσιμων ηλώσεων (Cai, 2013) .....	34
Εικόνα 21: Ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης (Cai, 2013). .....	36
Εικόνα 22: Ανάλυση κόστους- οφέλους για δυναμική υποστήριξη (Cai, 2013). .....	38
Εικόνα 23: Λειτουργία ήλου Roofex ( Σοφιανός, 2018) .....	43
Εικόνα 24: Δυναμική και συνήθης ενίσχυση (Σοφιανός, 2018).....	44
Εικόνα 25: Συστελλόμενος ήλος (Σοφιανός, 2018) .....	44
Εικόνα 26: Τοποθέτηση ήλου τριβής (Σοφιανός, 2018) .....	45
Εικόνα 27: Ήλος εντός διατρήματος (Σοφιανός, 2018) .....	46
Εικόνα 28: Διαστελλόμενος ήλος (Σοφιανός, 2018) .....	47
Εικόνα 29: Στατικό μοντέλο σήραγγας και περιβάλλον πέτρωμα.....	52
Εικόνα 30: Στατικό μοντέλο πριν την εκσκαφή. ....	53
Εικόνα 31: Στατικό μοντέλο μετά την εκσκαφή. ....	54
Εικόνα 32: Μετακινήσεις κατά των άξονα $y$ σύμφωνα με 5 σημεία παρακολούθησης.....	55
Εικόνα 33: Διαρροή πετρώματος περιμετρικά της σήραγγας. ....	55
Εικόνα 34: Δυναμικό μοντέλο μετά την επίλυση. ....	56
Εικόνα 35: Διαρροή πετρώματος.....	57
Εικόνα 36: Μετακινήσεις κατά των άξονα $y$ σύμφωνα με 5 σημεία παρακολούθησης. ....	58
Εικόνα 37: Μετακινήσεις κατά των άξονα $x$ σύμφωνα με 5 σημεία παρακολούθησης. ....	58
Εικόνα 39: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων. ....	59
Εικόνα 39: Στατικό μοντέλο στο αρχικό στάδιο επίλυσης. ....	61
Εικόνα 40: Διαρροή πετρώματος στο πρώτο στάδιο. ....	62
Εικόνα 41: Κατακόρυφες τάσεις στο πρώτο στάδιο. ....	63
Εικόνα 42: Διαρροή πετρώματος στο δεύτερο στάδιο. ....	64
Εικόνα 43: Κατακόρυφες τάσεις στο δεύτερο στάδιο.....	64

Εικόνα 44: Διαρροή πετρώματος στο τρίτο στάδιο. ....	65
Εικόνα 45: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τρίτο στάδιο. ....	66
Εικόνα 46: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τρίτο στάδιο. ....	67
Εικόνα 47: Διαρροή πετρώματος στο δεύτερο στάδιο. ....	68
Εικόνα 48: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο δεύτερο στάδιο. ....	69
Εικόνα 49: Διαρροή πετρώματος στο τρίτο στάδιο. ....	70
Εικόνα 50: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τρίτο στάδιο. ....	71
Εικόνα 51: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τρίτο στάδιο. ....	71
Εικόνα 52: Κινητική ενέργεια. ....	72
Εικόνα 53: Στατικό μοντέλο στο αρχικό στάδιο επίλυσης. ....	73
Εικόνα 54: Διαρροή πετρώματος στο δεύτερο στάδιο. ....	74
Εικόνα 55: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο δεύτερο στάδιο. ....	75
Εικόνα 56: Διαρροή πετρώματος στο τρίτο στάδιο. ....	76
Εικόνα 57: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τρίτο στάδιο. ....	76
Εικόνα 58: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τρίτο στάδιο. ....	77
Εικόνα 59: Διαρροή πετρώματος στο τέταρτο στάδιο. ....	78
Εικόνα 60: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τέταρτο στάδιο. ....	78
Εικόνα 61: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τέταρτο στάδιο. ....	79



# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1 Φαινόμενο εκρηκτικής διάρρηξης του πετρώματος (rockburst)

Καθώς οι μεταλλευτικές υπόγειες εκσκαφές προχωρούν σε μεγάλα βάθη, η αστοχία που προκαλείται από τη συγκέντρωση των τάσεων είναι αναπόφευκτη και σε ορισμένες περιπτώσεις το πέτρωμα μπορεί να αστοχήσει βίαια, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας και να προκαλέσει αστοχία με τη μορφή rockburst. Ως ακαριαία διάρρηξη ή έκρηξη πετρώματος (rockburst) ορίζεται η ανεξέλεγκτη διάρρηξη του που συνδέεται με μια βίαιη απελευθέρωση ενέργειας (Σοφιανός 2018). Η Το rockburst ως αστοχία σε μια εκσκαφή που προκύπτει με αιφνίδιο ή βίαιο τρόπο συχνά συνδέεται με ένα σεισμικό γεγονός.



Εικόνα 1: Φαινόμενο rockburst (mirageoscience.com)

Πολλά βαθιά μεταλλεία, με υπόγεια ανοίγματα σε σκληρά πετρώματα στον Καναδά, τη Νότια Αφρική, την Αυστραλία, τη Σουηδία, τις ΗΠΑ, την Κίνα, και ορισμένες άλλες χώρες έχουν βιώσει rockbursts σε διάφορους βαθμούς. Εκτός από τέτοιου είδους πετρωμάτων ορυχεία, εμπειρία σε rockbursts είχαν επίσης και ανθρακωρυχεία καθώς και βαθιές σήραγγες σε όλο τον κόσμο.

Λόγω της απρόβλεπτης και βίαιης φύσης του, το rockburst μπορεί να προκαλέσει τραυματισμούς και θανατηφόρα ατυχήματα στους εργάτες, καθώς και βλάβες του εξοπλισμού εξόρυξης. Για παράδειγμα, στις 7 Ιανουαρίου 1982, ένα rockburst τοπικού μεγέθους  $M_L = 3,2$ , Richter έπληξε το ανθρακωρυχείο Taozhuang στην επαρχία Shandong στην Κίνα, με αποτέλεσμα πέντε θανάτους, έξι τραυματισμούς και απώλεια υψηλής περιεκτικότητας μεταλλεύματος (500.000 τόνοι). Πρόσφατα στο εργοτάξιο

υδροηλεκτρικής ενέργειας Jingring-II στην Κίνα κατά την κατασκευή σήραγγας, στις 28 Νοεμβρίου 2009, συνέβη ένα σημαντικό rockburst ( $m_l = 2,6$ ), με αποτέλεσμα επτά θανάτους, ένα τραυματισμό, και καταστροφή ενός μηχανήματος TBM.

Επιπλέον, τα rockbursts μπορούν επίσης να προκαλέσουν καταστροφές σε μεγάλη απόσταση από την πηγή καθώς έχουν αναφερθεί αστοχίες σε επιφανειακά κτίρια λόγω των rockbursts που έγιναν υπόγεια. Το Rockburst είναι μία από τις κυριότερες αιτίες διακοπής της παραγωγής σε πολλά βαθιά μεταλλεία σε όλο τον κόσμο (Cai, 2013).

Μόλις ασκηθεί το δυναμικό φορτίο, κάτω από συνθήκες σεισμικού κύματος, η αστοχία του περιβάλλοντος πετρώματος θα αυξηθεί ταχέως. Τελικά, προκαλείται στιγμιαία δυναμική ανάπτυξη της θραύσης και η ενέργεια απελευθερώνεται ταχέως με τη μορφή κινητικής ενέργειας με βίαιη εκτόξευση του πετρώματος. Καθώς το πέτρωμα φτάνει στο όριο αντοχής, αναπόφευκτα θα συμβαίνουν rockburst , και η συντριπτική πλειοψηφία της ενέργειας παραμόρφωσης που συσσωρεύεται, απελευθερώνεται ξαφνικά, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει την άμεση καταστροφή του πετρώματος, ζημιές στον εξοπλισμό και ατυχήματα στο ορυχείο. Μέρος της ενέργειας θα απελευθερωθεί με τη μορφή κρουστικών κυμάτων, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν δυναμικές αστοχίες στο περιβάλλον πέτρωμα. Συγκεκριμένα, τα κρουστικά κύματα μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση και αστοχία των υπόγειων δομών σε μακρινή απόσταση. Επιπλέον, το rockburst μπορεί να προκαλέσει άμεσα ή έμμεσα σοβαρά ατυχήματα όπως έκλυση και έκρηξη αερίων και εισροή νερού.

Επειδή το φαινόμενο του rockburst σχετίζεται στενά με τη δυναμική αστάθεια του περιβάλλοντος πετρώματος, σε κατάσταση υψηλής συγκέντρωσης τάσης, η στατική πίεση σε συνδυασμό με την δυναμική ανάλυση χρησιμοποιείται εκτενώς για να αποκαλύψει το μηχανισμό και τους παράγοντες επιρροής της αστοχίας του πετρώματος.

## 1.2 Έρευνα σχετικά με το φαινόμενο rockburst

Έχουν διεξαχθεί εκτεταμένες έρευνες για το φαινόμενο rockburst στη Νότιο Αφρική, τον Καναδά, την Αυστραλία και ορισμένες άλλες χώρες, έτσι ώστε να ληφθούν τεχνικά μέτρα για τον περιορισμό της επίδρασης του κινδύνου από την καταστροφική αυτή συμπεριφορά.

Μία από τις πιο ολοκληρωμένες ερευνητικές μελέτες σχετικά με το rockburst έλαβε χώρα στον Καναδά από το 1990 έως το 1995 και οδήγησε τελικά στη δημοσίευση του Canadian Rockburst Support Handbook.

Ένα μεγάλος αριθμός ερευνών έχει διεξαχθεί με αριθμητικές μεθόδους προσομοίωσης. Για παράδειγμα, οι Qin και Mao προσομοιώνουν το rockburst που προκλήθηκε από σεισμικό κύμα και αναλύθηκε η επίδραση του βάθους και του σεισμικού κύματος χρησιμοποιώντας το λογισμικό UDEC.

Ο Gao διαπίστωσε ότι ο δείκτης εξασθένησης της ενέργειας  $\eta$  ήταν σημαντικά μικρός στα πετρώματα, αλλά προφανώς πολύ μεγαλύτερος στα ασθενέστερα μαλακά εδάφη. Σύμφωνα με το νόμο της μικρομηχανικής της αστοχίας του πετρώματος, οι Grady και Kipp μελέτησαν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των κρουστικών κυμάτων σε ψαμμίτη και υλιόλιθο. Ο Li πρότεινε πειραματικά ότι η διάδοση του κρουστικού κύματος θα αντανάκλαται, θα διαθλάται και θα απορροφάται από τις ασυνέχειες της βραχομάζας. Ο Brown παρουσίασε μεθόδους για τη μοντελοποίηση των ασυνεχειών και την επίδρασή τους στο πέτρωμα. Οι ασυνέχειες αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα του επί τούτου πετρώματος. Ο Nakagawa διαπίστωσε ότι η αντανάκλαση του κύματος συμβαίνει όταν το P-κύμα ή το S-κύμα προσπίπτει κάθετα σε ασυνέχεια που υποβάλλεται σε διατμητική ολίσθηση. Οι Pyrak-Nolte και Nolte πραγματοποίησαν ανάλυση κυματομορφών στα πειραματικά αποτελέσματα διάδοσης του κύματος κατά μήκος μίας ασυνέχειας. Ο Gao αποκάλυψε ότι η διατμητική αστοχία, και όχι η αστοχία εφελκυσμού, είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας στα στρώματα πάνω από την εξορυσσόμενη περιοχή χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο UDEC.

Πολυετείς έρευνες σεισμικότητας ορυχείων έχουν πραγματοποιηθεί στην Αυστραλία και ένα εργαλείο που ονομάζεται MS-RAP (Mine Seismicity Risk Analysis Program) έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται από τη μεταλλευτική βιομηχανία. Το Διεθνές Συνέδριο σχετικά με το Rockburst και τη σεισμικότητα στα ορυχεία (RaSim) ήταν ένας θεσμός ανταλλαγής ιδεών και συζήτησης για λύσεις μηχανικής από το 1982. Αυτές οι συλλογικές προσπάθειες έχουν βελτιώσει σημαντικά την κατανόησή του rockburst (Cai, 2013).

## Κεφάλαιο 2. Θεωρητικά στοιχεία

### 2.1 Γενικά

Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας είναι το βασικό θέμα που καλείται να αντιμετωπίσει η μηχανική πετρωμάτων ύστερα από την όρυξη ενός ανοίγματος, είτε αυτό είναι μία υπόγεια εκμετάλλευση κοιτάσματος, είτε η διάνοιξη ενός τεχνικού έργου.

Η όρυξη ενός ανοίγματος στη μάζα του πετρώματος επιφέρει τη μεταβολή του εντατικού πεδίου του αδιατάρακτου πετρώματος, λόγω της ανακατανομής των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, με σκοπό την αποκατάσταση της στατικής ισορροπίας του συστήματος. Οι επί τόπου τάσεις διακρίνονται σε αρχικές και παραμένουσες λόγω της διαταραχής του εντατικού πεδίου. Στις αρχικές τάσεις εμπεριέχονται οι βαρυτικές τάσεις, που οφείλονται στη δράση του πεδίου βαρύτητας, οι τεκτονικές τάσεις, που οφείλονται σε τεκτονικές δυνάμεις καθώς και τις παραμένουσες τάσεις, που μπορούν να δημιουργηθούν λόγω φυσικών ή/και χημικών διεργασιών.

Το άνοιγμα, λόγω του μικρού μεγέθους του σε σχέση με την επιφάνεια της Γης, θεωρείται ότι γίνεται σε άπειρης έκτασης μέσο και η διατομή μπορεί να παρασταθεί με ένα απλό γεωμετρικό σχήμα (π.χ. κύκλο, έλλειψη κλπ) (Αγιουτάντης, 2010).

## 2.2 Φυσικό εντατικό πεδίο

Η γνώση του φυσικού εντατικού πεδίου είναι καθοριστικής σημασίας για τις υπόγειες εκσκαφές. Οι τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου μεταβάλλονται συναρτήσει του βάθους. Η μεταβολή αυτή δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο, αλλά καθορίζονται από παράγοντες όπως η τοπογραφία, οι τεκτονικές δυνάμεις, η καταστατική συμπεριφορά του πετρώματος και η τοπική γεωλογική ιστορία.

Ως φυσικό ή πρωτογενές εντατικό πεδίο νοείται η εντατική κατάσταση που επικρατεί στο πέτρωμα πριν από οποιαδήποτε τεχνητή διατάραξη όπως η διάνοιξη μίας υπόγειας εκσκαφής. Είναι το αποτέλεσμα των διαφόρων γεγονότων της γεωλογικής ιστορίας του πετρώματος, όπως και της δράσης των παλαιότερων εντατικών καταστάσεων.

Το επιτόπου εντατικό πεδίο οφείλεται κυρίως σε τρεις βασικούς παράγοντες, το βάρος των υπερκείμενων πετρωμάτων, τις σύγχρονες τεκτονικές δυνάμεις και τις τεκτονικές δυνάμεις του παρελθόντος.

Η εντατική κατάσταση λόγω του βάρους των υπερκείμενων πετρωμάτων αναφέρεται ως τάση βαρύτητας ή αλλιώς πίεση υπερκείμενων. Αυξάνεται με το βάθος και επηρεάζεται από την τοπογραφία. Οι τεκτονικές τάσεις προκαλούνται από δυνάμεις που επιβάλλονται από την ενεργό τεκτονική ή από τεκτονικά γεγονότα του παρελθόντος, στα οποία οφείλονται οι υπολειμματικές τάσεις. Ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται για όλες τις τάσεις που παραμένουν στο πέτρωμα ακόμη και μετά την απομάκρυνση του μηχανισμού που τις προκάλεσε. Οι ενεργές τεκτονικές τάσεις υποδιαιρούνται ανάλογα με την περιοχή στην οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτές παραμένουν σταθερές.

Οι τάσεις βαρύτητας μπορεί να εκτιμηθούν εφόσον θεωρηθεί η περίπτωση μιας ελεύθερης επιφάνειας χωρίς εξωτερική φόρτιση. Οι διατμητικές συνιστώσες του ελκυστή στην επιφάνεια είναι μηδενικές και η διεύθυνση της καθέτου στην επιφάνεια είναι μία κύρια διεύθυνση. Ως εκ τούτου σε περιοχές με επίπεδη μορφολογία η μία από τις κύριες διευθύνσεις είναι η κατακόρυφη.

Η απλούστερη υπόθεση είναι ότι η θλιπτική κατακόρυφη ορθή τάση σε οποιοδήποτε βάθος από την επιφάνεια αντιστοιχεί στο βάρος των υπερκείμενων πετρωμάτων.

$$\sigma_{zz} = \sigma_v = \rho \times g \times z \quad (1.1)$$

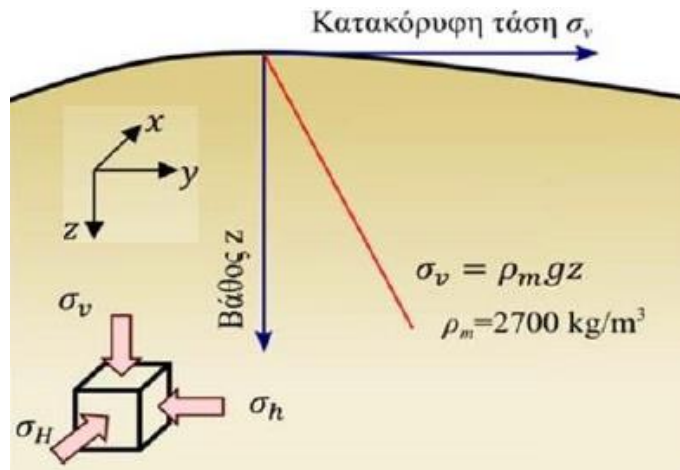
Όπου:

$z$  το βάθος

$\rho$  η μέση πυκνότητα των υπερκείμενων πετρωμάτων

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας

Επιτόπου μετρήσεις για την εκτίμηση του φυσικού εντατικού πεδίου, όπως παρουσιάζονται από τους Hoek & Brown τείνουν να επιβεβαιώσουν την εξίσωση με μέση πυκνότητα του πετρώματος  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ .



Εικόνα 2: Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης με το βάθος (Νομικός, 2015).

Γενικά, το πλήρες εντατικό πεδίο μπορεί να διατυπωθεί από την ακόλουθη μορφή:

$$\sigma_{zz} = \sigma_v = \rho \times g \times z \quad (1.2)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_h = k \times \sigma_v \quad (1.3)$$

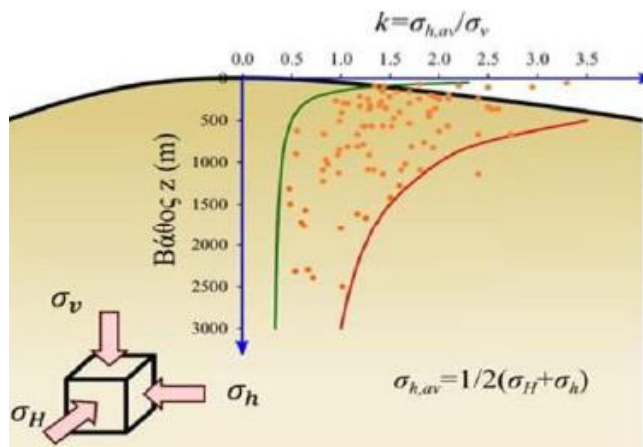
Όπου:

k ο συντελεστής πλευρικής τάσης

Συνήθως, με k συμβολίζεται ο λόγος της μέσης οριζόντιας τάσης προς την κατακόρυφη τάση:

$$k = \frac{\sigma_{h,av}}{\sigma_v} = \frac{(\sigma_H + \sigma_h)/2}{\sigma_v} \quad (1.4)$$

Μετρήσεις των οριζόντιων τάσεων σε περιοχές τεχνικών και μεταλλευτικών έργων δείχνουν ότι ο λόγος k τείνει να λάβει υψηλές τιμές σε μικρά βάθη και μειώνεται με την αύξηση του βάθους. Σε βάθη μικρότερα των 300 m ο k λαμβάνει τιμές από k=1 έως k= 4. Σε μεγαλύτερα βάθη το εύρος αυτό περιορίζεται σημαντικά και σε βάθη μεγαλύτερα των 2 km αποκτά τιμές μικρότερες της μονάδας. (Νομικός, 2015)



Εικόνα 3: Μεταβολή του λόγου k με το βάθος (Νομικός, 2015).

## 2.3 Παραμόρφωση του πετρώματος

Η εφαρμογή δυνάμεων στα πετρώματα προκαλεί παραμόρφωση, η οποία μπορεί να ορισθεί ως η μεταβολή της σχετικής θέσης των σημείων του πετρώματος. Η μετατόπιση είναι το διάνυσμα που εκφράζει τη μεταβολή σε σχέση με κάποιο σύστημα συντεταγμένων στην αρχική κατάσταση. Γενικά, η μετατόπιση μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του υλικού σημείου. Η ανάλυση των μετατοπίσεων έχει ως στόχο τον υπολογισμό του διανύσματος της μετατόπισης σε κάθε σημείο μέσα στο πέτρωμα.

Οι τροπές είναι το αποτέλεσμα της εντατικής κατάστασης και ο τρόπος με τον οποίο σχετίζονται η τάση και η τροπή αποτελεί την καταστατική συμπεριφορά του πετρώματος. Για τα πετρώματα έχουν αναπτυχθεί διάφορα εξιδανικευμένα καταστατικά μοντέλα στη βάση των θεωριών ελαστικότητας, πλαστικότητας και ιξώδους συμπεριφοράς, καθώς και συνδυασμών τους. Για κάθε καταστατικό μοντέλο, η τάση και η τροπή ή άλλες ποσότητες παραγόμενες από αυτές (π.χ. ρυθμός τάσης ή τροπής), σχετίζονται μέσω ενός συνόλου καταστατικών εξισώσεων.

Η ελαστικότητα αποτελεί τη συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη καταστατική συμπεριφορά για πολλά πετρώματα, και αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη περισσότερο πολύπλοκων καταστατικών σχέσεων. Στην ελαστική συμπεριφορά η παραμόρφωση του πετρώματος είναι ανεξάρτητη από τον χρόνο. Ωστόσο, υπό ορισμένες συνθήκες, ένα πέτρωμα που παραμορφώνεται βραδέως υπό την επίδραση διατμητικών τάσεων μπορεί να θεωρηθεί, τουλάχιστον εν μέρει, ως ένα ιξώδες ρευστό, για το οποίο ο ρυθμός μεταβολής της διατμητικής τροπής με τον χρόνο συνδέεται με τη διατμητική τάση με τη σχέση:

$$\tau = \eta \times \dot{\gamma}' \quad (1.5)$$

Όπου:

$\eta$  το δυναμικό ιξώδες (viscosity)

Ο τόνος επάνω από το σύμβολο της διατμητικής τροπής συμβολίζει τον ρυθμό μεταβολής ως προς το χρόνο. Οι μονάδες του ιξώδους είναι Pa·sec (ή kg·m<sup>-1</sup>·sec<sup>-1</sup>). Σύμφωνα με την εξίσωση(1.2), για τα ιξώδη ρευστά η τάση είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της τροπής και συνεπώς, η παραμόρφωση είναι εξαρτώμενη από τον χρόνο.

Τα περισσότερα πετρώματα, όταν φορτίζονται, εμφανίζουν τόσο στιγμιαία όσο και χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση και ως εκ τούτου αναφέρονται ως ιξωδοελαστικά (viscoelastic). Η ροϊκή τους συμπεριφορά περιγράφεται συνδυάζοντας απλουστευμένα ελαστικά και ιξώδη μηχανικά ανάλογα και παράγοντας μαθηματικά μοντέλα.

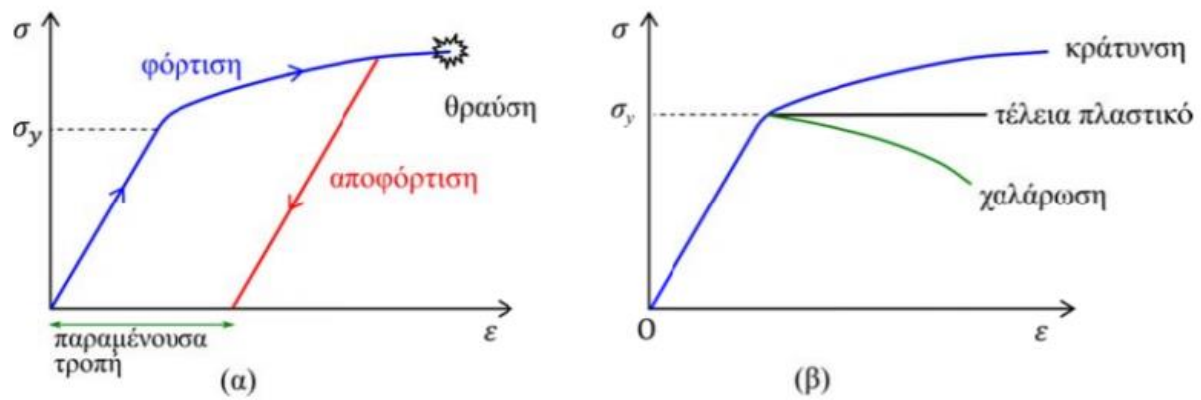
Η χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση των πετρωμάτων ερμηνεύεται από διάφορους μηχανισμούς, οι οποίοι δρουν στη μικροκλίμακα της δομής του πετρώματος. Οι μηχανισμοί αυτοί σχετίζονται τόσο με την ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος όσο και με την κρυσταλλική του δομή και διαφέρουν ανάλογα με το πέτρωμα και με τις συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας και άλλων εξωγενών παραγόντων. Στα σκληρά ψαθυρά πετρώματα με χαμηλό πορώδες ως κύριος μηχανισμός έχει προταθεί η αλληλεπίδραση και επέκταση μικρορωγμών. Η διαδικασία αυτή σταθεροποιείται

καταλήγοντας σε μηδενικούς ρυθμούς παραμόρφωσης είτε επιταχύνεται, οδηγώντας τελικά το πέτρωμα σε θραύση.

Κατά την ιξώδη συμπεριφορά η παραμόρφωση του πετρώματος είναι μόνιμη και μη ανακτήσιμη με την απομάκρυνση της φόρτισης. Για να προκληθεί μόνιμη παραμόρφωση στα πετρώματα απαιτείται η εφαρμογή τάσης μεγαλύτερης το όριο ελαστικότητας ή αλλιώς τάσης διαρροής. Πέρα από την τάση διαρροής συμβαίνει μόνιμη ή αλλιώς πλαστική παραμόρφωση του πετρώματος. Με την απομάκρυνση της φόρτισης η ελαστική παραμόρφωση ανακτάται ενώ η πλαστική όχι. Απαραίτητη προϋπόθεση για να προκύψει πλαστική παραμόρφωση είναι η διατήρηση της συνέχειας του πετρώματος, δηλαδή το πέτρωμα να μην εμφανίζει μακροσκοπική θραύση στην κλίμακα της παρατήρησης. Η πλαστική παραμόρφωση συνδέεται με μηχανισμούς στη μικροκλίμακα, όπως πλεγματικές εκτοπίσεις ή διδυμίες. Εάν η μόνιμη παραμόρφωση συμβαίνει με την επίτευξη της τάσης διαρροής και υπό σταθερή τάση, τότε η συμπεριφορά του πετρώματος λέγεται τέλεια πλαστική. Τα πετρώματα γενικά δε συμπεριφέρονται ως τέλεια πλαστικά υλικά κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Εάν για την αύξηση της τροπής απαιτείται η αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης, τότε το φαινόμενο καλείται σκλήρυνση ή αλλιώς κρατυνόμενη συμπεριφορά. Το φαινόμενο της σκλήρυνσης στα πετρώματα έχει εξηγηθεί με τη θεώρηση της παραμόρφωσης του πλέγματος των κρυστάλλων και συγκεκριμένα με τον σχηματισμό και τη διάδοση των πλεγματικών εκτοπίσεων.

Το φαινόμενο της αποσκλήρυνσης ή χαλάρωσης (strain softening) αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου απαιτείται μικρότερη τάση για την αύξηση της τροπής. Η αποσκλήρυνση έχει εξηγηθεί από την επίδραση της μείωσης του μεγέθους των κόκκων κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης, που καθιστά τους μηχανισμούς παραμόρφωσης, όπως την ολίσθηση στα όρια των κόκκων, πιο δραστηρούς, λόγω της αύξησης της επιφάνειας του κόκκου. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε χαλάρωση είναι η ανακρυστάλλωση σε νέα και ασθενέστερα ορυκτά, η επίδραση της παρουσίας ρευστών στους πόρους και η αύξηση της θερμοκρασίας. Τα πετρώματα παρουσιάζουν πολύπλοκη ροϊκή συμπεριφορά και γενικά δεν είναι αμιγώς ελαστικά, ιξώδη ή πλαστικά. Εξάλλου, όπως ήδη αναφέρθηκε, στις συνήθεις θερμοκρασίες και πιέσεις συμπεριφέρονται ως ψαθυρά υλικά. Ως εκ τούτου, η περιγραφή της συμπεριφοράς του πετρώματος απαιτεί τον συνδυασμό των εξιδανικευμένων μοντέλων παραμόρφωσης, μαζί με τη θεώρηση της ψαθυρής του συμπεριφοράς (Νομικός, 2015).





Εικόνα 4: (α) Καμπύλη τάσης-τροπής για ελαστική-πλαστική συμπεριφορά, (β) Καμπύλη τάσης-τροπής για πέτρωμα με κράτωση, τέλεια πλαστικό και χαλάρωση (Νομικός, 2015)

## 2.3 Δυναμική συμπεριφορά

### 2.3.1 Γενικά

Στην ελαστική περιοχή η παραμόρφωση του πετρώματος είναι ανάλογη της τάσης και συνεπώς ο ρυθμός παραμόρφωσης, που μπορεί να ορισθεί ως ο ρυθμός μεταβολής της αξονικής τροπής ως προς τον χρόνο ( $de_a/dt$ ), είναι επίσης σταθερός. Σε άλλες περιπτώσεις ο ρυθμός της αξονικής ή της διαμετρικής τροπής είναι αυτός, ο οποίος διατηρείται σταθερός κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ανεξάρτητα από τον τρόπο ελέγχου της εκτέλεσης της δοκιμής, οι πειραματικές παρατηρήσεις δείχνουν μία συνεχή αύξηση της θλιπτικής αντοχής του πετρώματος καθώς αυξάνεται ο ρυθμός της φόρτισης. Στη φύση τα πετρώματα μπορεί να υποβάλλονται σε ρυθμούς φόρτισης, που διαφέρουν μεταξύ τους αρκετές τάξεις μεγέθους από  $10^{-16} \text{ s}^{-1}$  ή λιγότερο κατά τις γεωλογικές διεργασίες μέχρι και  $10^3 \text{ s}^{-1}$  ή περισσότερο κατά τη φόρτιση του πετρώματος σε μία ανατίναξη. Μεταξύ αυτών των δύο ακραίων καταστάσεων μεσολαβούν 19 τάξεις μεγέθους του ρυθμού μεταβολής της τροπής. Συνεπώς, εάν το πέτρωμα παρουσιάζει χρονικά εξαρτημένη μηχανική συμπεριφορά, οι δύο ακραίες καταστάσεις δεν θα αντιπροσωπεύονται από τις ίδιες παραμέτρους αντοχής (Tang & Hudson 2011).

Δυναμική συμπεριφορά του πετρώματος καλείται η απόκρισή του σε δυναμικές εντατικές καταστάσεις, όπου ο αυξημένος ρυθμός φόρτισης προκαλεί μεταβολή στη μηχανική του συμπεριφορά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διαφορετική μορφή αστοχίας του πετρώματος υπό στατικά μονοαξονικά θλιπτικά φορτία, όπου το πέτρωμα θραύεται μακροσκοπικά κατά την κορυφαία αντοχή (υπό σταθερό ρυθμό αξονικής τάσης), και σε δυναμικά μονοαξονικά θλιπτικά φορτία, όπου το πέτρωμα θρυμματίζεται (Zhang & Zhao 2011).

Σε αντίθεση με τις στατικές καταπονήσεις, οι δυναμικές καταπονήσεις έχουν τη μορφή τασικών κυμάτων (stress waves), τα οποία διαδίδονται εντός του φορτιζόμενου μέσου (Kolsky 1963). Έτσι, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του πετρώματος περιλαμβάνει τόσο τη χρονική κατανομή του εντατικού πεδίου όσο και τη δυναμική απόκριση (μετατοπίσεις των σωματιδίων του πετρώματος, θραύση) και τις δυναμικές μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (αντοχή και ελαστικές σταθερές). Η απόκριση της βραχομάζας σε δυναμικές καταπονήσεις περιλαμβάνει τόσο τη θραύση του άρρηκτου πετρώματος όσο και μεγάλες μετακινήσεις επάνω στις ασυνέχειες (Zhao et al. 1999).

Η δυναμική συμπεριφορά του πετρώματος παρουσιάζει ενδιαφέρον τόσο για τα μεταλλευτικά όσο και για τα τεχνικά έργα. Ενδεικτικά αναφέρονται: ο θρυμματισμός του πετρώματος κατά την εξόρυξη του με εκρηκτικές ύλες, η βίαιη θραύση του πετρώματος σε βαθιά υπόγεια μεταλλεία, η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας και της υποστήριξης της υπό δυναμικά φορτία κ.ά.

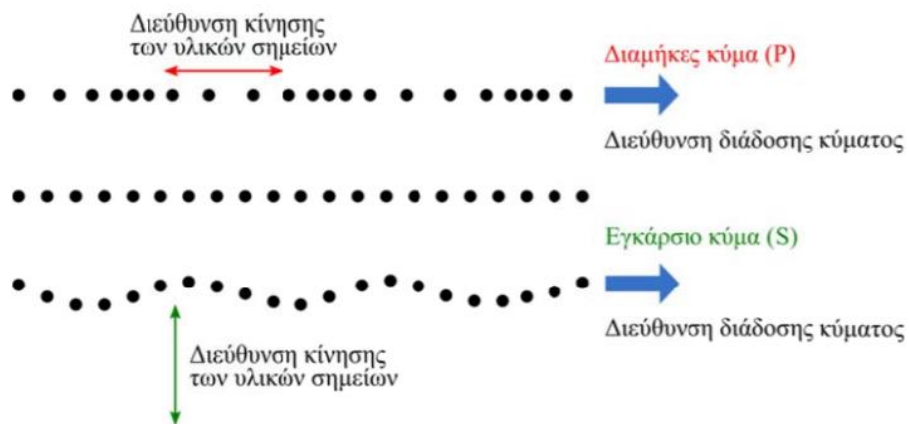
### 2.3.2 Δυναμικά φορτία και τοπικά κύματα

Δυναμικά φορτία καλούνται γενικά τα φορτία βραχείας διάρκειας εφαρμογής. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται οι κρούσεις, οι εκρήξεις και οι σεισμικές δράσεις. Για παράδειγμα, ένα κρουστικό φορτίο δημιουργείται από την πολύ μικρής χρονικής διάρκειας κρούση ενός αντικειμένου σε ένα άλλο, όπως κατά το χτύπημα ενός αντικειμένου με σφυρί. Το μέγεθος ενός κρουστικού φορτίου αυξάνεται ταχέως από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή του και καταλήγει στο μηδέν μέσα σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Καθώς τα δυναμικά φορτία μεταβάλλονται με τον χρόνο, παρουσιάζονται συνήθως με τη μορφή χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης, της ταχύτητας ή της μετατόπισης των σωματιδίων του πετρώματος ή της χρονοϊστορίας των συνιστωσών του ελκυστή σε μία επιφάνεια του πετρώματος.

Τα δυναμικά φορτία διαδίδονται με τη μορφή τασικών κυμάτων, τα οποία εξασθενούν κατά τη διάδοσή τους. Στα πετρώματα η εξασθένιση των τασικών κυμάτων οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στην παρουσία μικρορωγμών στη δομή του πετρώματος. Η δυναμική φόρτιση εφαρμόζεται σε ένα σημείο ή ένα επίπεδο και το τασικό κύμα κινείται περαιτέρω και δρα σε γειτονικά σημεία ή επίπεδα. Το κύμα διαδίδεται με ταχύτητα και εξαρτάται από το είδος του κύματος και από το μέσο διάδοσης.

Αποδεικνύεται ότι στο εσωτερικό ενός ελαστικού μέσου άπειρων διαστάσεων διαδίδονται δύο είδη τασικών κυμάτων, τα οποία καλούνται κύματα σώματος. Στο πρώτο είδος κύματος, που είναι γνωστό ως διαμήκες κύμα, η διεύθυνση της διαταραχής των υλικών σημείων είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Συνηθίζεται, τα κύματα σώματος στα πετρώματα, μαζί με τα κύματα που εμφανίζονται στην επιφάνεια του μέσου διάδοσης, εφόσον αυτό δεν έχει άπειρες διαστάσεις (επιφανειακά κύματα), να καλούνται σεισμικά κύματα λόγω της γένεσής τους στην εστία των σεισμών. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται ταχύτερα και καταγράφονται πρώτα από τους σειсмоγράφους των σεισμολογικών σταθμών. Έτσι, έχει επικρατήσει να λέγονται κύματα P (P waves). Τα εγκάρσια κύματα ακολουθούν τα κύματα P στις σεισμικές καταγραφές και έτσι καλούνται S (S waves).



Εικόνα 5: Διεύθυνση διαταραχής των υλικών σημείων κατά τη διάδοση του διαμήκους και του εγκάρσιου κύματος (Νομικός, 2015).

Όταν ένα τασικό κύμα οδεύει σε ένα πέτρωμα, η τάση ασκείται στα υλικά σημεία του πετρώματος, τα οποία επιταχύνονται και ταλαντώνονται γύρω από τις αρχικές τους θέσεις. Η ταχύτητα της παλινδρομικής κίνησης των υλικών σημείων ονομάζεται «ταχύτητα σωματιδίων» και έχει διαφορετική τιμή από την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Η ταχύτητα των σωματιδίων καθορίζεται από το μέγεθος και την ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου. Υψηλό πλάτος τασικού κύματος προκαλεί υψηλή ταχύτητα σωματιδίων (Νομικός, 2015).

## Κεφάλαιο 3. Ακαριαία διάρρηξη πετρωμάτων (Rockburst)

### 3.1 Γενικά

Το φαινόμενο εκρηκτικής συμπεριφοράς ή rockburst εμφανίστηκε από το 1900 σε ορυχεία της Νότιας Αφρικής. Σήμερα, αρκετά υπόγεια ορυχεία σε όλο τον κόσμο αντιμετωπίζουν το πρόβλημα αυτό. Το rockburst είναι ένα σεισμικό φαινόμενο που προκαλεί καταστροφές στις υπόγειες εκσκαφές. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί η διαφορά μεταξύ του σεισμικού φαινομένου και του rockburst. Ένα σεισμικό φαινόμενο δεν προκαλεί απαραίτητα καταστροφή στα υπόγεια ανοίγματα, ενώ το rockburst μπορεί να προκαλέσει διάφορων επιπέδων καταστροφές. Ένας άλλος ορισμός του rockburst είναι «η καταστροφή σε μια εκσκαφή, η οποία προκύπτει με αιφνίδιο και βίαιο τρόπο και σχετίζεται με ένα σεισμικό γεγονός» (Kabwe, Wang, 2015).

Ο ρόλος των σεισμικών συμβάντων σε ένα φαινόμενο rockburst μπορεί να εξεταστεί ως προς την πραγματική πορεία της εκρηκτικής συμπεριφοράς του πετρώματος. Ένα σεισμικό γεγονός μπορεί να εντοπιστεί σε κάποια απόσταση μακριά από τη θέση rockburst ή μπορεί να αλληλεπικαλύπτεται με το φαινόμενο rockburst.

Τα αίτια του rockburst μπορούν να ταξινομηθούν σε αυτοπροκαλούμενα (self-initiated) και προκαλούμενα από απόσταση (remotely triggered).

Τα αυτοπροκαλούμενα rockbursts προκύπτουν από τις τάσεις κοντά στα όρια της εκσκαφής, οι οποίες υπερβαίνουν την αντοχή της βραχώμαζας.

Η ανακατανομή των τάσεων ύστερα από την εξόρυξη αυξάνει τη συγκέντρωση των τάσεων σε συγκεκριμένα σημεία γύρω από το άνοιγμα. Η απώλεια της δομικής σταθερότητας έχει ως επακόλουθο τη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος και μπορεί να προκαλέσει rockburst, όπως για παράδειγμα μπορεί να αποδειχθεί με την αιφνίδια αστοχία στύλου.

Τα προκαλούμενα από απόσταση rockbursts προκαλούνται από σεισμικά γεγονότα μεγάλης έκτασης. Συμβαίνουν συνήθως σε σκληρά πετρώματα, συνήθως μετά την εξόρυξη, σε σημεία όπου οι ασυνέχειες τέμνονται με ελεύθερες επιφάνειες ή στύλους. Οι μεγάλες δονήσεις σε συνδυασμό με τις δυναμικές τάσεις ως αποτέλεσμα των εισερχόμενων σεισμικών κυμάτων μπορεί να οδηγήσουν τόσο στη θραύση της βραχώμαζας όσο και στη δομική αστάθεια.

Ακόμη, η εξόρυξη είναι ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει και να προκαλέσει το φαινόμενο rockburst. Στο αρχικό στάδιο της ζωής των ορυχείων παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης των τάσεων σε ανοίγματα που είναι σχετικά απομονωμένα και είναι μία συνηθισμένη αιτία γεγονότων rockburst. Στο μεταγενέστερο στάδιο της ζωής του ορυχείου, τα πολλαπλά ανοίγματα μπορεί να λειτουργήσουν ως επιπρόσθετος παράγοντας εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων (Kabwe, Wang, 2015).

### 3.2 Κατηγορίες Rockburst

Το φαινόμενο rockburst μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- Strain bursts: Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος rockburst. Προκαλείται από συγκέντρωση υψηλών τάσεων στη περιφέρεια των υπόγειων ανοιγμάτων, που υπερβαίνουν την αντοχή της βραχόμαζας, αλλά δύναται να προκαλείται και από απομακρυσμένο σεισμικό γεγονός (δυναμικά επαγόμενο strainburst). Κυμαίνεται από εκτινάξεις μικρών κομματιών πετρώματος έως την πλήρη κατάρρευση.

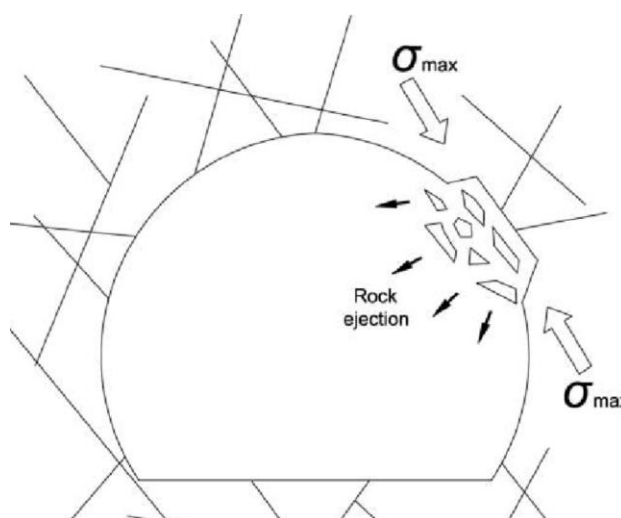
Για την εκδήλωση του φαινομένου πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις. Η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης θα πρέπει να αναπτυχθεί στο όριο της εκσκαφής και η βραχόμαζα γύρω από το κατακερματιζόμενο πέτρωμα θα πρέπει να δημιουργήσει μία μικρή φόρτιση, έτσι ώστε να ακολουθήσει η αστοχία του πετρώματος τοπικά με βίαιο τρόπο.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα strainburst προέρχεται από την αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια στο κατακερματισμένο περιβάλλον πέτρωμα (όχι από την σεισμική πηγή). Κατά τη διάρκεια διάνοιξης σήραγγας και φρεάτων, τα strainbursts που προκαλούνται μπορεί να έχουν έκταση έως και τριπλάσια της διαμέτρου του μετώπου εξόρυξης. Τέτοιου είδους strainbursts εκδηλώνονται τόσο στο μέτωπο όσο και στο δάπεδο της σήραγγας. Σε μερικές περιπτώσεις, το φαινόμενο εκδηλώνεται μετά την ανάπτυξη διαφόρων μετώπων εκσκαφής.



Εικόνα 6: Strainburst σε υποστηριζόμενη εκσκαφή (Kaiser, Cai, 2012)

Κατά συνέπεια, μπορεί να συμβεί κατά τη φάση της παραγωγής. Τα strainbursts που εκδηλώνονται με χρονική καθυστέρηση, συμβαίνουν όταν η μέγιστη κύρια τάση παραμένει σταθερή και μειώνεται σταδιακά η αντοχή του πετρώματος ή λόγω έλλειψης πλευρικής αντίστασης. Λόγω πιθανής στατικής αστάθειας κοντά στην εκσκαφή τα strainbursts μπορούν να εκδηλωθούν από μία μικρή δυναμική διαταραχή, όπως έκρηξη, ακαριαία διάρρηξη απομακρυσμένου στύλου ή από ολίσθηση λόγω ασυνεχειών. Η ελαστική ενέργεια που απελευθερώνεται στο σημείο διάρρηξης προέρχεται, κατά το μεγαλύτερό της μέρος της, από την αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια της περιβάλλουσας βραχώμαζας (Ortlepp, Stacey 1994).



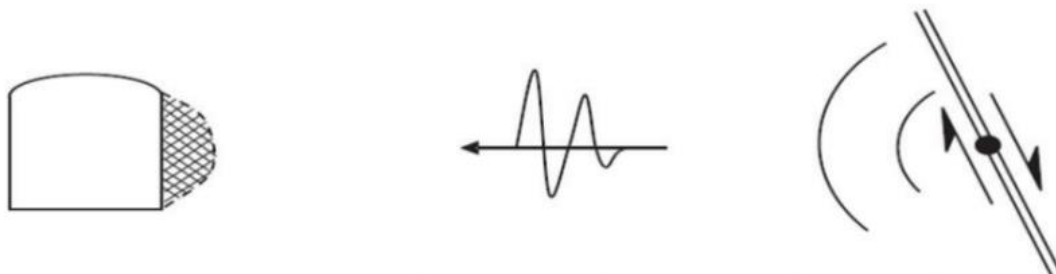
Εικόνα 7: Μηχανισμός strainburst ( Mazaira, Conizec, 2015)

- Pillar bursts: Σοβαρές εκτινάξεις βράχων, που περιλαμβάνουν χιλιάδες τόνους και προκαλούνται από την αστοχία του πυρήνα του στύλου έως και την πλήρη κατάρρευση του. Αυτές τείνουν να εμφανίζονται σε εκτεταμένα εξορυγμένες περιοχές και η ζημία που προκύπτει μπορεί να είναι σοβαρή. Ο όγκος που αστοχεί είναι μεγαλύτερος από αυτόν των strainbursts και επομένως και η απελευθερούμενη ενέργεια είναι σαφώς μεγαλύτερη. Όμοια με τα strainbursts, τα pillar bursts διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Αυτά που οφείλονται στην αύξηση των τάσεων λόγω της αύξησης των κενών του θαλάμου ή της κοντινής εξόρυξης και αυτά που προκαλούνται από κάποιο σεισμικό φαινόμενο με αποτέλεσμα τη δυναμική αύξηση των τάσεων. Στα πρώτα, η πηγή του σεισμικού κύματος βρίσκεται στο ίδιο σημείο με την εκδήλωση του rockburst, ενώ στη δεύτερη περίπτωση όχι.



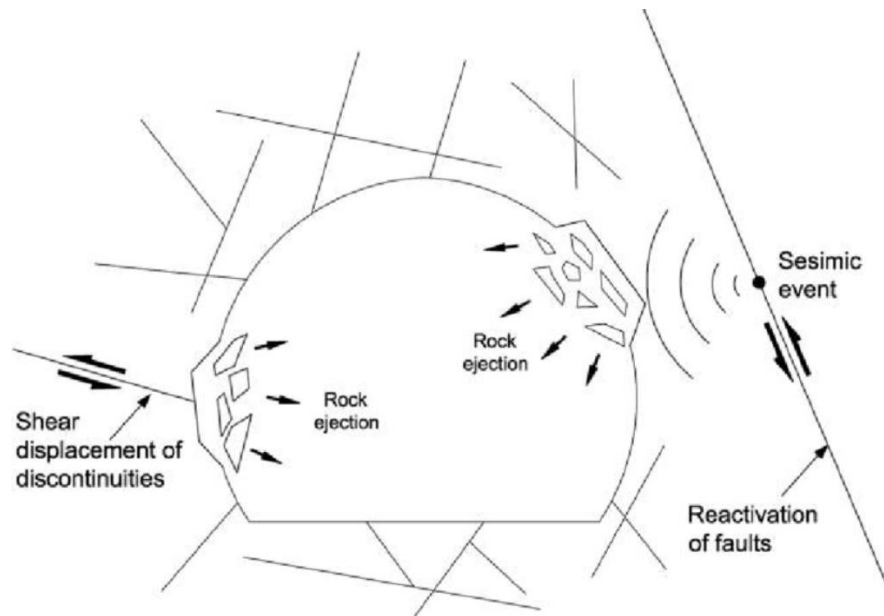
Εικόνα 8: Pillar burst (Jones et.al, 2019)

- Fault slip bursts: Παρατηρήθηκε τη δεκαετία του 1980 και προέρχεται από τη δυναμική ολίσθηση πάνω σε μια επιφάνεια προϋπάρχουσας ασυνέχειας. Είναι ο ίδιος μηχανισμός με τη σεισμική δόνηση.



Εικόνα 9: Μηχανισμός fault slip burst (Charlie et. Al, 2019)

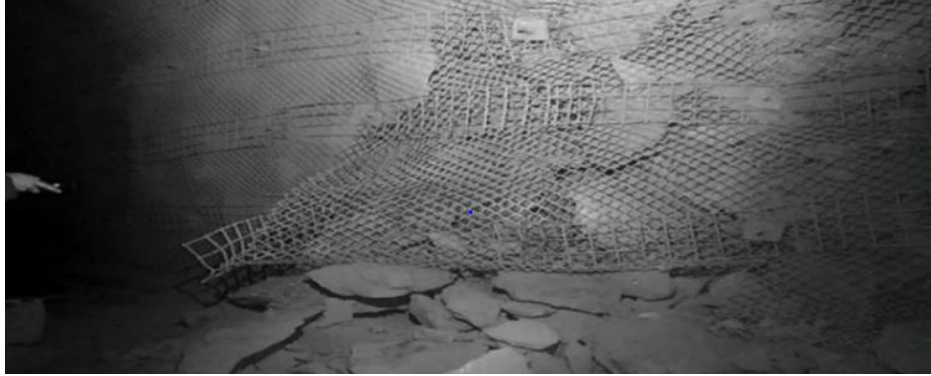
Ένα fault slip burst προκαλείται από τη δυναμική ολίσθηση κατά μήκος της προϋπάρχουσας ασυνέχειας ή κατά μία διατμητική ρήξη. Μία οριακά φορτισμένη ασυνέχεια με διατμητικές τάσεις που πλησιάζουν τη διατμητική αντοχή, μπορεί να ολισθήσει με την αλλαγή του βαθμού ελευθερίας, δηλαδή όταν διασταυρωθεί με κάποιο άνοιγμα το οποίο εξορύσσεται. Εναλλακτικά, η ασυνέχεια μπορεί να ολισθήσει λόγω της μείωσης της διατμητικής αντοχής εξαιτίας της μείωσης των πλευρικών τάσεων ή της διείσδυσης νερού στην ασυνέχεια. Όμοια με τα pillar bursts, τα fault slip bursts εκδηλώνονται σε μεγάλου βάθους ορυχεία.



Εικόνα 10: Μηχανισμός fault slip burst ( Mazaira, Conizec, 2015)

Η πιο γνωστή αιτία του φαινομένου σε προϋπάρχουσα ασυνέχεια είναι η μείωση της ορθής τάσης στην επιφάνεια της ασυνέχειας ως αποτέλεσμα γειτονικής εξορυκτικής δραστηριότητας, αν και η αύξηση της διατμητικής τάσης ή ο συνδυασμός μείωσης της ορθής τάσης και αύξησης της διατμητικής τάσης μπορούν να οδηγήσουν σε fault slip burst. Ο συγκεκριμένος τύπος rockburst μπορεί να απελευθερώσει μεγάλη σεισμική ενέργεια, προερχόμενη από τη στιγμιαία απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας, που ήταν αποθηκευμένη σε μεγάλο όγκο της ιδιαίτερα φορτισμένης περιβάλλουσας βραχώμαζας. Μπορεί να προκύψουν υψηλές δονήσεις ή μετακινήσεις με αποτέλεσμα να προκαλέσουν προβλήματα στη χαλαρωμένη ή μη επαρκώς υποστηριγμένη βραχώμαζα και να πυροδοτήσουν την έναρξη strainburst ή pillar burst σε απόσταση μέχρι και εκατοντάδες μέτρα από την πηγή του σεισμικού κύματος (Kaiser, Cai, 2012).



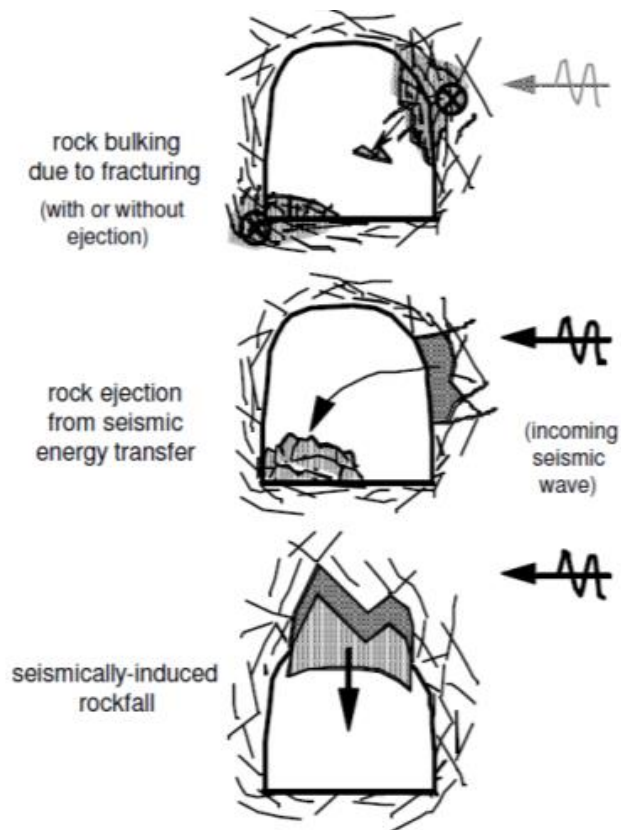


Εικόνα 11: Fault slip burst σε υποστηριζόμενη εκσκαφή (Saqib, 2013)

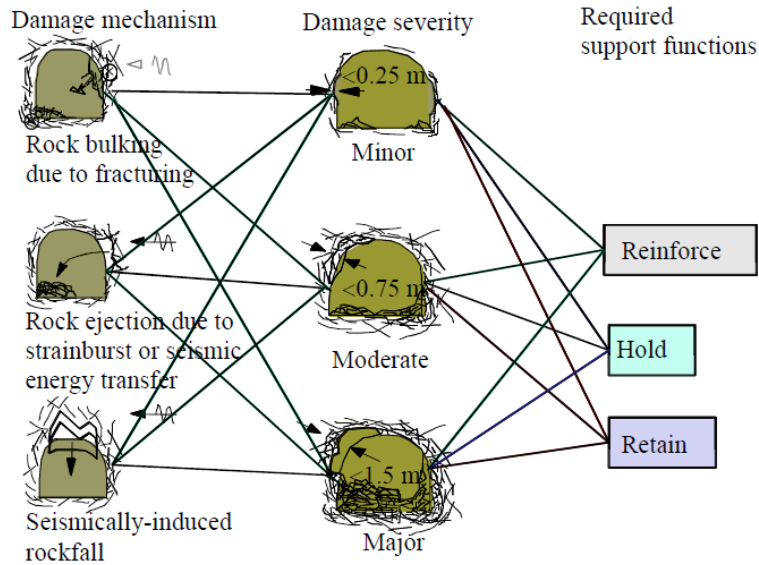
### 3.3 Μηχανισμός διάρρηξης

Η κατανόηση του μηχανισμού προέλευσης του rockburst είναι σημαντική ώστε να εξαλειφθεί ή έστω να μειωθεί η εκδήλωση τέτοιου είδους φαινομένων. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος πρέπει να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός καταστροφής, έτσι ώστε να εφαρμοσθούν ειδικές τεχνικές υποστήριξης.

Ο μηχανισμός καταστροφής μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες: λυγισμός του πετρώματος λόγω θραύσης (rock bulking), εκτόξευση τεμαχών λόγω σεισμικής ενέργειας (rock ejection) και καταπτώσεις λόγω σεισμικής δόνησης (seismically-induced rockfalls).

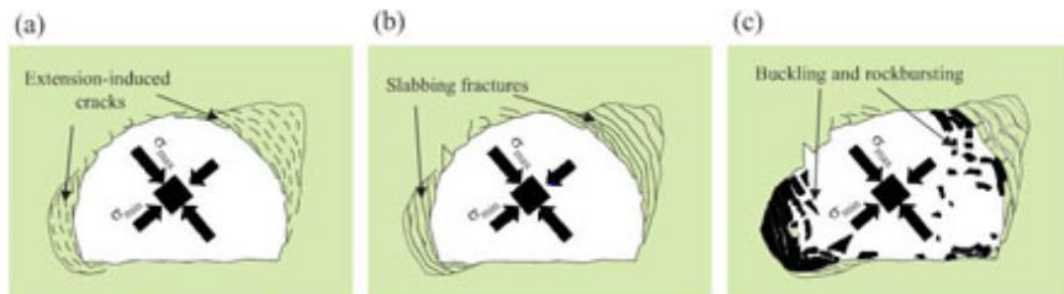


Εικόνα 12: Μηχανισμός διάρρηξης (Hudyma, 2004)



Εικόνα 13: Μηχανισμοί διάρρηξης (Kaiser, Cai, 2012)

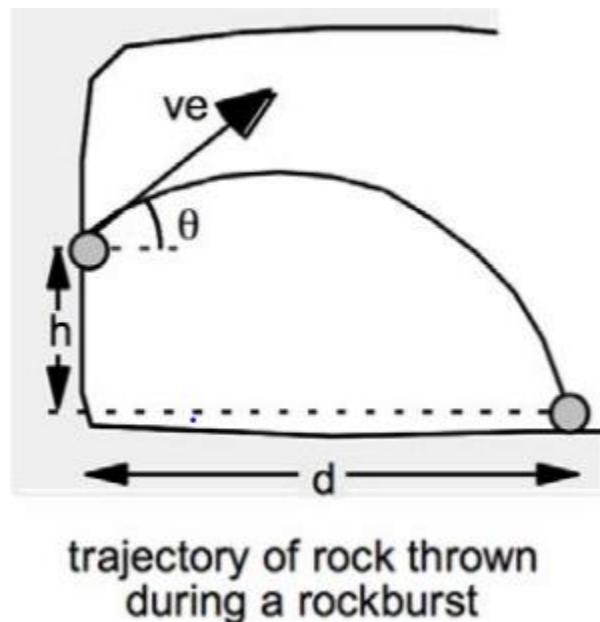
- Ο λυγισμός του πετρώματος λόγω θραύσης (rock bulking) μπορεί να προκληθεί τόσο από το συνδυασμό της σεισμικής δόνησης και της διάρρηξης, όσο και από τη διάρρηξη μεμονωμένα. Η ψαθυρή θραύση προκύπτει ως αποτέλεσμα της έναρξης της ρωγμάτωσης, της διάδοσής της και της συγχώνευσης πολλών ρωγμών (Kaiser et al., 2000, Cai et al., 2004). Αυτή η διαδοχή οδηγεί στη δημιουργία νέων επιφανειών θραύσης σε ένα άρρηκτο ή τουλάχιστον λιγότερο ρωγματωμένο πέτρωμα με αποτέλεσμα την καταστροφή και τη διόγκωση της βραχώμαζας. Η διαδικασία της διόγκωσης είναι σε μεγάλο βαθμό αποτέλεσμα των γεωμετρικών ασυμβατοτήτων μεταξύ των τεμαχών που δημιουργούνται και γι'αυτό η διόγκωση λόγω ψαθυρής θραύσης είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή που προκύπτει λόγω διαστολής κατά την πλαστική παραμόρφωση. Πιο σημαντική είναι η κατεύθυνση της διόγκωσης, η οποία είναι κάθετη στα τοιχώματα της εκσκαφής. Κατά τη διάρκεια της διόγκωσης λόγω του κατακερματισμού του πετρώματος, ο όγκος του γίνεται μεγαλύτερος (Kaiser, Cai, 2012).



Εικόνα 14: Μηχανισμός διόγκωσης (α) διάδοση ρωγματώσεων (β) δημιουργία πλακών πετρώματος (c) λυγισμός πλακών και έκρηξη του πετρώματος (Qiu, Feng et al., 2014)

- Η εκτόξευση τεμαχών (rock ejection) μπορεί να προκληθεί είτε από strainburst, είτε από pillar burst, είτε από fault slip burst. Το εκτοξευόμενο τεμάχος μπορεί να έχει ταχύτητα από 3 m/s έως 10 m/s. Η ανώτερη τιμή της ταχύτητας δε γίνεται να υπολογιστεί καθαρά και μόνο από τον μηχανισμό αστοχίας, καθώς κατά την ακαριαία αστοχία, απελευθερώνεται η αποθηκευμένη ενέργεια της βραχώμαζας και εκδηλώνεται ως κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα την εκτίναξη τεμαχών. Η ταχύτητα του τεμαχούς ορίζεται από την Εξίσωση 2.1:

$$Ve = d \times \sqrt{\frac{g}{2 \times h \times \cos^2 \theta + d \times \sin 2\theta}} \quad (2.1)$$



Εικόνα 15: Τροχιά τεμαχούς (Soto, Vertugo, 2017)

Με τη μεγάλη ποσότητα αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας και την ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα σεισμικό γεγονός, μπορεί να προκληθεί strainburst. Στην περίπτωση αυτή, η ταχύτητα εκτίναξης συνδέεται άμεσα με την αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια κοντά στο τοίχωμα της εκσκαφής.

- Οι καταπτώσεις λόγω σεισμικής δόνησης (seismically- induced rockfalls), όπως το όνομα Υποδηλώνει, προκαλούνται από τη χαμηλής συχνότητας ταλάντωση της βραχώμαζας εξαιτίας ενός απομακρυσμένου σεισμικού γεγονότος πιθανόν από pillar burst ή fault slip burst. Εμφανίζεται όταν ένα εισερχόμενο σεισμικό κύμα προκαλεί επιτάχυνση σε έναν όγκο πετρώματος που προηγουμένως ήταν σταθερός κάτω από στατικές συνθήκες φόρτισης και προκαλεί δυνάμεις που ξεπερνούν την αντοχή του συστήματος υποστήριξης. Επίσης, είναι πιθανό το πρώτο εισερχόμενο σεισμικό κύμα να προκαλέσει θραύση σε έναν όγκο πετρώματος και μία επακόλουθη δόνηση που προκαλείται από σεισμικά κύματα να επιταχύνει τα θραυσμένα τεμάχη προκαλώντας καταπτώσεις.

Οι καταπτώσεις λόγω σεισμικής δόνησης συναντώνται συχνά σε διασταυρώσεις όπου το άνοιγμα είναι μεγάλο και ο περιορισμός της οροφής είναι χαμηλός.

### 3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο του rockburst

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τόσο το rockburst όσο και τη σοβαρότητα του φαινομένου. Παρακάτω, στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράγοντες αυτοί, οι οποίοι είναι σεισμικά γεγονότα, γεωλογικοί, γεωτεχνικοί και μεταλλευτικοί.

Πίνακας 1: Παράγοντες επιρροής rockburst (Kaiser, Cai, 2012)

Seismic event	Geology	Geotechnical	Mining
<ul style="list-style-type: none"><li>• Event magnitude</li><li>• Rate of seismic energy release</li><li>• Distance to seismic source</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• In situ stress</li><li>• Rock type</li><li>• Beddings</li><li>• Geological structures (dykes, faults, and shears)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rock strength</li><li>• Joint fabric</li><li>• Rock brittleness</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mining induced static and dynamic stresses</li><li>• Excavation span</li><li>• Extraction ratio</li><li>• Mine stiffness</li><li>• Excavation sequence (stress-path), blasting</li><li>• Installed rock support system</li><li>• Backfill</li><li>• Production rate</li></ul>

Οι δύο πρώτοι παράγοντες, τα σεισμικά γεγονότα και η γεωλογία, καθορίζουν την ένταση του δυναμικού φορτίου στις υπό εξέταση περιοχές και οι δύο τελευταίοι παράγοντες, οι γεωτεχνικοί και οι μεταλλευτικοί καθορίζουν την αντίδραση της περιοχής λόγω των σεισμικών παλμών. Επομένως, το rockburst καθορίζεται από συνδυασμό αυτών των παραγόντων.

Όταν το μέγεθος ενός ανοίγματος είναι μεγάλο ή όταν πολλαπλά ανοίγματα δημιουργούνται κοντά το ένα στο άλλο, η πιθανότητα εκδήλωσης rockburst αυξάνεται. Ως εκ τούτου, η γεωμετρία της εκσκαφής και της ζώνης διαρροής μπορεί να επηρεάσουν την τάση με αποτέλεσμα την εκδήλωση του φαινομένου.

Όταν υπάρχουν γεωλογικές αδυναμίες, όπως ασυνέχειες, ζώνες διάτμησης ή αυξημένες τάσεις, η ενέργεια που απελευθερώνεται μπορεί συχνά να είναι αυξημένη, διότι αυτές οι γεωλογικές δομές τείνουν να δημιουργούν δυσμενείς συνθήκες τάσης και συνθήκες φόρτισης, όπως για παράδειγμα με τη συμμετοχή μεγάλων όγκων πετρωμάτων στη διαδικασία παραμόρφωσης και αστοχίας.

Η σοβαρότητα του rockburst συχνά ταξινομείται από το βάθος της αστοχίας ή τον όγκο του πετρώματος που αστόχησε και το βαθμό καταστροφής στο σύστημα υποστήριξης. Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 13, η σοβαρότητα του rockburst μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε μικρή, μεσαία και έντονη. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι πολλοί παράγοντες, όπως η έκταση της εκσκαφής, και το εγκατεστημένο σύστημα υποστήριξης του πετρώματος σχετίζονται με την

εξορυκτική δραστηριότητα. Δίνοντας βάση σε αυτούς τους παράγοντες, μπορούν να παραχθούν εύχρηστα μέσα για τη μείωση της πιθανότητας εκδήλωσης και τον έλεγχο αστοχίας από rockburst. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την επίτευξη αυτού του στόχου, όπως για παράδειγμα η αλλαγή της μεθόδου εξόρυξης κ.α. Ένας πολύ σημαντικός τρόπος προστασίας από το φαινόμενο είναι η σωστή και αποτελεσματική υποστήριξη του πετρώματος.

## Κεφάλαιο 4. Υποστήριξη

### 4.1 Μηχανισμός υποστήριξης

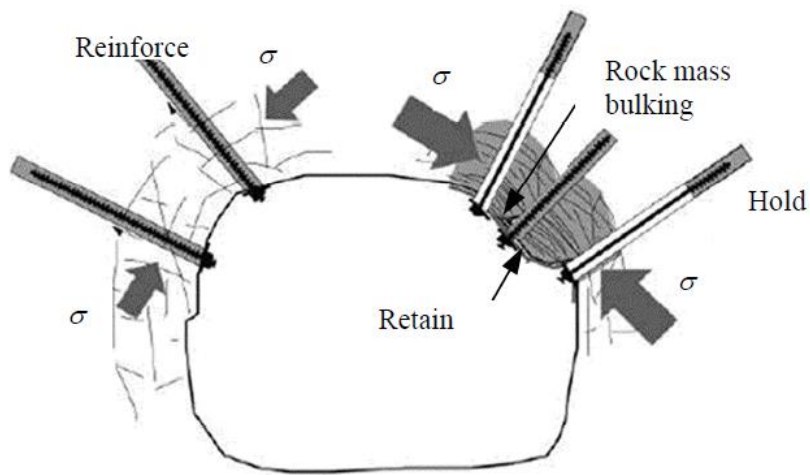
Ο μηχανισμός της υποστήριξης του πετρώματος είναι πολύπλοκος και τα υπάρχοντα μοντέλα εξηγούν μόνο μερικώς την αλληλεπίδραση των διαφόρων στοιχείων υποστήριξης σε ένα σύστημα υποστήριξης.

Παρόλα αυτά οι βασικές λειτουργίες της υποστήριξης μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες.

- Ενίσχυση της βραχώμαζας και έλεγχο της διόγκωσής της (reinforce). Σκοπός της ενίσχυσης με ηλώσεις είναι όχι μόνο η ενδυνάμωση της βραχώμαζας για την υποστήριξή της, αλλά και ο έλεγχος της διόγκωσης καθώς αποτρέπουν τη θραύση και τη διάδοση του φαινομένου.
- Διατήρηση των θραυσμένων τεμαχίων με σκοπό τον περιορισμό της αστοχίας, έτσι ώστε να μην εξελιχθεί σε αστοχία μεγαλύτερου όγκου (retain). Υπό συνθήκες υψηλών τάσεων το θραυσμένο πέτρωμα μεταξύ των στοιχείων ενίσχυσης θα εκτινασσόταν μέσα στην εκσκαφή εάν δε διατηρούνταν στη θέση του. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται ευρέως πλέγμα, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οπλισμένο σκυρόδεμα και πλαίσια υποστήριξης. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει να ενισχυθεί με ίνες ή πλέγμα, για ενίσχυση της αντοχής σε εφελκυσμό και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για τη συγκράτηση έως και αρκετά μικρών θραυσμάτων. Για την ενίσχυση της συμβατικής υποστήριξης, θα πρέπει να συμπεριληφθεί και η διατήρηση του ασθενέστερου στοιχείου στη συνολική υποστήριξη. Όταν ένα ψαθυρό πέτρωμα αστοχεί, συνοδεύεται πάντα από διόγκωση. Όταν προκαλείται ένα σεισμικό γεγονός, η βραχώμαζα μπορεί να υποβληθεί σε υψηλή ενέργεια και να αστοχήσει με ασταθή τρόπο με την εκλυόμενη ενέργεια να προκαλεί εκτίναξη τεμαχίων. Ως εκ τούτου, το εγκατεστημένο σύστημα υποστήριξης πρέπει να είναι σε θέση να απορροφά τη δυναμική ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα να δέχεται παραμορφώσεις που οφείλονται σε αστοχία του πετρώματος σε συνδυασμό με τη διόγκωση.
- Συγκράτηση μεμονωμένων τεμαχίων στο σταθερό πέτρωμα (hold). Είναι απαραίτητη για τη σύνδεση των στοιχείων συγκράτησης του συστήματος υποστήριξης και του χαλαρού πετρώματος στο σταθερό πέτρωμα, για την κατανομή της δυναμικής ενέργειας με σκοπό τη μείωση των εκτινάξεων και των μετακινήσεων. Όταν αναμένεται εκδήλωση φαινομένου rockburst, τότε κατάλληλη υποστήριξη είναι οι ήλοι τριβής και τα conebolts. Το στοιχείο συγκράτησης στο σύστημα υποστήριξης πρέπει επίσης να είναι σε θέση να ανεχθεί μεγάλες συγκλίσεις χωρίς να "αυτοκαταστρέφεται", απορροφώντας ταυτόχρονα μεγάλη δυναμική

ενέργεια. Ένα σύστημα υποστήριξης που δέχεται μετακινήσεις πρέπει να βρίσκεται σε αρμονία με τη βραχύμαζα που αστοχεί. Έτσι, οι «βαριές» υποστηρίξεις από σκυρόδεμα είναι δύσκαμπτες και δε δέχονται μετακινήσεις.

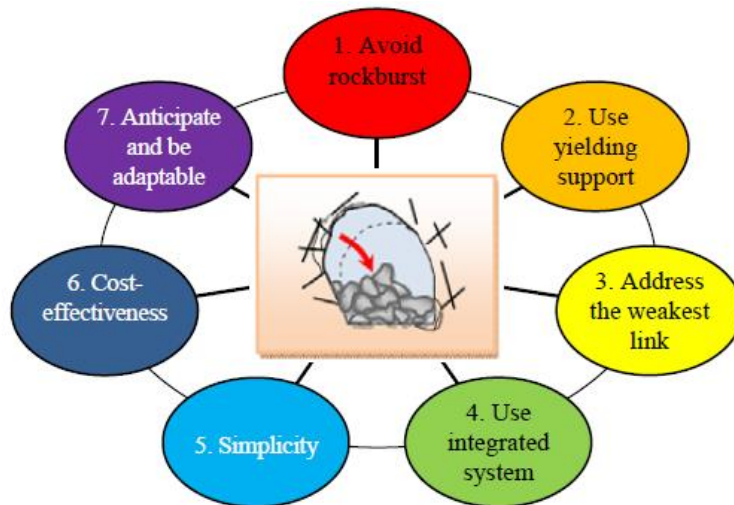
Τα τρία στοιχεία στήριξης που παρέχουν ενίσχυση, διατήρηση και συγκράτηση δεν ενεργούν ανεξάρτητα. Ως εκ τούτου, πρέπει να είναι συνδεδεμένα σχηματίζοντας μία ενισχυμένη υποστήριξη. Η σύνδεση μεταξύ των στοιχείων αξίζει ιδιαίτερης προσοχής και εξασφαλίζει τη βέλτιστη συνολική αντοχή του συστήματος υποστήριξης. Στην Εικόνα 16 φαίνονται τα τρία αυτά στοιχεία στήριξης, χωρίς να σχετίζονται με τον μηχανισμό καταστροφής και τη σοβαρότητα της (Kaiser, 2012).



Εικόνα 16: Κατηγορίες υποστήριξης (Kaiser, Cai, 2012)

## 4.2 Αρχές σχεδιασμού συστημάτων υποστήριξης

Η τακτική που ακολουθείται κατά την υποστήριξη είναι η χρήση διαφόρων εργαλείων για τις κατασκευές και την αντιμετώπιση των καταστροφικών φαινομένων.



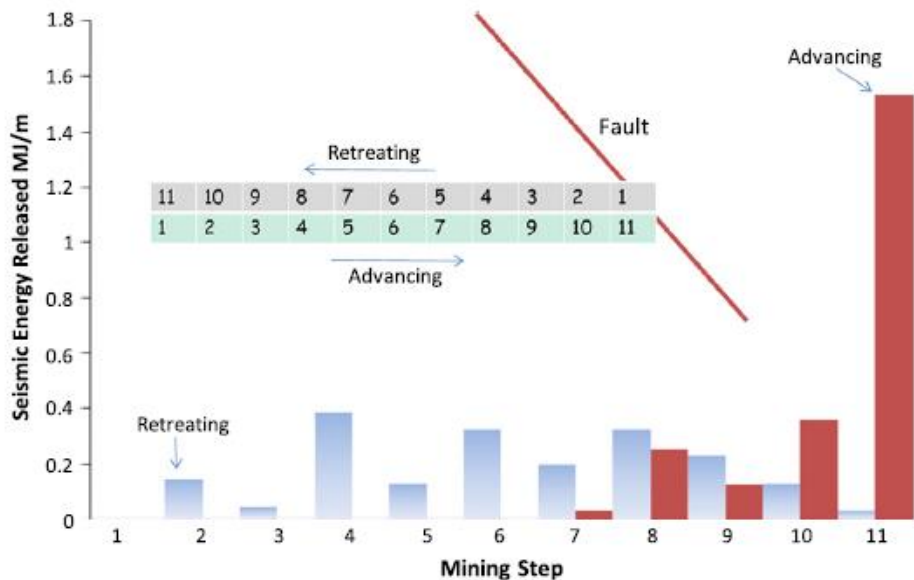
Εικόνα 17: Αρχές σχεδιασμού συστημάτων υποστήριξης (Kaiser, Cai, 2012)

### 4.2.1 Αποφυγή rockburst

Αρχικός στόχος είναι η αποφυγή του rockburst. Ως εκ τούτου, η καλύτερη στρατηγική είναι η σταθεροποίηση της βραχώμαζας χωρίς να καταπολεμούνται τα φορτία και οι πιέσεις με πολύ «βαριά» υποστήριξη. Τρόποι αποφυγής του ρίσκου εκδήλωσης του φαινομένου είναι η αλλαγή της τοποθεσίας της υπόγειας εκσκαφής, της διατομής και του τρόπου εξόρυξης. Για παράδειγμα, ένας σωστός σχεδιασμός σύλου μπορεί να εξαλείψει τις συνθήκες φόρτισης σε ένα ορυχείο, αποτρέποντας έτσι την εμφάνιση εκρηκτικής συμπεριφοράς. Μπορεί να αποφευχθεί η απελευθέρωση της πλεονάζουσας ενέργειας χρησιμοποιώντας διαφορετική αλληλουχία των μεταλλευτικών εργασιών. Σύμφωνα με την Εικόνα 18 υπάρχει μία ασυνέχεια και κοντά της υπάρχουν μέτωπα εξόρυξης. Εξετάζονται δύο αλληλουχίες, η advancing και η retreating. Εάν χρησιμοποιηθεί η advancing προς την ασυνέχεια, θα υπάρξει μηδενική απελευθέρωση ενέργειας στα έξι πρώτα στάδια, όμως προκύπτει συγκεντρωμένη απελευθέρωση στο ενδέκατο στάδιο. Ακόμη, η συνολική ενέργεια που απελευθερώνεται με αυτή τη μέθοδο είναι 25% μεγαλύτερη της retreating.

Με την advancing μέθοδο ο κίνδυνος εκδήλωσης rockburst είναι μεγάλος, ενώ στη retreating μέθοδο η απελευθερούμενη ενέργεια είναι ελεγχόμενη και μπορεί να αποφευχθεί.





Εικόνα 18: Παράδειγμα αποφυγής εκδήλωσης rockburst με αλλαγή μεθόδου εκμετάλλευσης (Cai, 2013)

Η επιστροφή στην εργασία μετά από την εμφάνιση rockburst θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά για την αποφυγή του κινδύνου και για την ασφάλεια λόγω πιθανού νέου rockburst. Κανένα άτομο από το προσωπικό δεν πρέπει να επιτρέπεται να εργάζεται σε περιοχές όπου η σεισμική δραστηριότητα είναι ακόμα υψηλή μετά από ένα μεγάλο σεισμικό γεγονός. Ακόμη πρέπει να εξετάζεται η περίπτωση μετατόπισης του κινδύνου. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρήση ανατινάξεων για αρραίωση των τάσεων, την εφαρμογή λιθογόμωσης και την διατήρηση χρονικών διαστημάτων μεταξύ των ανατινάξεων παραγωγής. Όταν εξαντληθούν όλες οι μέθοδοι και ο κίνδυνος rockburst εξακολουθεί να υπάρχει, θα πρέπει να αξιολογούνται οι πραγματικές συνθήκες και να σχεδιάζεται αποτελεσματική υποστήριξη.

#### 4.2.2 Σχεδιασμός υποστήριξης

Όταν ένα ψαθυρό πέτρωμα αστοχήσει, συνοδεύεται πάντοτε από μεγάλη διαστολή του πετρώματος και μπορεί να απελευθερώνεται υψηλή ποσότητα ενέργειας. Το σύστημα υποστήριξης της βραχώμαζας πρέπει να είναι παραμορφώσιμο και να είναι σε θέση να απορροφήσει τη δυναμική ενέργεια. Συχνά είναι αντιοικονομικό να αποφευχθεί το rockburst ενισχύοντας την υποστήριξη. Το σημαντικό είναι η υποστήριξη να μπορεί να είναι εύκαμπτη και να δέχεται τις προβλεπόμενες παραμορφώσεις. Όταν η θραύση είναι δυναμική, τότε ενδεχομένως η πίεση να είναι υψηλή υπερβαίνοντας την αντοχή της συμβατικής υποστήριξης, η οποία έχει περιορισμένη αντοχή, ανοχή στις μετακινήσεις και τις ενεργειακές μεταβολές. Για παράδειγμα, η πίεση που προκύπτει από τη θραύση ψαθυρού πετρώματος στο ένα πλευρικό τοίχωμα βαθιάς σήραγγας υπερβαίνει τα 0,4 MPa και η πίεση υποστήριξης που μπορεί να επιτευχθεί από ένα μέτρια πυκνό κάναβο ήλων είναι 0,1 MPa. Για την παροχή μιας πίεσης υποστήριξης

0,4 MPa χρειάζεται πολύ πιο πυκνός κάρβος και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πράγμα που δύναται να καθιστά αντικοινωνική την υποστήριξη. Γενικά, η πίεση του πετρώματος μειώνεται με την αυξανόμενη παραμόρφωση του. Αν το σύστημα υποστήριξης είναι σε θέση να απορροφήσει ελεγχόμενα ένα μέρος της ενέργειας, η βραχόμαζα μπορεί να φθάσει σε δυναμική ισορροπία στη διαδικασία παραμόρφωσης και το σύστημα θα φτάσει τελικά σε ένα νέα κατάσταση ισορροπίας μετά από ορισμένη παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, το βασικό σημείο είναι ότι το σύστημα υποστήριξης πρέπει να επιτρέπει στη βραχόμαζα να παραμορφωθεί (με ελεγχόμενο τρόπο), πράγμα που σημαίνει ότι το σύστημα υποστήριξης πρέπει να έχει επαρκή μετατόπιση και αντοχή. Ένα σύστημα υποστήριξης που διαρρέει θα πρέπει να ανεχθεί μεγάλες συγκλίσεις χωρίς την «αυτοκαταστροφή» του συστήματος, παράλληλα με την εξασφάλιση της ασφάλειας και τη διατήρηση της χρηστικότητας του έργου. Ένα σύστημα υποστήριξης που διαρρέει είναι ένα σύστημα σε αρμονία με το γύρω πέτρωμα.

#### 4.2.3 Αντιμετώπιση αδύναμου σημείου

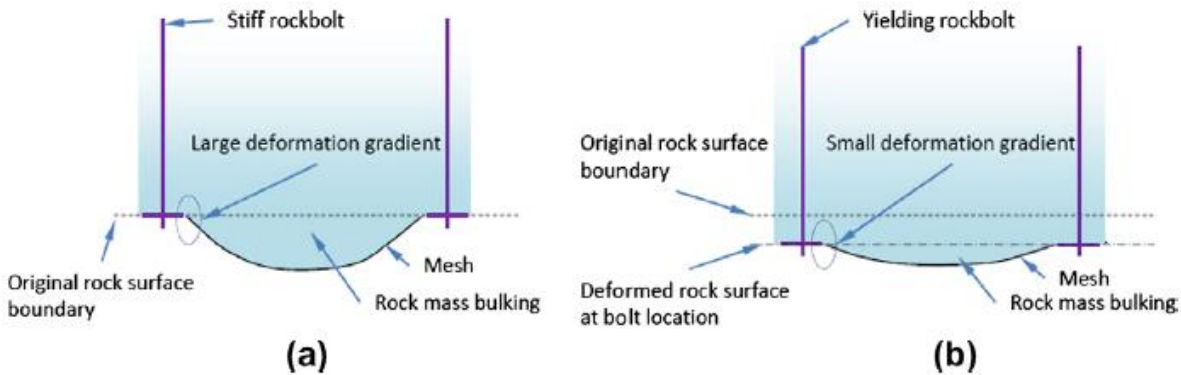
Άλλη μία αρχή που λαμβάνεται υπόψιν για το σχεδιασμό της υποστήριξης είναι η αντιμετώπιση του αδύναμου σημείου όπου συχνά είναι η ασθενής σύνδεση μεταξύ του πετρώματος και των ήλων.

Όσον αφορά στον εντοπισμό του αδύνατου σημείου, τα συμβατικά συστήματα υποστήριξης που αποτελούνται από συμβατικές ηλώσεις και μεταλλικό πλέγμα δεν είναι αποτελεσματικά στη περίπτωση του rockburst. Αυτό συμβαίνει όχι επειδή δεν έχουν υψηλή φέρουσα ικανότητα οι ηλώσεις, αλλά η σύνδεσή τους με το μεταλλικό πλέγμα είναι το αδύναμο σημείο. Συνήθως, η αστοχία του πλέγματος προέρχεται από τις μυτερές γωνίες των πλακών των ήλων, οι οποίες κόβουν το πλέγμα με αποτέλεσμα την εκτόξευση των τεμαχών. Μία ουσιαστική λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση μεγάλων πλακών για τη σύνδεση των ηλώσεων με το πλέγμα.



Εικόνα 19: Αστοχία μεταξύ πλέγματος και ηλώσεων (Cai, 2013)

Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκαμπτοι ήλοι που μπορούν να παραλάβουν παραμορφώσεις και να μειώσουν την παραμορφωσιακή βαθμίδα κοντά στις πλάκες των ηλώσεων (Εικόνα 20 (b)) με αποτέλεσμα να μη μεταφέρεται αποκλειστικά η ενέργεια στους ήλους και στις πλάκες όπως συμβαίνει στους δύσκαμπτους ήλους.



Εικόνα 20: Βελτίωση κλίσης πλέγματος με χρήση παραμορφώσιμων ηλώσεων (Cai, 2013)

Επιπλέον λαμβάνονται υπόψιν η απλότητα στην κατασκευή και στην εγκατάσταση, η αποτελεσματικότητα καθώς και προσαρμοστικότητα, διότι δε γίνεται να υπάρξει μόνο ένας σχεδιασμός για όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα, πρέπει να διαμορφώνεται ανάλογα με την περίπτωση και τη σοβαρότητά της (Cai, 2013).

#### 4.2.3 Ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης

Μερικοί μηχανικοί συχνά ρωτούν εάν μπορεί να αναπτυχθεί ένας «υπερήλκος» ή μια «υπερστρώση» υποστήριξης για αντικατάσταση όλων των άλλων στοιχείων υποστήριξης για την καταπολέμηση των προβλημάτων rockburst σε βαθιά ορυχεία. Η απάντηση πάντα είναι ότι δεν μπορεί να υπάρξει κάποιο τέτοιου είδους στοιχείο. Είναι αμφίβολο εάν μπορούν να αντικατασταθούν τα επιφανειακά στοιχεία υποστήριξης όπως πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Πολύ συχνά, χρειάζεται υποστήριξη από σύστημα που αποτελείται από συνδυασμό στοιχείων υποστήριξης και τα στοιχεία αυτά δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν μεμονωμένα, αλλά σαν συνδυασμός. Αυτό που είναι σημαντικό ως εκ τούτου είναι η δυνατότητα επιλογής του σωστού συνδυασμού στοιχείων υποστήριξης.

Θεμελιώδης απαίτηση είναι να συνδυαστούν οι ηλώσεις με τα στοιχεία στήριξης επιφάνειας, όπως το πλέγμα και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα σύστημα υποστήριξης, το οποίο να μπορεί να ανταπεξέλθει σε εξαιρετικά μεγάλα μεγέθη πιέσεων. Η ύπαρξη ηλώσεων μόνο στο σύστημα στήριξης δε θα επιτύχει τα επιθυμητά αποτελέσματα της στήριξης σε περίπτωση rockburst. Αυτό παρατηρήθηκε σε πραγματικές καταστάσεις εκδήλωσης rockburst που πραγματοποιήθηκε σε ένα ορυχείο στη Νότια Αφρική. Στο πείραμα προσομοίωσης rockburst η υπάρχουσα υποστήριξη αποτελούταν από ήλους, πλέγμα και ράβδους χάλυβα. Σε προσομοίωση, κατά τη διαδικασία της έκρηξης, με την ύπαρξη μόνο ήλων και ράβδων χάλυβα, οι ήλοι επηρεάστηκαν από τη δυναμική

φόρτιση, αλλά κανένας δεν αστόχησε από την έντονη δυναμική φόρτιση με μέγιστη ταχύτητα  $ppv$  (ταχύτητα σωματιδίων)  $3,3 \text{ m/s}$  και μέγιστη ταχύτητα εκτίναξης  $2,5 \text{ m/s}$ . Ωστόσο, ο Orllepp (2006) επεσήμανε ότι ο λόγος για τον οποίο οι ήλοι δεν υπέστησαν αστοχία στο προσομοιωμένο πείραμα rockburst ήταν απλώς ότι οι ήλοι είχαν υποβληθεί σε σχετικά χαμηλή ένταση δυναμικής φόρτισης. Επομένως, οι ήλοι δεν έλαβαν επαρκή δυναμική φόρτιση εξαιτίας της έλλειψης στοιχείων υποστήριξης της επιφάνειας, έτσι ώστε να μεταφερθεί η δυναμική φόρτιση από το πέτρωμα μεταξύ των ήλων, στους συγκεκριμένους ήλους.

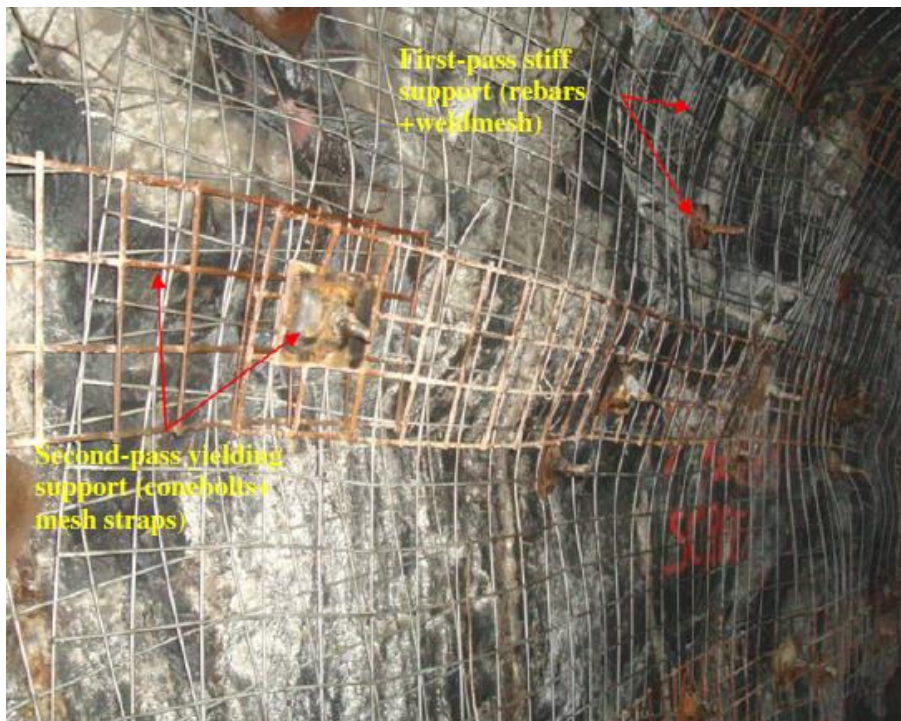
Γενικά, επικρατεί η άποψη ότι οι συμβατικοί ήλοι είναι πολύ δύσκαμπτοι και συνεπώς ότι δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται καθόλου για υποστήριξη σε περίπτωση rockburst. Αντίθετα, οι ράβδοι χάλυβα, σε συνδυασμό με το πλέγμα ή το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μπορούν να ελέγξουν την αστοχία του πετρώματος και επομένως τη διόγκωση των πετρωμάτων πολύ καλά στα σκληρά πετρώματα (όταν οι πιέσεις είναι σχετικά χαμηλές έως μέτριες). Σε περίπτωση πρόκλησης rockburst ή όταν η τάσεις είναι υψηλές, οι ήλοι μπορεί να αστοχήσουν (συνήθως στο σπειροειδές τμήμα) και να χάσουν τη λειτουργικότητά τους, αλλά εξακολουθούν να αποτελούν ενίσχυση σε ένα βαθμό. Ωστόσο, αν προστεθούν εύκαμπτοι ήλοι στο σύστημα υποστήριξης, τότε σχηματίζεται ένα αμυντικό σύστημα δύο επιπέδων. Οι συμβατικοί ήλοι (ως στατική / άκαμπτη υποστήριξη) θα ενισχύσουν τη βραχόμαζα για να εξασφαλίσουν ότι δε θα αστοχήσει πρώιμα. Όταν προκύψει αστοχία, οι εύκαμπτοι ήλοι (ως δυναμική υποστήριξη) θα εξασφαλίσουν ότι το θραυσμένο πέτρωμα θα διατηρηθεί ελεγχόμενο. Αν κάποιος μπορούσε να αναπτύξει έναν ιδανικό ήλο, τότε αυτός θα έπρεπε να έχει υψηλή αρχική φέρουσα ικανότητα και ακαμψία για στατική φόρτιση, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και παραλαβής μετατοπίσεων για δυναμική φόρτιση. Στην πραγματικότητα, ένας τέτοιος ιδανικός ήλος δεν υπάρχει και είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναπτυχθεί.

Ομοίως, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν επιφέρει αποτελέσματα, αλλά ότι κατά την πρόκληση του rockburst εκτοξεύεται μαζί με τα τεμάχια του πετρώματος. Παρά αυτή τη συγκεκριμένη άποψη μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μέρος της υποστήριξης τόσο για την ενίσχυση της αδύναμη σύνδεσης μεταξύ των ηλώσεων και του πλέγματος και μπορεί να εμποδίσει την κίνηση των μπλοκ και ως εκ τούτου να ενισχύσει τη συνολική ακεραιότητα της βραχόμαζας. Είναι γνωστό ότι για ολοκληρωμένη υποστήριξη, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ένα πολύ χρήσιμο στοιχείο στο σύστημα και πρέπει να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στο σύστημα υποστήριξης. Προκειμένου να αποφευχθεί η εκτόξευση σκυροδέματος με τεμάχια της βραχόμαζας, μπορεί να εξεταστεί η εφαρμογή πλέγματος. Πολύ συχνά, οι εύκαμπτοι ήλοι και το πλέγμα είναι εγκατεστημένα πάνω από το εφαρμοσμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, το πρόβλημα της εκτόξευσης του σκυροδέματος μπορεί να επιλυθεί.

Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να κατανοηθούν οι τρεις βασικές δράσεις (ενίσχυση, διατήρηση και συγκράτηση) κάθε στοιχείου υποστήριξης. Ορισμένα στοιχεία υποστήριξης έχουν πολλαπλούς ρόλους όσον αφορά τις τρεις λειτουργίες υποστήριξης και μπορεί να είναι ισχυρές σε μία πτυχή και αδύναμες σε άλλες.

Είναι απαραίτητο να συνδυαστούν διάφορα στοιχεία υποστήριξης για να μεγιστοποιηθούν οι δυνατότητές τους για υποστήριξη. Είναι σημαντικό να συνδυαστεί η ευκαμψία και η ακαμψία έτσι ώστε το σύστημα υποστήριξης να συμπεριφέρονται σαν ένα άκαμπτο σύστημα όταν χρειάζεται

ακαμψία και να αλλάζει σαν εύκαμπτο όταν χρειάζεται ευκαμψία. Στα περισσότερα μεγάλου βάθους ορυχεία, ο συνδυασμός της ευκαμψίας και της ακαμψίας ή η χρήση ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης πραγματοποιείται μέσω ενός διπλού συστήματος (Εικόνα 21). Στο πρώτο στάδιο, οι ήλοι και το πλέγμα εγκαθίστανται αμέσως μετά την εκσκαφή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάνω από το πλέγμα όταν διασχίζονται ζώνες ολίσθησης. Το δεύτερο σύστημα υποστήριξης, το οποίο αποτελείται από εύκαμπτους ήλους και πλέγμα, εγκαθίσταται πάνω από το πρώτο σύστημα υποστήριξης. Με αυτό τον τρόπο, το ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης θα έχει τα χαρακτηριστικά τόσο των άκαμπτων όσο και των εύκαμπτων στοιχείων υποστήριξης (Cai, 2013).



Εικόνα 21: Ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης (Cai, 2013).

#### 4.2.4 Απλότητα

Καθώς το rockburst είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο, ορισμένοι μηχανικοί τείνουν να πιστεύουν ότι απαιτείται ένας πολύπλοκος σχεδιασμός υποστήριξης. Στην πραγματικότητα, η υποστήριξη του rockburst δεν πρέπει απαραίτητως να είναι περίπλοκη. Η εφαρμογή της αρχής της απλότητας σημαίνει ότι τα στοιχεία υποστήριξης πρέπει να είναι σχετικά εύκολο να κατασκευαστούν, να εγκατασταθούν και να διατηρηθούν. Ανεξάρτητα από το πόσο αποτελεσματικό είναι, εάν ένα στοιχείο υποστήριξης είναι πολύπλοκο στην κατασκευή και το κόστος είναι πολύ υψηλό, τότε καθίσταται δύσχρηστο. Ακόμη εάν η εγκατάσταση και η παραγωγή επηρεάζονται δυσμενώς, η αποδοχή αυτού του είδους υποστήριξης θα είναι ανεπιθύμητη για τους εργαζόμενους.

Η απλότητα ξεκινά με το σχεδιασμό της θεμελιώδους λειτουργίας μιας συνιστώσας υποστήριξης. Τα καλύτερα σχέδια υποστήριξης rockburst περιλαμβάνουν μόνο τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων και για να διασφαλιστεί η σταθερότητα των εκσκαφών με το ελάχιστο κόστος. Είναι σημαντικό να μη θυσιάζεται η απλότητα για ένα λιγότερο σημαντικό χαρακτηριστικό στο σύστημα υποστήριξης (Cai, 2013).

#### 4.2.5 Κόστος και όφελος

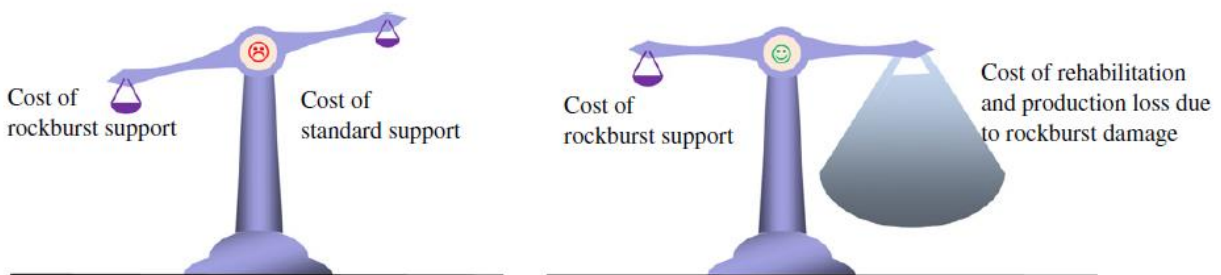
Η ανάλυση κόστους- οφέλους στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει δύο έννοιες. Το σύστημα υποστήριξης δεν πρέπει να κοστίζει πολλά χρήματα και σε περίπτωση που η χρήση της υποστήριξης αυτής μπορεί να κοστίσει επιπλέον χρήματα, είναι χρήματα που δαπανώνται σωστά καθώς μελλοντικά σε μία πιθανή εκδήλωση rockburst, γίνεται απόσβεση των χρημάτων αυτών.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι κάνοντας μια υπόγεια κατασκευή ασφαλή και αξιόπιστη θα κοστίσει αρκετά. Όταν συμβαίνει ένα rockburst, συνήθως έρχεται αιφνιδιαστικά. Η συνέπεια του rockburst μπορεί να είναι ακραία και κυμαίνεται από την καταστροφή στο υπόγειο άνοιγμα που απαιτεί αποκατάσταση, καταστροφή στον εξορυκτικό εξοπλισμό, απώλεια παραγωγής, μόνιμη απώλεια μεταλλεύματος, τραυματισμό και θάνατο εργαζόμενου. Εάν ένας εργαζόμενος θανατωθεί από μια εκδήλωση rockburst, η παραγωγή θα μπορούσε να διακοπεί για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια μιας μακράς έρευνας. Μολονότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να ανατεθεί ένας αριθμός κόστους για ένα περιστατικό τραυματισμού ή θανάτου των εργαζομένων, το άμεσο κόστος που σχετίζεται με θανάτους και τραυματισμούς μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλό. Επιπλέον, όταν συμβαίνει ένα μεγάλο rockburst, μπορούν να καταστραφούν εξοπλισμοί εξόρυξης πολλών εκατομμυρίων. Όταν μια κρίσιμη πρόσβαση, όπως η ράμπα, έχει υποστεί σοβαρές ζημιές, συχνά σημαίνει απώλεια παραγωγής για μήνες και η απώλεια εσόδων συνοδεύεται από δαπανηρή αποκατάσταση.

Εκτιμάται ότι το κόστος αποκατάστασης είναι 10-20 φορές υψηλότερο από το αρχικό κόστος σε υπόγεια ορυχεία σκληρού πετρώματος. Όταν συμβαίνει ένα rockburst, μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση των τοιχωμάτων της εκσκαφής, με αποτέλεσμα την αυξημένη αραιώση του μεταλλεύματος, η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε πρόσθετο κόστος για τη μετακίνηση και την επεξεργασία των στείρων. Εάν ένα ορυχείο εμφανίζει επαναλαμβανόμενα θύματα και τραυματισμούς εξαιτίας κάποιου rockburst, μπορεί να επηρεάσει την εμπιστοσύνη των εργαζομένων.

Ως εκ τούτου, οι συνέπειες του rockburst πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό ορυχείων ή σηράγγων χρησιμοποιώντας ανάλυση κόστους- οφέλους. Η ανάλυση κόστους-οφέλους που συγκρίνει τις οικονομικές επιπτώσεις του rockburst στην βασική περίπτωση του σχεδιασμού υποστήριξης πρέπει να αποτελέσει βασική απαίτηση για το σχεδιασμό του έργου. Το κόστος εκμετάλλευσης πρέπει να λαμβάνει υπόψιν το απροσδόκητο κόστος που οφείλεται στο rockburst σε βαθιά ορυχεία. Για τον σχεδιασμό της υποστήριξης, η ανάλυση κόστους-οφέλους μπορεί να υπολογίσει τον τυπικό σχεδιασμό υποστήριξης, συμπεριλαμβανομένου του κόστους αστάθειας λόγω rockburst.

Το κόστος ενός συστήματος δυναμικής υποστήριξης που διαρρέει μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερο σε σύγκριση με αυτό της τυπικής υποστήριξης, αλλά η δαπανηρή αποκατάσταση, η χαμένη παραγωγή και ενδεχομένως η προσφυγή σε δικαστικές διαδικασίες μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση των σωστών συστημάτων υποστήριξης. Το βασικό σημείο είναι ότι αν η τιμή για τις καταστροφές από το rockburst είναι υψηλή, το κόστος της πρόληψής της, με τη χρήση ανθεκτικού στο rockburst συστήματος στήριξης, μπορεί να είναι αξιοσημείωτα χαμηλό. Αυτό το σημείο απεικονίζεται στην Εικόνα 22. Μία μικρή αύξηση του κόστους του υλικού για τη χρήση υποστήριξης rockburst μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικά χρήματα εξαλείφοντας τη δαπανηρή αποκατάσταση και τη διακοπή της παραγωγής.



Εικόνα 22: Ανάλυση κόστους- οφέλους για δυναμική υποστήριξη (Cai, 2013).

Εντούτοις, δεν είναι απαραίτητο να γίνεται εγκατάσταση υποστήριξης rockburst παντού σε ένα ορυχείο, επειδή αυτό θα μπορούσε να είναι υπερβολικά δαπανηρό. Ως εκ τούτου, πρέπει να είναι γνωστό ή να προβλέπεται πού θα μπορούσε να προκύψει αστοχία από rockburst.

Δυστυχώς, η εκτεταμένη αξιολόγηση του κινδύνου εκδήλωσης rockburst βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και σε συνδυασμό με τη σύνθετη φύση της βραχώμαζας και της συμπεριφοράς της εκσκαφής, η μεταλλευτική βιομηχανία θα πρέπει να στηριχθεί σε μεγάλο βαθμό στην υποστήριξη για να μετριάσει την αβεβαιότητα ως προς τη θέση και τη σοβαρότητα της αστοχίας της βραχώμαζας εξαιτίας ενός τέτοιου γεγονότος (Cai, 2013).

#### 4.2.6 Πρόβλεψη και προσαρμογή

Οι γεωτεχνικές συνθήκες που μπορούν να προκαλέσουν rockburst διαφέρουν και μπορεί να μεταβάλλονται συνεχώς. Δεν είναι δυνατό να γίνει ακριβής πρόβλεψη, αλλά δεν είναι ρεαλιστικό να υπάρχει μόνο ένας σταθερός σχεδιασμός που δεν μπορεί να αλλάξει. Γενικά, η επιλογή ενός συγκεκριμένου συστήματος υποστήριξης εξαρτάται από τις συνθήκες του πετρώματος που συναντώνται, την αλληλουχία εξόρυξης, το διαθέσιμο υλικό και την εμπειρία των μηχανικών και του υπόλοιπου προσωπικού στην περιοχή του ορυχείου.

Στην πραγματικότητα δε χρειάζεται μόνο γνώση της φέρουσας ικανότητας των ηλώσεων, αλλά και γνώση των αναμενόμενων δυναμικών απαιτήσεων (φόρτιση, μετατόπιση και ενέργεια). Ένα καλό σύστημα δυναμικής υποστήριξης είναι εκείνο που θα σταθεροποιήσει την εκσκαφή για τις αναμενόμενες συνθήκες όχι μόνο κατά τη διαδικασία της εκσκαφής αλλά και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έργου.

Η προσαρμοστικότητα είναι η ικανότητα ενός συστήματος να προσαρμόζεται αποτελεσματικά και γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες. Εάν ένας σχεδιασμός συστήματος υποστήριξης δεν μπορεί να προσαρμοστεί στην μεταβαλλόμενη κατάσταση της βραχομάζας, δεν πρόκειται να είναι καλός σχεδιασμός και η εγκατεστημένη υποστήριξη μπορεί να μην είναι σε θέση να επιβιώσει σε ξαφνική εκδήλωση μεγάλου rockburst.

Η τέχνη της υποστήριξης του πετρώματος που είναι επιρρεπές σε rockburst δεν είναι να βασιστεί κάποιος στην πιθανότητα να μην προκύψει απρόσμενη συμπεριφορά της βραχομάζας, αλλά στην ετοιμότητα σε περίπτωση που συμβεί rockburst (Cai, 2013).



### 4.3 Κριτήρια σχεδιασμού υποστήριξης

Η υποστήριξη λόγω εκδήλωσης φαινομένου rockburst διαφέρει από τη συμβατική υποστήριξη, όπου ελέγχονται οι καταπτώσεις και η συγκράτηση της ζώνης χαλάρωσης. Επιπλέον, σε αυτά τα ζητήματα σχεδιασμού είναι απαραίτητη η συγκράτηση της δυναμικής ενέργειας που απελευθερώνεται και της μεγάλης διόγκωσης εξαιτίας της βίαιης καταστροφής (βλ. Κεφ. 4.2).

Η κλασική προσέγγιση στον σχεδιασμό αξιολογεί το επίπεδο ασφαλείας μέσω του συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή της αναλογίας μεταξύ της δύναμης αντίστασης και της καταστροφικής τάσης. Στο σχεδιασμό υποστήριξης για επιρρεπή σε έκρηξη πετρώματα ακολουθείται η ίδια προσέγγιση, αλλά η αντοχή πρέπει να αξιολογείται ως προς το φορτίο, τις μετακινήσεις και την κατανομή ενέργειας.

Αρχικά, υπολογίζεται η αναμενόμενη κατάσταση φόρτισης, στη συνέχεια διαστασιολογούνται και ενσωματώνονται τα στοιχεία στήριξης της υποστήριξης για να επιτευχθεί η επιθυμητή ικανότητα στήριξης.

Ο σχεδιασμός επηρεάζεται από το μέγεθος και το σχήμα της εκσκαφής, τις ιδιότητες της βραχώμαζας, τις επί τόπου και τις επαγόμενες της εξόρυξης τάσεις, τη σεισμική πηγή και τα χαρακτηριστικά της. Τα παρακάτω κριτήρια πρέπει να αξιολογούνται ταυτόχρονα για την επίτευξη της τελικής υποστήριξης.

a) Συντελεστής ασφαλείας

Σε γενικές γραμμές, ο συντελεστής ασφαλείας καλύπτει το σχεδιασμό τόσο για στατικά όσο και δυναμικά φορτία. Υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης, η δυναμική επιτάχυνση μπορεί να αυξηθεί και να ξεκινήσουν μετακινήσεις. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί παραμορφώσιμη υποστήριξη για να απορροφηθεί ένα μέρος της ενέργειας μέχρι η στατική κατάσταση να πέσει κάτω από το επίπεδο της ικανότητας φόρτισης της υποστήριξης.

b) Μετακινήσεις

Ακόμα κι αν εγκατασταθεί ένα αποτελεσματικό σύστημα υποστήριξης, δεν μπορεί να αποφευχθεί η αστοχία εάν οι πιέσεις είναι μεγαλύτερες από την αντοχή της βραχώμαζας. Όταν ένα πέτρωμα αστοχεί, αυξάνεται ο όγκος του. Η αύξηση του όγκου στην εφαπτομενική κατεύθυνση φόρτισης είναι περιορισμένη και το πέτρωμα που έχει αστοχήσει μπορεί να παραμορφωθεί μόνο στην "ακτινική" κατεύθυνση της εκσκαφής, οδηγώντας σε μεγάλες παραμορφώσεις όγκου κοντά στα τοιχώματα.

c) Ενέργεια

Όταν ένα κομμάτι βράχου εκτοξεύεται από το όριο της εκσκαφής, διαθέτει κινητική ενέργεια. Ως εκ τούτου, η σχεδιασμένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του συστήματος υποστήριξης πρέπει να ανταποκρίνεται ή να υπερβαίνει την ενέργεια του βράχου.

d) Συμβατότητα συστήματος

Τα προηγούμενα τρία κριτήρια σχεδιασμού μπορούν να λειτουργήσουν με σκοπό την ικανότητα σχεδιασμού τους, εάν τα στοιχεία υποστήριξης της επιφάνειας είναι ισχυρά και μπορούν να μεταφέρουν αποτελεσματικά τα φορτία στα στοιχεία ενίσχυσης και συγκράτησης. Υπάρχει μια ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων ενίσχυσης και συγκράτησης και των στοιχείων υποστήριξης της επιφάνειας. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία

ενίσχυσης/ συγκράτησης εξαρτώνται από την ικανότητα των επιφανειακών στοιχείων στήριξης, και η ικανότητα των στοιχείων στήριξης της επιφάνειας εξαρτάται επίσης από την ικανότητα, καθώς και την απόσταση μεταξύ των στοιχείων ενίσχυσης/ συγκράτησης.

Ένα βέλτιστο σύστημα υποστήριξης είναι αυτό με συμβατά και ισορροπημένα στοιχεία υποστήριξης, όπου όλα τα στοιχεία υποστήριξης λειτουργούν αρμονικά για να συνεισφέρουν στο έπακρο. Τα στοιχεία συγκράτησης και τα επιφανειακά στοιχεία στήριξης του συστήματος πρέπει να είναι συμβατά με το φορτίο και την παραμόρφωση του πετρώματος, και η ικανότητα του στοιχείου συγκράτησης πρέπει να είναι συμβατή με την ικανότητα του στοιχείου στήριξης της επιφάνειας.

Στο σχεδιασμό οι εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού χρησιμοποιούνται συχνά, αλλά είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το φορτίο, η μετατόπιση και οι ενεργειακές μεταβολές είναι συμβατές με εκείνες των στοιχείων ενίσχυσης / συγκράτησης (Kaiser, 2012).

### 4.3 Σχεδιασμός υποστήριξης

Η γεωλογία των ορυχείων και οι υποδομές είναι πολύπλοκες και τρισδιάστατες. Επί του παρόντος, στην εξόρυξη, επιλέγεται είτε η δυναμική υποστήριξη με βάση την εμπειρία σε συγκεκριμένη τοποθεσία είτε την παγκόσμια εμπειρία ή το σχέδιο εκτελείται χρησιμοποιώντας συχνά απλούς υπολογισμούς. Ωστόσο, ο σχεδιασμός της υποστήριξης δεν μπορεί να διεξαχθεί συστηματικά χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η γεωλογική πολυπλοκότητα. Επιπλέον, όταν εκτελούνται χειροκίνητα τέτοιοι σχεδιασμοί που καταναλώνουν χρόνο και προσπάθεια, μπορεί να γίνουν δαπανηρά λάθη εάν δεν υπάρχει προσοχή στην αλληλεπίδραση των διαφόρων παραγόντων επιρροής που περιγράφονται παραπάνω. (Kaiser, 2012). Η διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης απαιτεί υπολογισμούς για την εκτίμηση της επάρκειάς τους. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται σε κατάλληλα προσομοιώματα. Προσομοίωμα της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υπόγειου έργου είναι η εξιδανίκευση του, ώστε να επιδέχεται απλή λογική μαθηματική λύση δίχως να χάνει τα ουσιώδη στοιχεία του πρωτοτύπου. Παραδοσιακά, οι μεν φορείς και τα δρώντα φορτία προσομοιώνονται με πλήρως ορισμένες, απλές γεωμετρικές ή αναλυτικές αναπαραστάσεις, ο δε χαρακτηρισμός του υλικού θεωρείται ότι είναι πλήρης, με τις εγγενείς ιδιότητες να λαμβάνονται σταθερές και μονοσήμαντα ορισμένες. Ωστόσο, ούτε οι γεωμετρικές συνθέσεις ούτε οι εγγενείς ιδιότητες του υλικού είναι πλήρως γνωστές. Μεταξύ αυτών είναι οι αβεβαιότητες σε σχέση με την έκταση στρωμάτων, αντοχή του πετρώματος, δομή, εξαλλοίωση, διήθηση, φυσικό εντατικό πεδίο, ορυκτολογική σύσταση, δυναμικές δράσεις, τοξικά και επικίνδυνα υλικά, θέρμη και ψύχος, πήξη και τήξη, χημικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες, εργασιμότητα, κλπ. Περαιτέρω, τα δομικά υλικά περιέχουν μικροκρυσταλλικές ατέλειες, από όπου εκκινούν ρωγμές ή επιτρέπουν τη διάδοσή τους. Σχεδόν όλες οι γεωμετρικές αναπαραστάσεις, δρώντα φορτία, ιδιότητες υλικών, και ατέλειες είναι τυχαίες, και όλα τα συστήματα δύνανται συχνά να υποβληθούν σε υπερφορτίσεις (Σοφιανός, 2018).

#### 4.4 Ηλώσεις σε συνθήκες rockburst

Το πέτρωμα γύρω από το άνοιγμά του δεν έχει γενικά τη δυνατότητα να παραλαμβάνει σημαντικές εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις. Η αδυναμία αυτή, όπως και στο σκυρόδεμα, δύναται να αντιμετωπίζεται με τη χρήση παθητικών ήλων (διαμηκών ράβδων), σε ολόσωμη επαφή με το πέτρωμα, που λειτουργούν ως οπλισμός. Ειδικά, όταν οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε, είτε η εγκατάσταση της στήριξης να μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ κοντά σε προχωρούν μέτωπο είτε να αναμένονται μεταβολές της τάσης σε μεταγενέστερο στάδιο εξόρυξης, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι παθητικοί ήλοι στη θέση των ενεργητικών. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ αυτών είναι ότι οι ενεργητικοί εφαρμόζουν μια προένταση στο πέτρωμα, ενώ η ενεργοποίηση της έντασης στους παθητικούς ήλους εξαρτάται από την παραμόρφωση του πετρώματος.

Η εσωτερική στήριξη του πετρώματος επιτυγχάνεται με γραμμικά, κυρίως μεταλλικά, στοιχεια-ράβδους, τα οποία το ενισχύουν ή το στηρίζουν αναλαμβάνοντας εφελκυστικές και διατμητικές δυνάμεις εντός αυτού, συνδέοντας ή/και συμπιέζοντάς το. Αναπτύσσονται οι τύποι των παθητικών αυτών στοιχείων, η τοποθέτησή τους, η δράση τους και οι έλεγχοί τους (Σοφιανός, 2018).

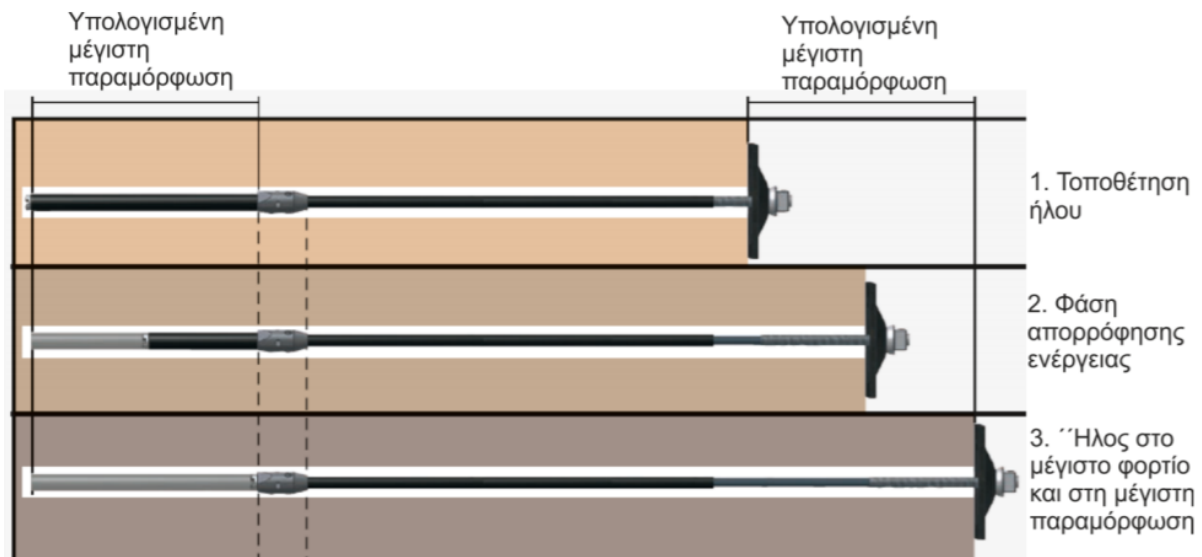
Οι συμβατικές ηλώσεις, όπως η πάκτωση των ήλων με ρητίνη ή με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές υπό συνθήκες υψηλών τάσεων με συγκλίσεις μέτρου μεγέθους. Σε συνθήκες όπως αυτή του rockburst ο ρόλος των ήλων είναι να παραλαμβάνουν τα φορτία και να έχουν την ικανότητα να παραμορφωθούν και να μετακινηθούν παράλληλα με τις μετακινήσεις του πετρώματος σε συνδυασμό με μία δύναμη αντίστασης. Έτσι, το αποτέλεσμα είναι ο έλεγχος των μετακινήσεων και οι λιγότερες καταστροφές στις εκσκαφές.

##### 4.4.1 Ήλος τμηματικής πάκτωσης

Είναι ήλος σημειακής πάκτωσης με τσιμεντένεμα. Επιτρέπει την ελεύθερη παραμόρφωση του ήλου σε ενδιάμεσο τμήμα του, έτσι ώστε να δύναται να μηκύνεται περισσότερο. Είναι ίδιος με τους συνήθεις παθητικούς ήλους, και το τσιμεντένεμα γεμίζει, εξ αρχής, το σύνολο του μήκους του διατρήματος. Όμως, η ράβδος είναι πλήρως πακτωμένη σε ένα μόνο τμήμα, προς το τυφλό άκρο του μήκους της διάτρησης, ενώ κατά το υπόλοιπο μήκος της είναι τοποθετημένη μέσα σε πλαστικό χιτώνιο ώστε να μπορεί να παραμορφώνεται ελεύθερα. Σκοπός του ήλου είναι να μεταφέρει εφελκυστικές δυνάμεις σε απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος. Λόγω της προστασίας του από το χιτώνιο και το τσιμεντένεμα, υπερτερεί άλλων ήλων ως προς την μακροπρόθεσμη προστασία του από τη διάβρωση.

Ο ήλος Roofex της Atlas Corco είναι μία ράβδος από υψηλής ποιότητας χάλυβα μέσα σε ένα λείο πλαστικό περίβλημα. Στερεώνεται στο εσωτερικό γεώτρησης με τσιμέντο ή ένεμα ρητίνης. Ο ήλος διαθέτει έναν απορροφητή ενέργειας ο οποίος λειτουργεί ως ένα στοιχείο πάνω στη χαλύβδινη ράβδο, το οποίο ολισθαίνει. Κατά τη διάρκεια απότομης μετατόπισης, όπως έκρηξη πετρώματος ή σεισμικό γεγονός ο ήλος εκτείνεται προς τα έξω, εξακολουθώντας να παρέχει σταθερό φορτίο. Η δυνατότητα

αυτή καθιστά τον ήλο κατάλληλο για την ανάπτυξη νέων, βαθιών υπόγειων εκσκαφών σε κακής ποιότητας βραχομάζα ή σε περιοχές όπου είναι συχνές εκρήξεις πετρώματος ή σεισμικά γεγονότα.

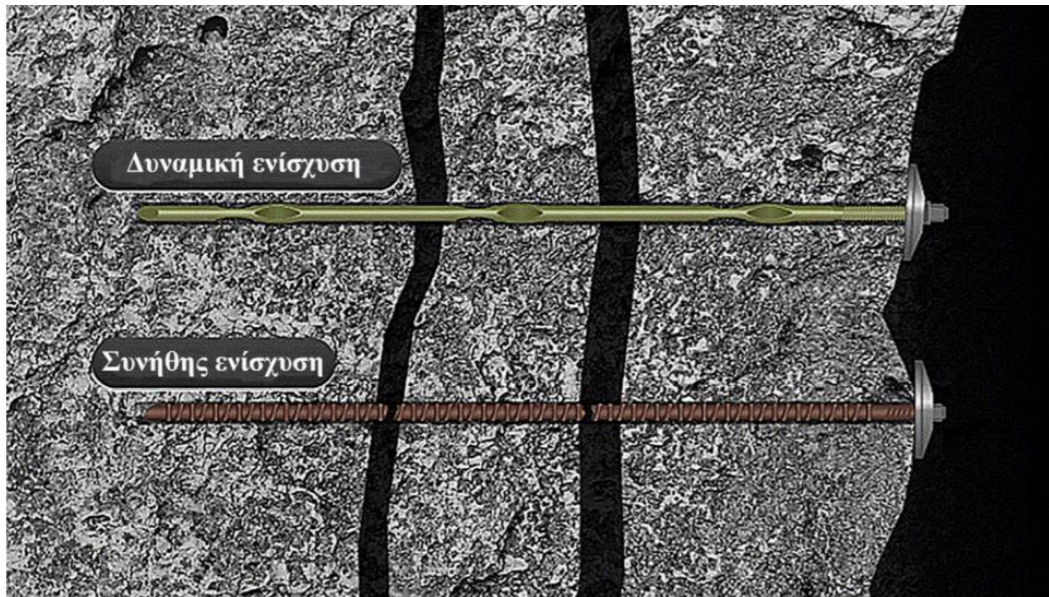


Εικόνα 23: Λειτουργία ήλου Roofex ( Σοφιανός, 2018)

Το στέλεχος του είναι λεία ράβδος χάλυβα με έναν αριθμό θέσεων ειδικής διαμόρφωσης κατά το μήκος του. Τυπικά υπάρχουν 3 ή 4 θέσεις διαμόρφωσης, σε οβάλ ζεύγη. Παρασκευάζεται από ειδικό χάλυβα υψηλής αντοχής και ολκιμότητας, σε διαμέτρους 20.5 και 22.2mm και μήκη από 1.8 έως 3.2m. Το στέλεχος, πακτώνεται με το ένεμα στις θέσεις διαμόρφωσης. Τα λεία τμήματα μεταξύ των θέσεων αυτών δύνανται να παραμορφώνονται ελεύθερα όταν η ράβδος ανθίσταται στη διαστολή του πετρώματος. Επομένως, κατά τη ρωγμάτωση του πετρώματος, η μήκυνση του ήλου μοιράζεται στο μεγαλύτερο μήκος μεταξύ των πακτώσεων, αντί στο μήκος εκατέρωθεν της ρωγμής, με αποτέλεσμα να μη θραύεται.

Η χρήση του είναι κατάλληλη για:

- κατακερατισμένα ή συνθλιβόμενα πετρώματα όπου αναμένονται μεγάλες μετατοπίσεις, έως και πάνω από 300mm προσφέροντας αντίσταση έως και 150kN, και
- για συνθήκες δυναμικές, όπως εκρήξεις πετρώματος (rockbursts) σε συνθήκες υψηλού εντατικού πεδίου και καταπτώσεις σκληρών πετρωμάτων, προσφέροντας αντίσταση έως και 200kN.



Εικόνα 24: Δυναμική και συνήθης ενίσχυση (Σοφιανός, 2018)

#### 4.4.2 Συστελλόμενος ήλος

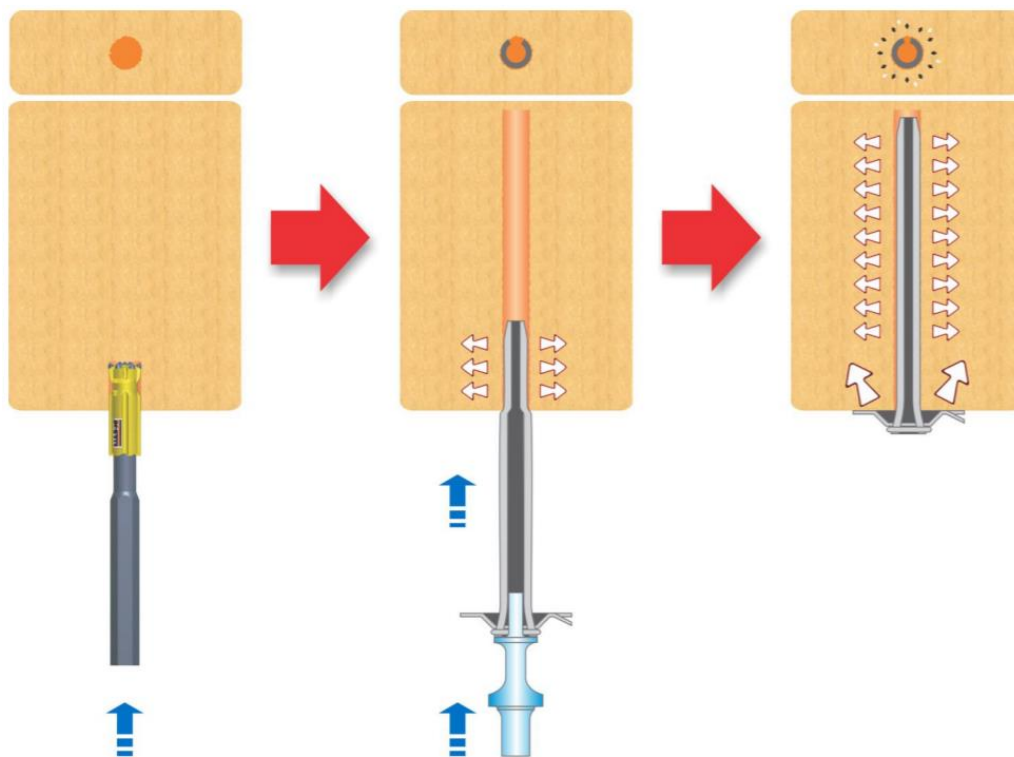
Είναι ήλος ολόσωμης σύζευξης διά τριβής. Το στέλεχος είναι ράβδος σχιστού κατά γενέτειρα σωλήνα από χάλυβα υψηλής αντοχής και σκληρότητας, που εισάγεται με πίεση ή και κρούσεις σε διάτρημα ελαφρώς μικρότερης διαμέτρου. Ο συγκεκριμένος δύναται να χρησιμοποιείται για την ώθηση αερόσφυρας με πόδι ανύψωσης. Η ακτινική ελαστική πίεση που δημιουργείται από τη συστολή του διαιρεμένου σωλήνα, παρέχει αντίσταση τριβής καθ' όλο το μήκος του. Το ελεύθερο άκρο του, μέσω πλάκας διανομής, στερεώνεται στα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Η ικανότητά του εξαρτάται από την αντοχή του πετρώματος ώστε να συσφίγγεται ο σχισμένος σωλήνας.

Προσφέρεται για ανθεκτικά ρωγματωμένα πετρώματα και λειτουργεί αμέσως μετά την έμπηξη, αλλά μειονεκτεί λόγω της χαλάρωσης που μπορεί να επέλθει αργότερα.



Εικόνα 25: Συστελλόμενος ήλος (Σοφιανός, 2018)

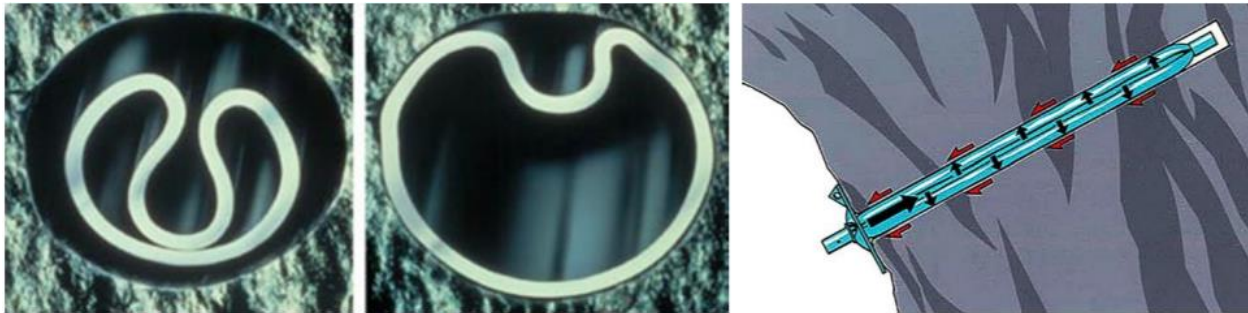
Στα πλεονεκτήματά του συμπεριλαμβάνονται η εύκολη τοποθέτηση, η άμεση ανάληψη φορτίου και η εγκατάστασή του με χρήση συνήθους εξοπλισμού, όπως αερόσφουρα με πόδι ώθησης ή διατρητικό φορείο. Μειονεκτήματά του είναι το σχετικά μεγάλο κόστος, η απαίτηση για ακρίβεια στη διάμετρο του διατρήματος, το περιορισμένο μήκος, και η λειτουργία του γενικά ως προσωρινού μέτρου. Παρασκευάζονται σε μήκη από 0.9 έως 3.6 m, σε διαμέτρους προ της εισαγωγής 33, 39 και 46 mm, με μέσες αντοχές σε θραύση 105÷150 kN, και εισέρχονται σε διατρήματα διαμέτρου 1÷3mm μικρότερης από του ήλου. Ο τυπικός χρόνος εγκατάστασης ήλου μήκους 1.8m, εξαιρουμένου του χρόνου διάτρησης, είναι 40 s. Επειδή η εγκατάστασή του είναι πολύ γρήγορη και απλή, έχει γίνει παγκόσμια αποδεκτός στα ορυχεία. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε περιβάλλοντα ήπιων εκρήξεων πετρωμάτων, γιατί ολισθαίνει αντί να θραύεται, και όταν συνδυάζεται με πλέγμα κατακρατεί τα παραγόμενα θραύσματα. Η διάβρωση παραμένει ένα από τα κύρια προβλήματα αυτών των ήλων, καθώς η προστασία με ένεμα της εξωτερικής επιφάνειάς τους δεν είναι εύκολα εφικτή. Ο γαλβανισμός του σωλήνα βοηθά στη μείωση της διάβρωσης, αλλά δεν αποτελεί πάντα προστατευτικό μέτρο για τη μακροπρόθεσμη εφαρμογή σε επιθετικά περιβάλλοντα. Ο τύπος SS39 (Ingersoll Rand) διατίθεται και από ανοξείδωτο χάλυβα. Παρασκευάζεται επίσης ήλος αυτού του τύπου που τοποθετείται κατά την ανόρυξη του διατρήματος με χρήση αναλώσιμης κοπτικής κεφαλής.



Εικόνα 26: Τοποθέτηση ήλου τριβής (Σοφιανός, 2018)

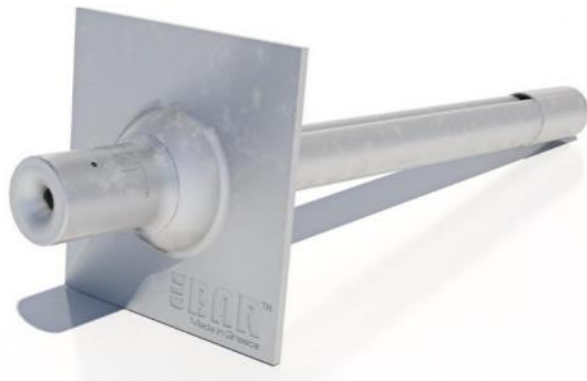
#### 4.4.3 Διαστελλόμενος ήλος

Είναι ήλος ολόσωμης σύζευξης δια τριβής. Επινοήθηκε από την Atlas Corco που του προσέδωσε την ονομασία Swellex TM. Σήμερα παρασκευάζεται από πληθώρα βιομηχανιών (σύνδεσμος) (σύνδεσμος). Αποτελείται από: (1) σωληνωτό στέλεχος όλκιμου χάλυβα υψηλής αντοχής που επιτρέπει σημαντική παραμόρφωση χωρίς απώλεια αντοχής, (2) διαμόρφωση στο εσωτερικό άκρο, και (3) πλάκα και εξωτερική βαλβίδα στο εξωτερικό άκρο. Έχει διάμετρο  $41 \div 54$  mm, αλλά διαμορφώνεται διπλωμένος σε μικρότερη διάμετρο  $26 \div 36$  mm, ώστε να μπορεί να εισάγεται σε διάτρημα διαμέτρου 35 έως 51 mm χωρίς δύναμη ώθησης. Παρασκευάζεται σε μήκη μέχρι  $8 \div 12$  m, δύναται δε να επεκταθεί με σύνδεση επιμέρους στοιχείων. Ο ήλος ενεργοποιείται, μετά την είσοδό του στο διάτρημα, με την άντληση εντός αυτού νερού υπό υψηλή πίεση (περίπου 30 MPa), η οποία διαστέλλει το διπλωμένο σωλήνα ώστε να έρθει σε στενή επαφή και να ασκήσει πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος. Κατά την ακτινική διαστολή τους συστέλλονται αξονικά με αποτέλεσμα να αναπτύσσουν εφελκυστικό φορτίο που ασκεί μέσω της πλάκας θλίψη στο πέτρωμα της τάξης των 20 kN. Ο τυπικός χρόνος εγκατάστασης ήλου μήκους 2.4 m, εξαιρουμένου του χρόνου διάτρησης, είναι 25 s. Δεδομένου ότι η εξωτερική επιφάνεια του ήλου είναι σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα του διατρήματος, υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης. Γι' αυτό παρασκευάζονται και ήλοι με ασφαλική ή πλαστική επίστρωση ανθεκτική στη διάβρωση.

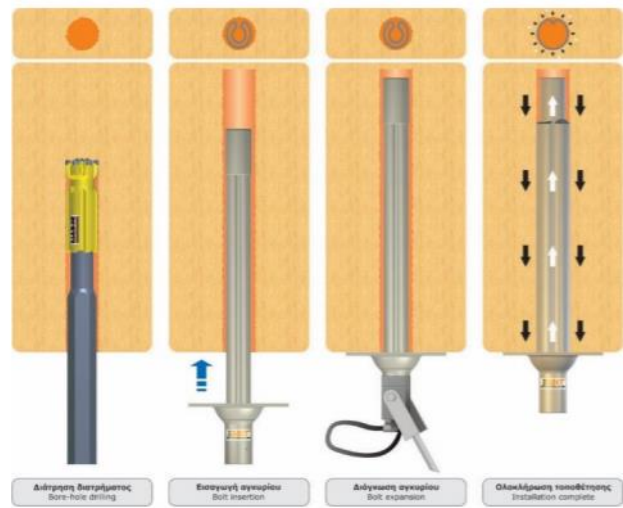


Εικόνα 27: Ήλος εντός διατρήματος (Σοφιανός, 2018)

Οι ήλοι έχουν όρια διαρροής από 100 έως 200 kN, και η ονομαστική μήκυνση θραύσης τους είναι γενικά 10%, με τη σειρά μαγγάνιου να φτάνει το 20%. Η ικανότητα του ήλου καθορίζεται από την εφελκυστική αντοχή του χαλυβδосωλήνα και την τριβή που αναπτύσσει αυτός με το περιβάλλον πέτρωμα, αλλά και από την ενδεχόμενη μακροπρόθεσμη χαλάρωσή του όταν βρίσκεται σε πηλίτες και ασθενείς σχιστόλιθους ή υποβάλλεται σε δονήσεις. Η λειτουργία του συνίσταται στην ανάληψη εφελκυστικών δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο του και στην ενίσχυση του πετρώματος με τις τάσεις συμπίεσης και τριβής. Η ικανότητά του ανάληψης διατμητικών τάσεων είναι μειωμένη σε σχέση με τους ολόσωμους ήλους. Είναι κατάλληλος για μέτρια έως ισχυρά πετρώματα, και είναι αποτελεσματικός στην συγκράτηση διαμορφούμενων σφηνών σε σκληρές βραχομάζες λόγω της άμεσης δράσης του. Δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της εγκατάστασης πλεγμάτων πέριξ της διατομής της σήραγγας. Πλεονεκτήματά του είναι η γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση, η άμεση λειτουργία, και η δυνατότητα λειτουργίας σε πληθώρα γεωλογικών σχηματισμών. Μειονεκτήματά του είναι το σχετικά μεγάλο κόστος και η γενικά προσωρινή λειτουργία.



(α) (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).



Εικόνα 28: Διαστελλόμενος ήλος (Σοφιανός, 2018)



## Κεφάλαιο 5. Προσομοίωση ακαριαίας διάρρηξης με κώδικα διακριτών στοιχείων

### 5.1 Universal Distinct Element Code (UDEEC)

Το UDEC είναι ένα διδιάστατο αριθμητικό πρόγραμμα που βασίζεται στη μέθοδο διακριτών στοιχείων. Το UDEC προσομοιώνει την απόκριση των ασυνεχών μέσων (όπως η ασυνεχής βραχώμαζα) που υπόκεινται είτε σε στατική είτε σε δυναμική φόρτιση. Το ασυνεχές μέσο προσομοιώνεται ως μία συνένωση διακριτών μπλοκ. Οι ασυνέχειες αντιμετωπίζονται ως οριακές συνθήκες μεταξύ των μπλοκ. Οι μεγάλες μετατοπίσεις κατά μήκος ασυνεχειών και οι περιστροφές μπλοκ επιτρέπονται. Τα μεμονωμένα μπλοκ συμπεριφέρονται ως άκαμπτα ή παραμορφώσιμα υλικά. Τα παραμορφώσιμα τεμάχια υποδιαιρούνται σε ένα πλέγμα ζωνών πεπερασμένων διαφορών και κάθε ζώνη ανταποκρίνεται σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο γραμμικό ή μη γραμμικό νόμο τάσης – τροπής. Η σχετική κίνηση των ασυνεχειών διέπεται επίσης από γραμμικές ή μη γραμμικές σχέσεις δύναμης- μετατόπισης για μετακινήσεις τόσο στις ορθές όσο και στις διατμητικές κατευθύνσεις. Το UDEC έχει πολλά ενσωματωμένα μοντέλα συμπεριφοράς υλικών τόσο για τα άρρηκτα μπλοκ και όσο και για τις ασυνέχειες, που επιτρέπουν την προσομοίωση για ασυνεχή γεωλογικά (ή παρόμοια) υλικά. Το UDEC βασίζεται σε έναν "Lagrangian" υπολογισμό, ο οποίος είναι κατάλληλος για την αναπαράσταση μεγάλων μετακινήσεων και παραμορφώσεων ενός συστήματος μπλοκ.

Το UDEC περιέχει επίσης την ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού FISH. Με τη FISH, ο χρήστης μπορεί να γράψει τις δικές του εντολές για να επεκτείνει τη χρησιμότητα του UDEC. Η FISH προσφέρει στους χρήστες του UDEC την ικανότητα να προσαρμόσουν τις αναλύσεις τους, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες ανάγκες.

Η εφαρμογή και η ανάπτυξη της μεθόδου διακριτών στοιχείων που ενσωματώθηκε στο UDEC αναπτύχθηκε για μια περίοδο 40 ετών, αρχίζοντας από την αρχική παρουσίαση από τον Cundall (1971). Το 1985, ο Δρ. Cundall και οι υπάλληλοι της Itasca προσαρμόσαν ειδικά το UDEC για να εκτελούν υπολογισμούς σε IBM-συμβατό μικροϋπολογιστή. Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί για υψηλής ταχύτητας υπολογισμό μοντέλων που περιέχουν αρκετές χιλιάδες μπλοκ. Για παράδειγμα, το UDEC μπορεί να λύσει ένα μοντέλο που περιέχει έως και 3000 παραμορφώσιμα μπλοκ με 8 βαθμούς ελευθερίας ανά μπλοκ σε προσωπικό υπολογιστή με μόνο 12 MB RAM. Η ταχύτητα λύσης για ένα μοντέλο αυτού του μεγέθους είναι περίπου 6000 βήματα υπολογισμού ανά λεπτό σε Pentium i7-870 2,9 GHz. Η ταχύτητα υπολογισμού είναι ουσιαστικά μια γραμμική συνάρτηση του αριθμού των μπλοκ σε ένα μοντέλο και ο αριθμός των μπλοκ είναι μια γραμμική συνάρτηση της διαθέσιμης μνήμης RAM στον υπολογιστή.

## 5.2 Δυναμική ανάλυση

### 5.2.1 Γενικά

Η δυναμική ανάλυση στο UDEC επιτρέπει τη διδιάστατη πλήρη δυναμική ανάλυση. Ο υπολογισμός βασίζεται στο σύστημα πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση εξισώσεων κίνησης, χρησιμοποιώντας πραγματικές μάζες άκαμπτων μπλοκ, ή συγκεντρωμένα σημεία που προέρχονται από την πραγματική πυκνότητα των γύρω περιοχών.

Η δυναμική ανάλυση διευρύνει την αναλυτική ικανότητα του UDEC σε ένα ευρύ φάσμα δυναμικών προβλημάτων σε κλάδους όπως η σεισμολογία και τα rockbursts σε ορυχεία.

### 5.2.2 Διευκρινίσεις δυναμικής μοντελοποίησης

Υπάρχουν τρεις πτυχές τις οποίες ο χρήστης πρέπει να εξετάσει κατά την προετοιμασία ενός μοντέλου για μια δυναμική ανάλυση:

- (1) συνθήκες δυναμικής φόρτισης και οριακές συνθήκες,
- (2) μετάδοση κύματος μέσω του μοντέλου και
- (3) μηχανική απόσβεση.

- (1) Το UDEC μοντελοποιεί μια περιοχή από ασυνεχές υλικό που υπόκειται σε εξωτερική ή εσωτερική δυναμική φόρτιση εφαρμόζοντας μια δυναμική συνθήκη είτε στο όριο του μοντέλου είτε στα εσωτερικά μπλοκ. Οι αντανάκλασεις των κυμάτων στα όρια του μοντέλου ελαχιστοποιούνται με τον προσδιορισμό είτε quiet (ή viscous ή freefield) οριακών συνθηκών.
- (2) Η φυσική ακαμψία των ασυνεχειών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Η αλλοίωση του κύματος, που διαδίδεται μπορεί να συμβεί σε μια δυναμική ανάλυση. Τόσο το περιεχόμενο συχνότητας του κύματος εισόδου όσο και τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας κύματος του συστήματος θα επηρεάσουν την αριθμητική ακρίβεια της μετάδοσης κύματος. Οι Kuhlemeyer και Lysmer (1973) δείχνουν ότι για ακριβή αναπαράσταση της μετάδοσης κύματος μέσω ενός μοντέλου το μέγεθος του στοιχείου,  $\Delta l$ , πρέπει να είναι μικρότερο από περίπου το ένα δέκατο έως το ένα όγδοο του μήκους κύματος που σχετίζεται με την υψηλότερη συχνότητα του κύματος εισόδου.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (4.1)$$

Όπου:

$\lambda$  είναι το μήκος κύματος

- (3) Τα φυσικά δυναμικά συστήματα περιέχουν κάποιο βαθμό απόσβεσης της ενέργειας των κραδασμών στο σύστημα. Διαφορετικά, το σύστημα θα ήταν σε ταλάντωση συνεχώς μετά από την υποβολή του σε δυναμική φόρτιση. Η απόσβεση οφείλεται, εν μέρει, στην απώλεια ενέργειας ως αποτέλεσμα της εσωτερικής τριβής στο άρρηκτο υλικό και στις ασυνέχειες.

## Κεφάλαιο 6. Προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας

### 6.1 Αριθμητική προσομοίωση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάται το φαινόμενο ακαριαίας διάρρηξης κατά τη διάνοιξη σήραγγας. Το μέγεθος του μοντέλου είναι 60 m × 40 m (πλάτος × ύψος) και η διατομή της σήραγγας είναι πεταλοειδής με ακτίνα θόλου 2 m, ύψος τοιχωμάτων 4 m και πλάτος 4 m. Παρακάτω στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μηχανικές παράμετροι των πετρωμάτων.

Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες στρωμάτων.

Στρώματα	Πάχος (m)	Μοναδιαίο βάρος (kg m <sup>-3</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Συνοχή (MPa)	Γωνία τριβής (°)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)
Ιλιόλυθος	11.5	2640	8	2.3	35	5
Ψαμμίτης	3.2	2700	12	4.0	37	7
Ιλιόλυθος	10.0	2640	8	2.3	35	5
Άνθρακας	1.2	1300	8.5	0.5	28	2
Ιλιόλυθος	4.5	2640	8	2.3	35	5
Άνθρακας	0.8	1300	8.5	0.5	28	2
Ιλιόλυθος	9.0	2640	8	2.3	35	5

Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ορίζονται ως ακολούθως: τα όρια στην αριστερή και τη δεξιά πλευρά περιορίζονται στην οριζόντια κίνηση με κυλίσεις, το κάτω όριο είναι σταθερό και το ανώτερο όριο είναι ελεύθερο και ασκείται ομοιόμορφο φορτίο βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$q = \rho \times g \times z \quad (6.1)$$

Όπου:

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

ρ είναι η μέση πυκνότητα και

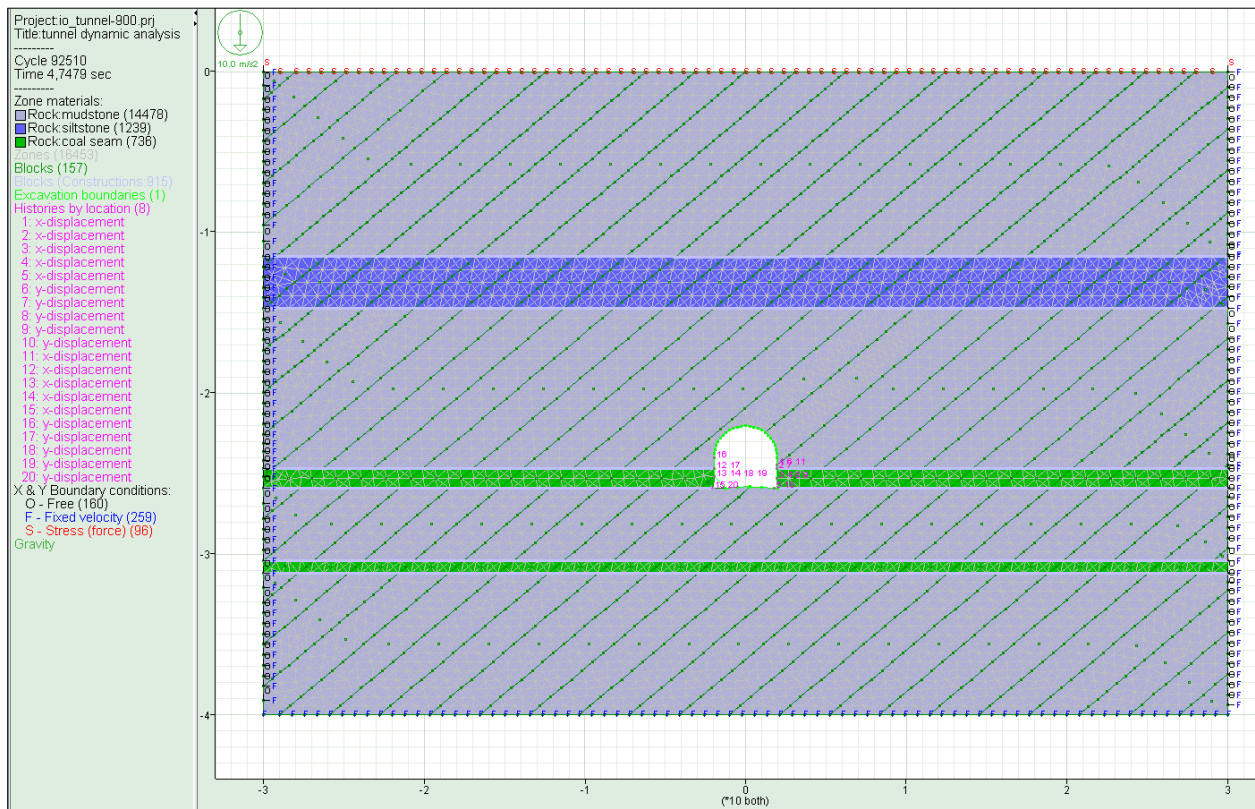
z είναι το βάθος του ανώτερου ορίου του μοντέλου

Η τιμή της μέσης πυκνότητας (ρ) είναι 2700 kg/m<sup>3</sup> και το βάθος z ορίζεται στα 1100 m.

Όσον αφορά στο δυναμικό μοντέλο, προκειμένου να μειωθεί η αντανάκλαση του κύματος από τα όρια του μοντέλου υπό την κατάσταση της δυναμικής φόρτισης, τα όρια ρυθμίστηκαν ως αποσβεστήρες με σκοπό να προσομοιώνεται η απόσβεση του δυναμικού κύματος λόγω της πλευρικής έκτασης της βραχομάζας. Η διάδοση του κύματος προσομοιώνεται ως μία συνημιτονοειδής συνάρτηση με μέγιστη τάση τα 30 MPa και συχνότητα 10 Hz. Η πηγή του κύματος θεωρείται ότι βρίσκεται στο ανώτερο όριο του αριθμητικού μοντέλου. Η συνημιτονοειδής συνάρτηση του κύματος είναι η εξής:

$$y = 20 \times 10^6 \times \cos(2\pi \times 10) \quad (6.2)$$

Τοποθετήθηκαν δέκα συμμετρικά σημεία για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης και της μετατόπισης στις κάθετες και οριζόντιες κατευθύνσεις και στις δύο πλευρές της σήραγγας. Το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιείται για τη βραχώμαζα είναι το Mohr-Coulomb.

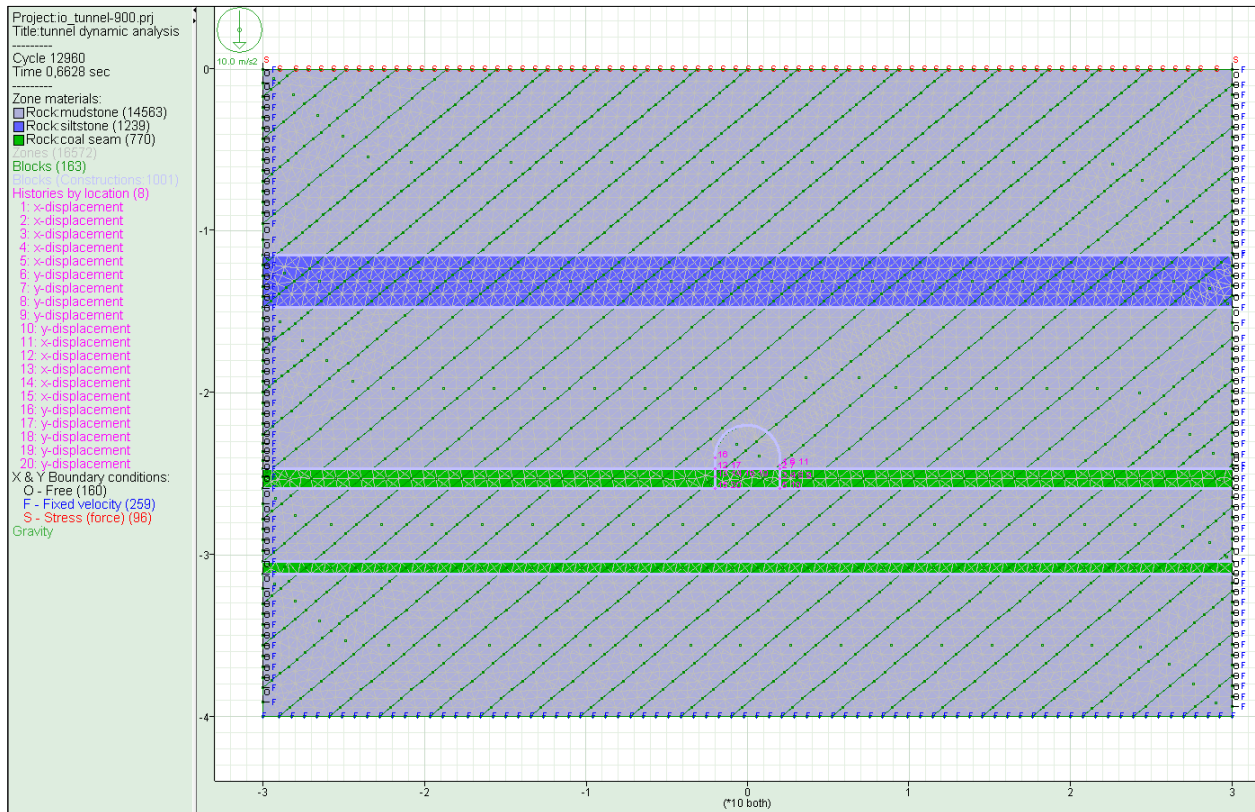


Εικόνα 29: Στατικό μοντέλο σήραγγας και περιβάλλον πέτρωμα.

### 6.1.1 Στατική ανάλυση

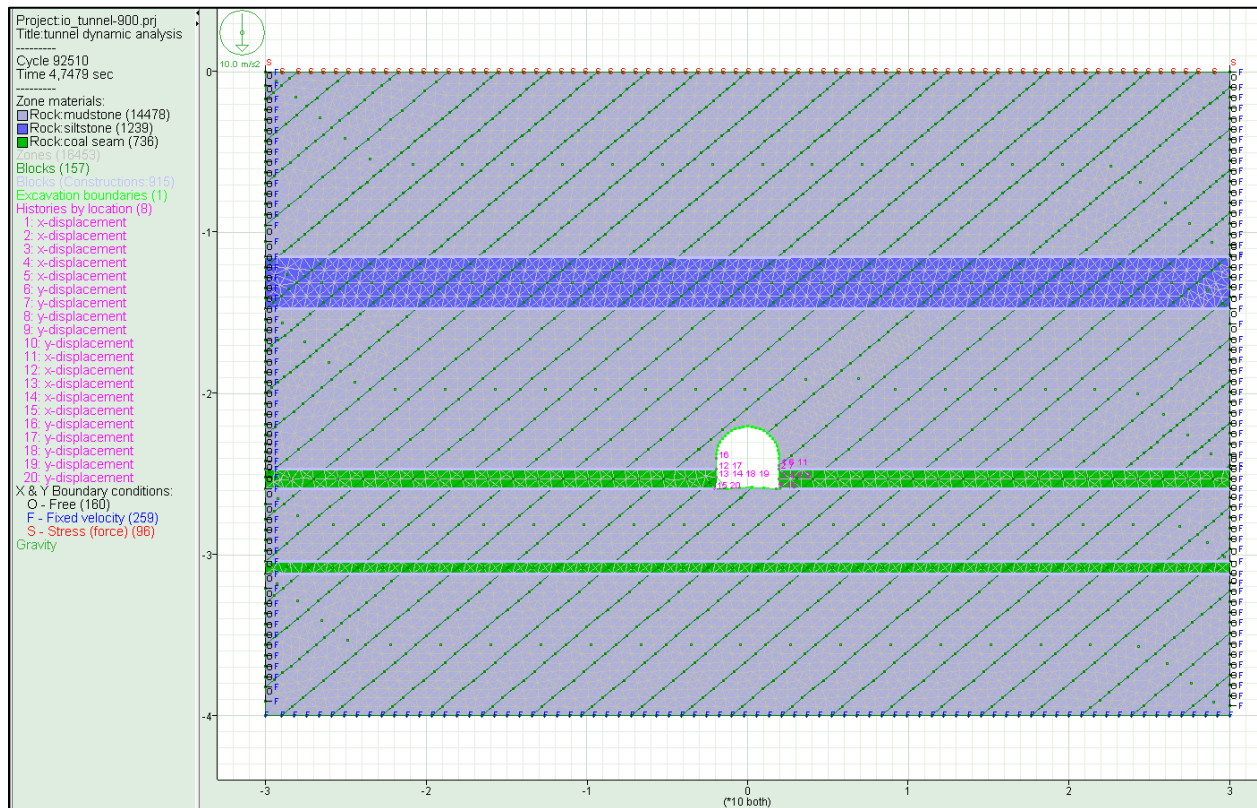
Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου πριν την εκσκαφή, έτσι ώστε να είναι ξεκάθαρη η συμπεριφορά του πετρώματος και κατ' επέκταση της εκσκαφής πριν την επιβολή του δυναμικού φορτίου.

Το μοντέλο έχει τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παραπάνω στο Κεφάλαιο 6.1 και αρχικά γίνεται στατική επίλυση πριν την εκσκαφή (Εικόνα 30). Η τάση που εφαρμόζεται είναι ίση με 30 MPa και εφαρμόζεται κατά μήκος του ανώτερου ορίου του μοντέλου.



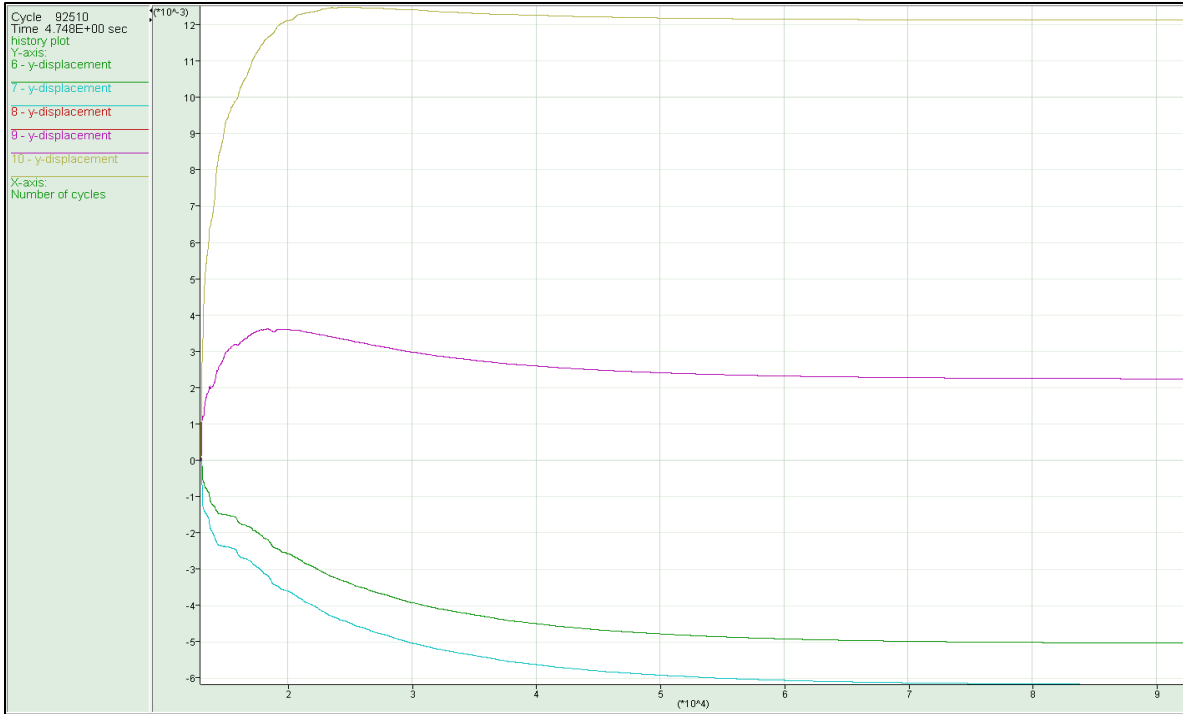
Εικόνα 30: Στατικό μοντέλο πριν την εκσκαφή.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου μετά την εκσκαφή της σήραγγας.

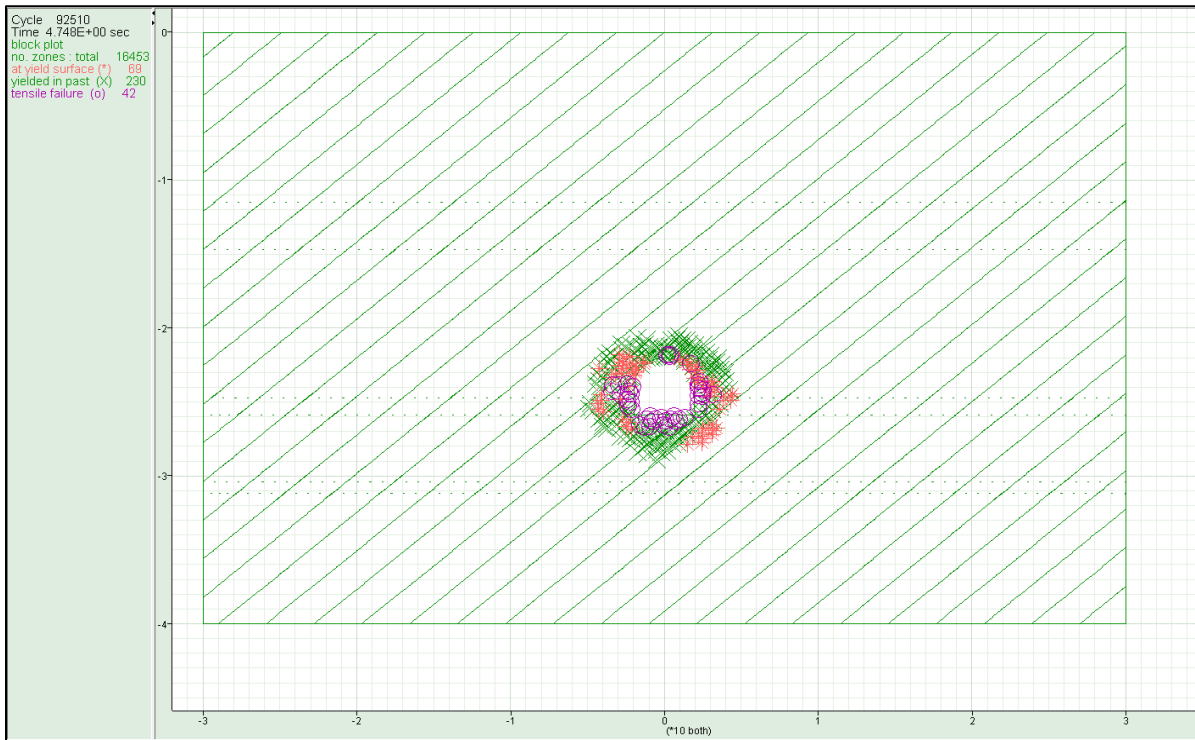


Εικόνα 31: Στατικό μοντέλο μετά την εκσκαφή.

Στο συγκεκριμένο στάδιο παρατηρείται διαρροή περιμετρικά της εκσκαφής που δεν είναι ικανή να προκαλέσει αστοχία της εκσκαφής (Εικόνα 33). Οι μετακινήσεις που παρατηρούνται δεν είναι ανώτερες των 13mm (Εικόνα 32).



Εικόνα 32: Μετακινήσεις κατά των άξονα γ σύμφωνα με 5 σημεία παρακολούθησης.



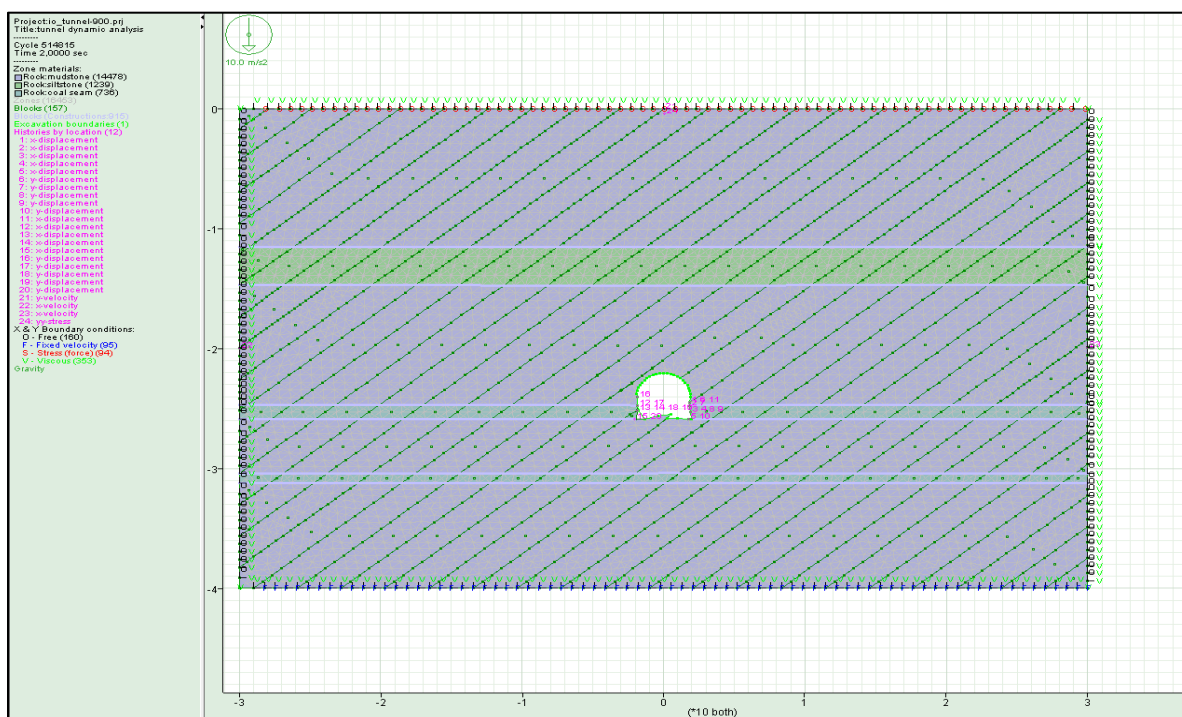
Εικόνα 33: Διαρροή πετρώματος περιμετρικά της σήραγγας.



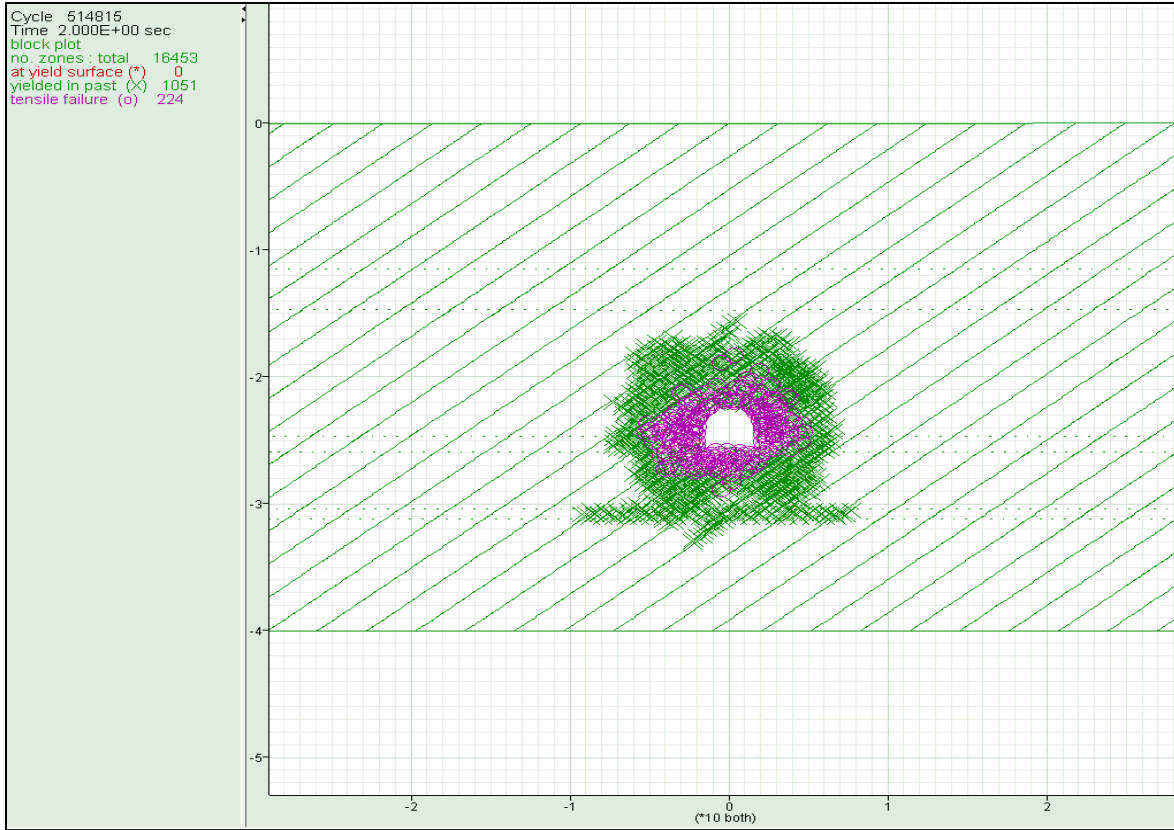
### 6.1.2 Δυναμική ανάλυση

Η δυναμική ανάλυση αποτελεί το τρίτο στάδιο στο οποίο δρα το σεισμικό κύμα και γίνεται δυναμική ανάλυση με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του πετρώματος με τη διάδοση του σεισμικού κύματος (Εικόνα 34).

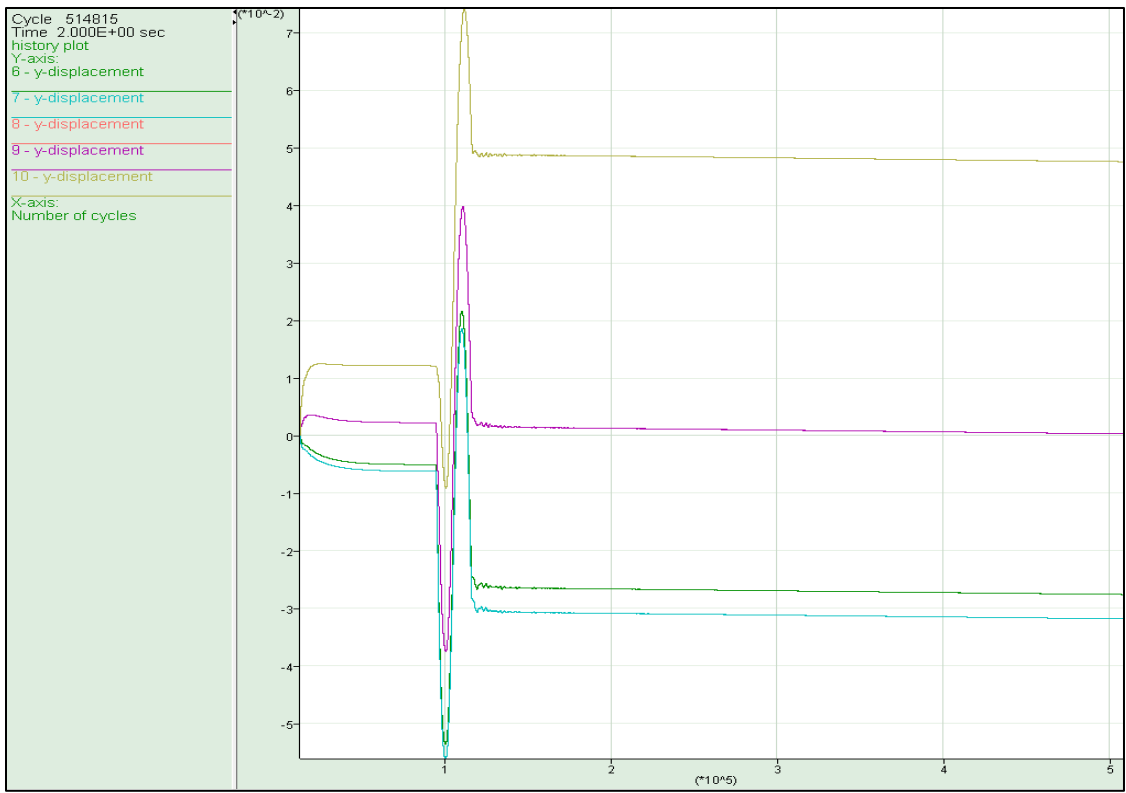
Στο συγκεκριμένο στάδιο παρατηρείται εκτεταμένη διαρροή σε μεγάλη έκταση περιμετρικά της εκσκαφής που προκαλεί σημαντική αστοχία, η οποία είναι κυρίως εφελκυστική (Εικόνα 35). Οι μετακινήσεις που παρατηρούνται είναι εμφανώς μεγαλύτερες έως 8cm και 20 cm στην κατεύθυνση του άξονα των  $y$  και των  $x$  αντίστοιχα (Εικόνες 36,37). Ακόμη, η ταχύτητα των κόμβων είναι ιδιαίτερα υψηλή κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της δράσης του σεισμικού κύματος με μέγιστη τιμή τα 5.38 m/s (Εικόνα 38).



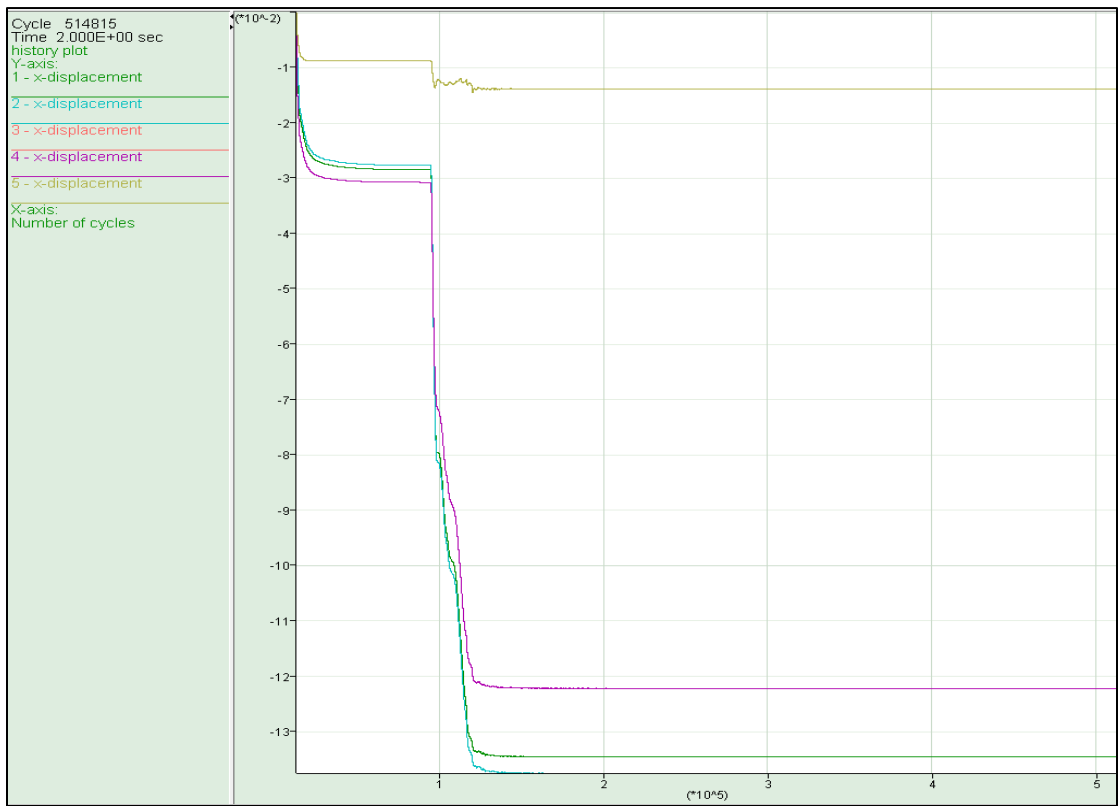
Εικόνα 34: Δυναμικό μοντέλο μετά την επίλυση.



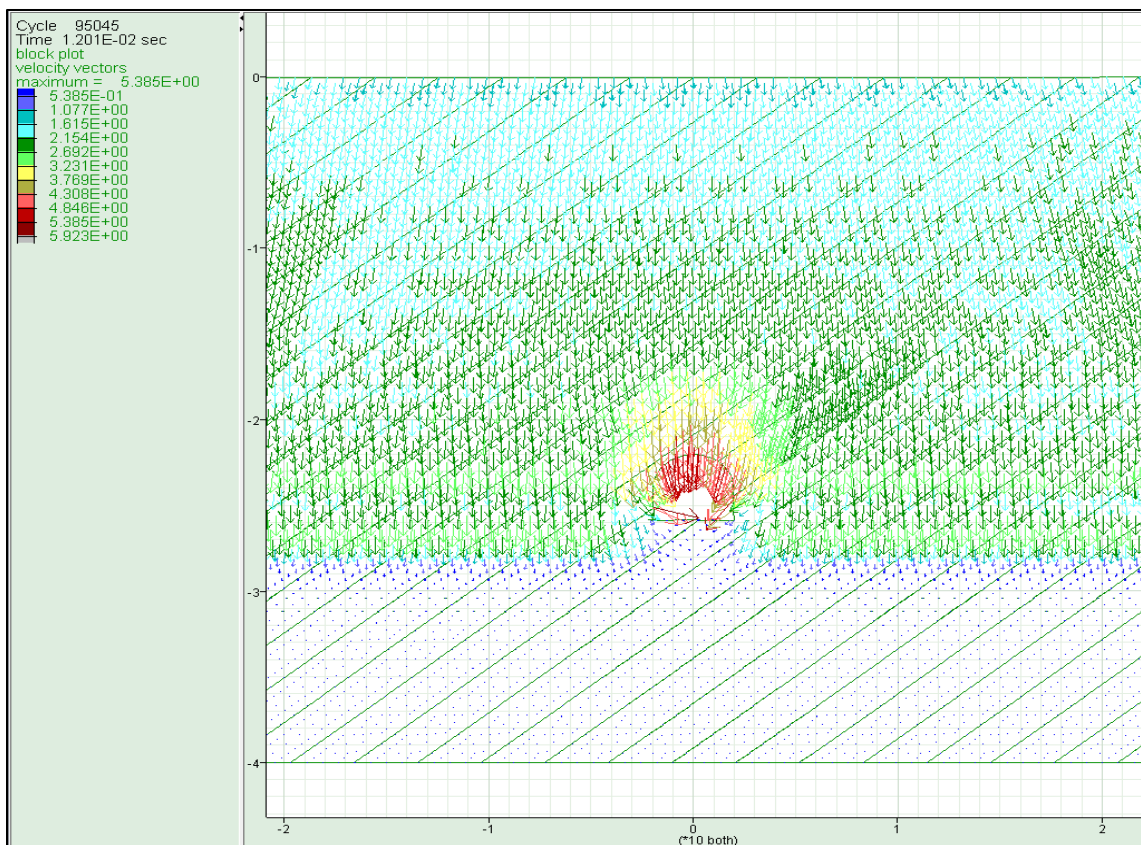
Εικόνα 35: Διαρροή πετρώματος.



Εικόνα 36: Μετακινήσεις κατά των άξονα γ σύμφωνα με 5 σημεία παρακολούθησης.



Εικόνα 37: Μετακινήσεις κατά των άξονα χ σύμφωνα με 5 σημεία παρακολούθησης.



Εικόνα 38: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων.

### Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Στην παραπάνω προσομοίωση παρατηρείται πως υπάρχει αύξηση της ταχύτητας των κόμβων με μέγιστη αυτή των 5.38 m/s.

Το τελικό αποτέλεσμα μετά την εξισορρόπηση του μοντέλου μετά το πέρας των 2 s δείχνει τη διαρροή του πετρώματος σε μεγάλη έκταση γύρω από τη σήραγγα, αλλά και ολίσθηση της ασυνέχειας που βρίσκεται στο δάπεδο της σήραγγας, μετά την εκδήλωση τους σεισμικού κύματος.

Ακόμη, γίνεται αντιληπτό πως οι τιμές των μετακινήσεων στο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές στο στάδιο της διάνοιξης με στατική επίλυση.

Επομένως, ο συνδυασμός των παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί ως εκδήλωση rockburst.

## Κεφάλαιο 7. Προσομοίωση εκσκαφής με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων

### 7.1 Αριθμητική προσομοίωση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάται το φαινόμενο ακαριαίας διάρρηξης κατά την εκσκαφή με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων.

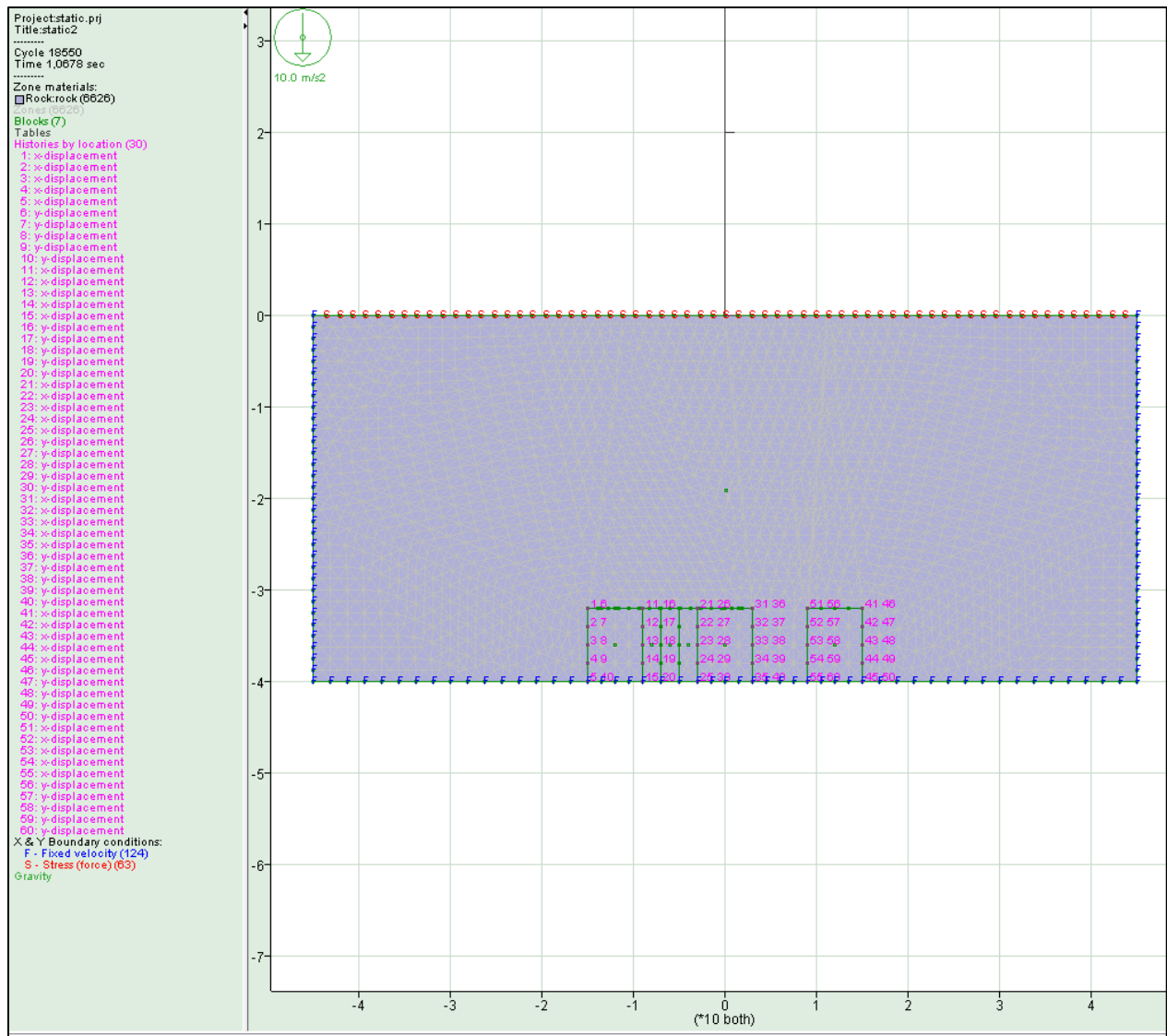
Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για εκσκαφή τριών θαλάμων σε μοντέλο μεγέθους 90 m × 40 m (πλάτος × ύψος) και αρχικό μέγεθος θαλάμων και στύλων 6 m × 8 m (πλάτος × ύψος). Παρακάτω στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι μηχανικές παράμετροι του πετρώματος.

Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες πετρώματος.

Πυκνότητα (kg m <sup>-3</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Συνοχή (MPa)	Γωνία τριβής (°)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)
1960	37	24.5	27	3.92

Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ορίζονται ως ακολούθως: τα όρια στην αριστερή και τη δεξιά πλευρά περιορίζονται στην οριζόντια και κάθετη κίνηση όπως και το κάτω όριο. Το ανώτερο όριο είναι ελεύθερο και ασκείται ομοιόμορφο φορτίο βάσει της σχέσης 6.1 με τιμή μοναδιαίου βάρους 19.6 kN/m<sup>3</sup> και το βάθος να ορίζεται στα 1000 m. Έτσι, το εφαρμοζόμενο φορτίο υπολογίζεται στα 19.6MPa.

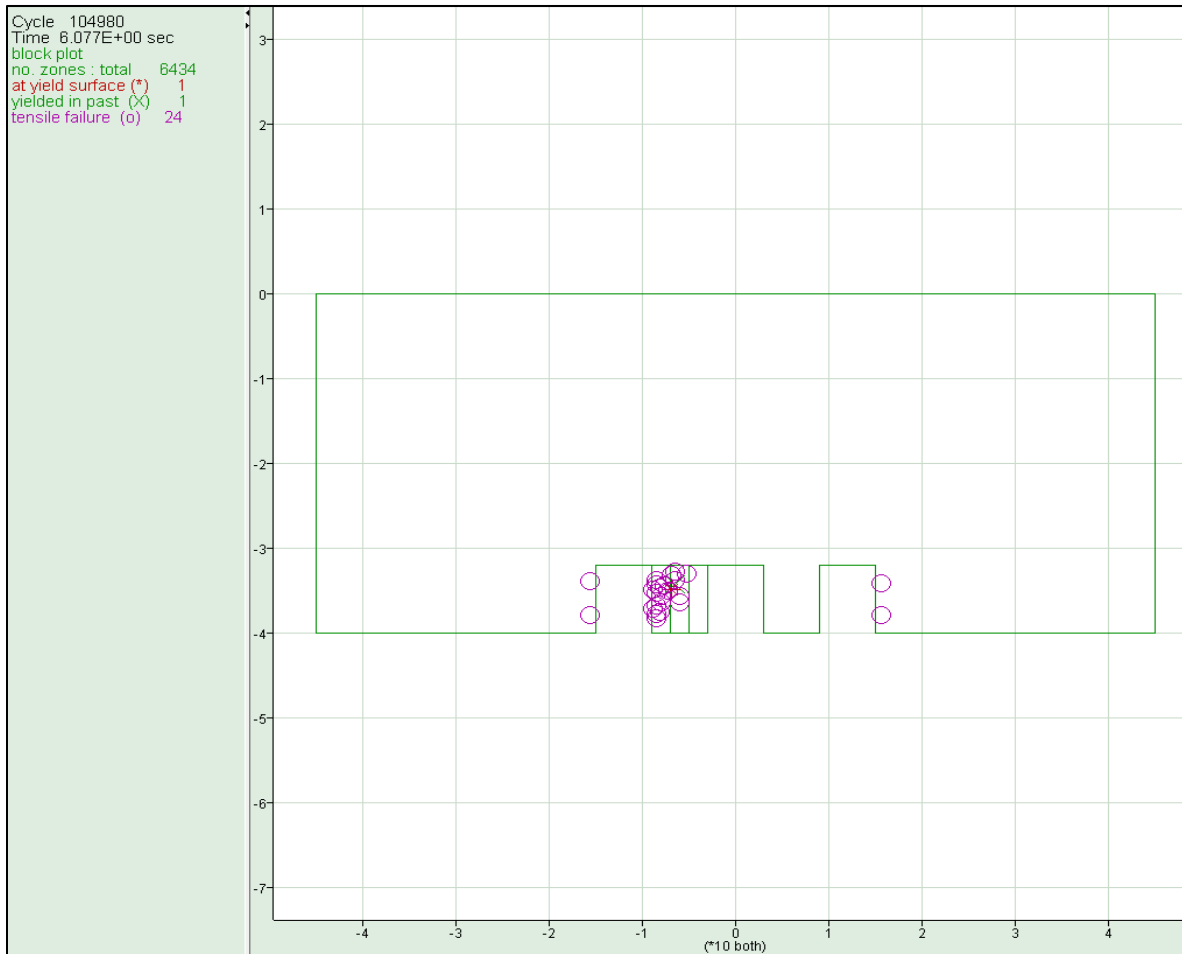
Όσον αφορά στο δυναμικό μοντέλο, προκειμένου να μειωθεί η αντανάκλαση του κύματος από τα όρια του μοντέλου υπό την κατάσταση της δυναμικής φόρτισης, τα όρια ρυθμίστηκαν ως αποσβεστήρες.



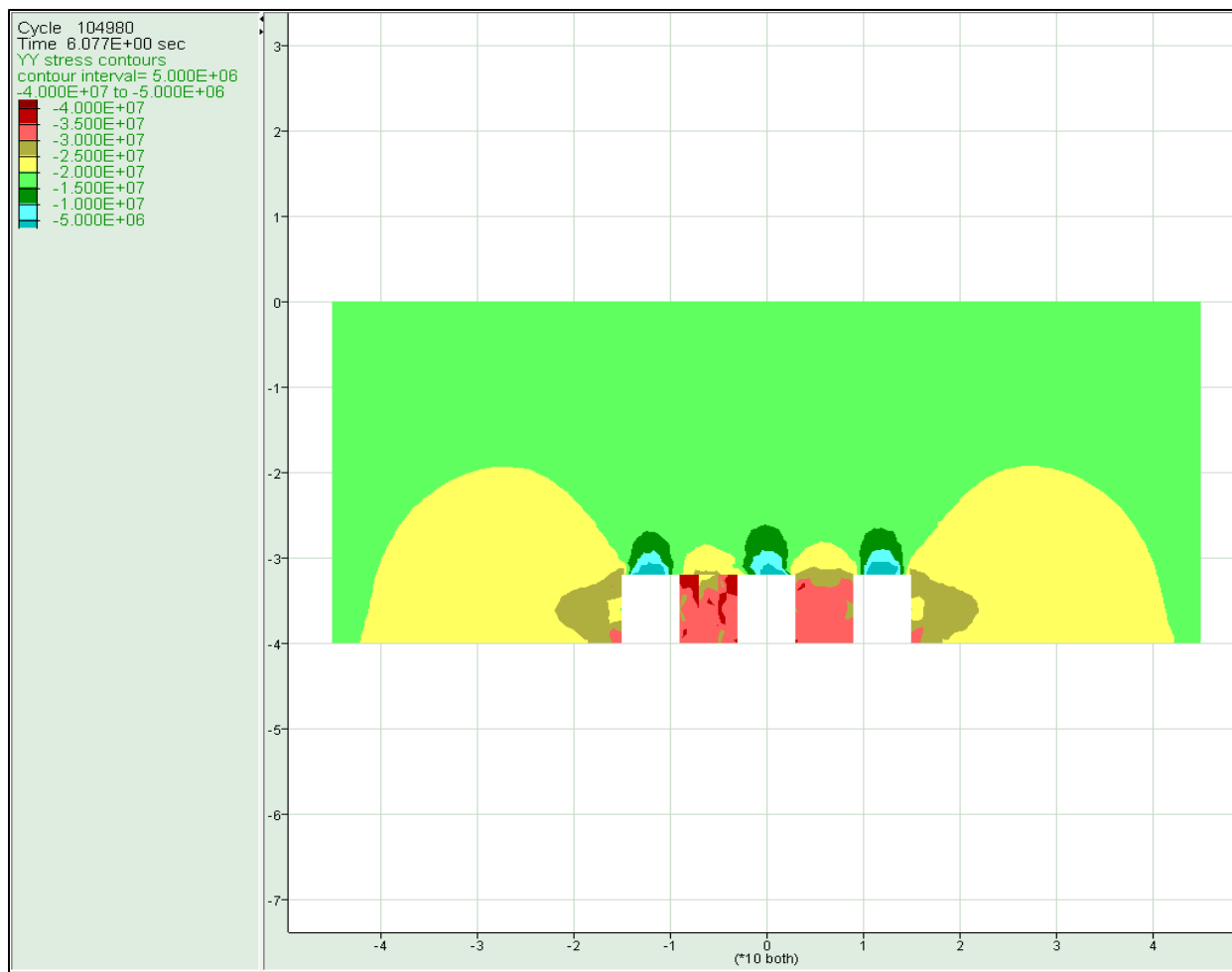
Εικόνα 39: Στατικό μοντέλο στο αρχικό στάδιο επίλυσης.

### 7.1.1 Στατική ανάλυση

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου κατά τη διάνοιξη των τριών στύλων ίδιου μεγέθους. Όπως παρατηρείται στις Εικόνες 40,41 προκαλείται διαρροή σε συγκεκριμένα σημεία και συγκέντρωση των τάσεων στους στύλους, τα οποία δεν είναι ικανά να προκαλέσουν καθολική διαρροή.



Εικόνα 40: Διαρροή πετρώματος στο πρώτο στάδιο.

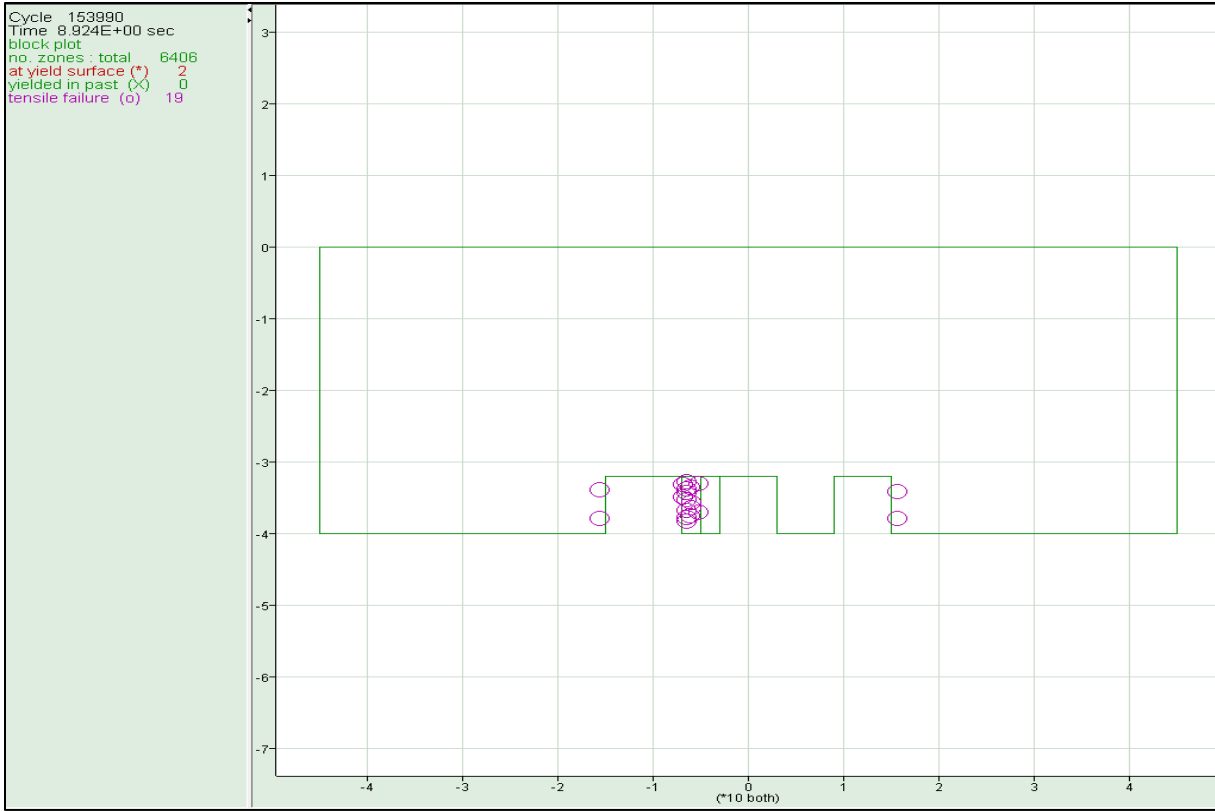


Εικόνα 41: Κατακόρυφες τάσεις στο πρώτο στάδιο.

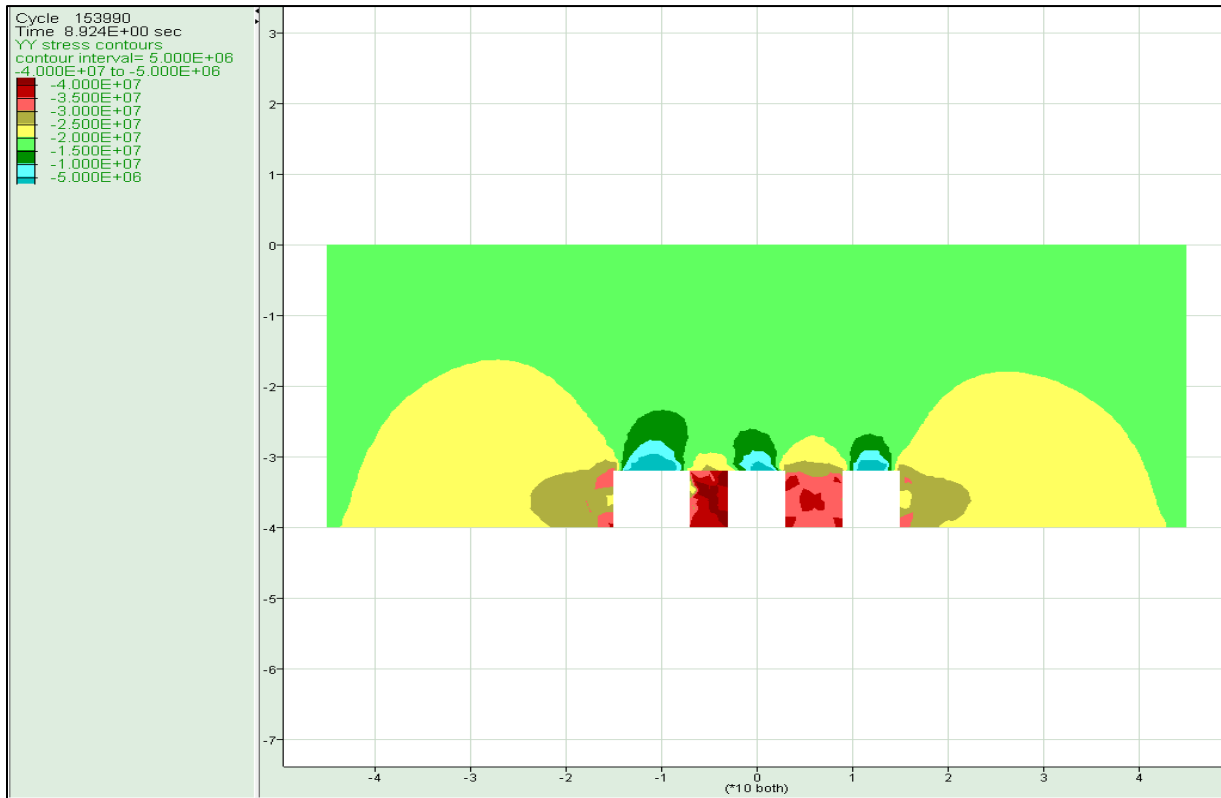
Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση του 1/3 του πρώτου στύλου.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 42, προκαλείται διαρροή σε περισσότερα σημεία, τα οποία όμως δεν είναι ικανά να προκαλέσουν καθολική διαρροή με εκρηκτική συμπεριφορά. Οι μετακινήσεις έχουν τιμές της τάξεως των mm και παρατηρείται συγκέντρωση των τάσεων στους στύλους, όπως και στο πρώτο στάδιο (Εικόνα 43).





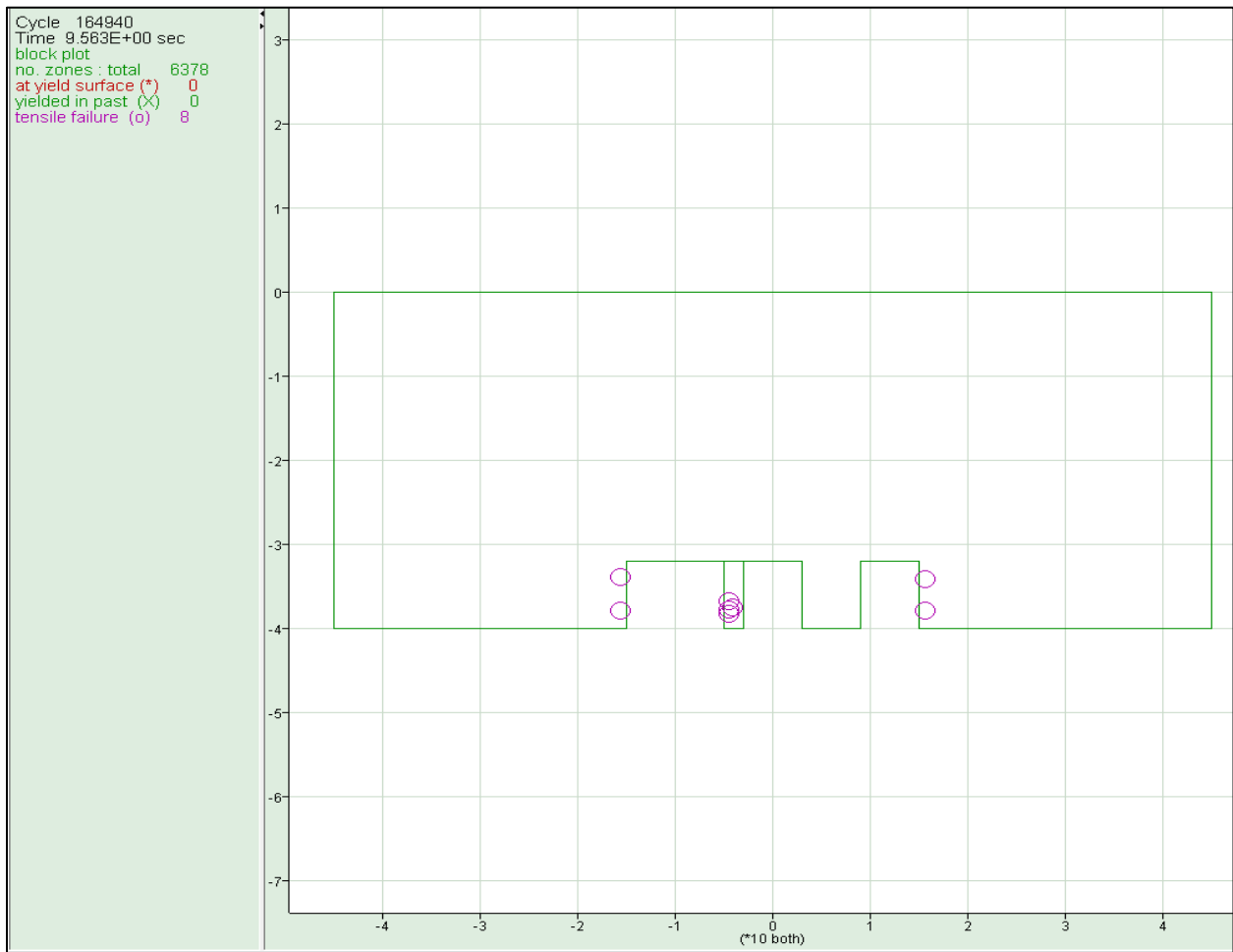
Εικόνα 42: Διαρροή πετρώματος στο δεύτερο στάδιο.



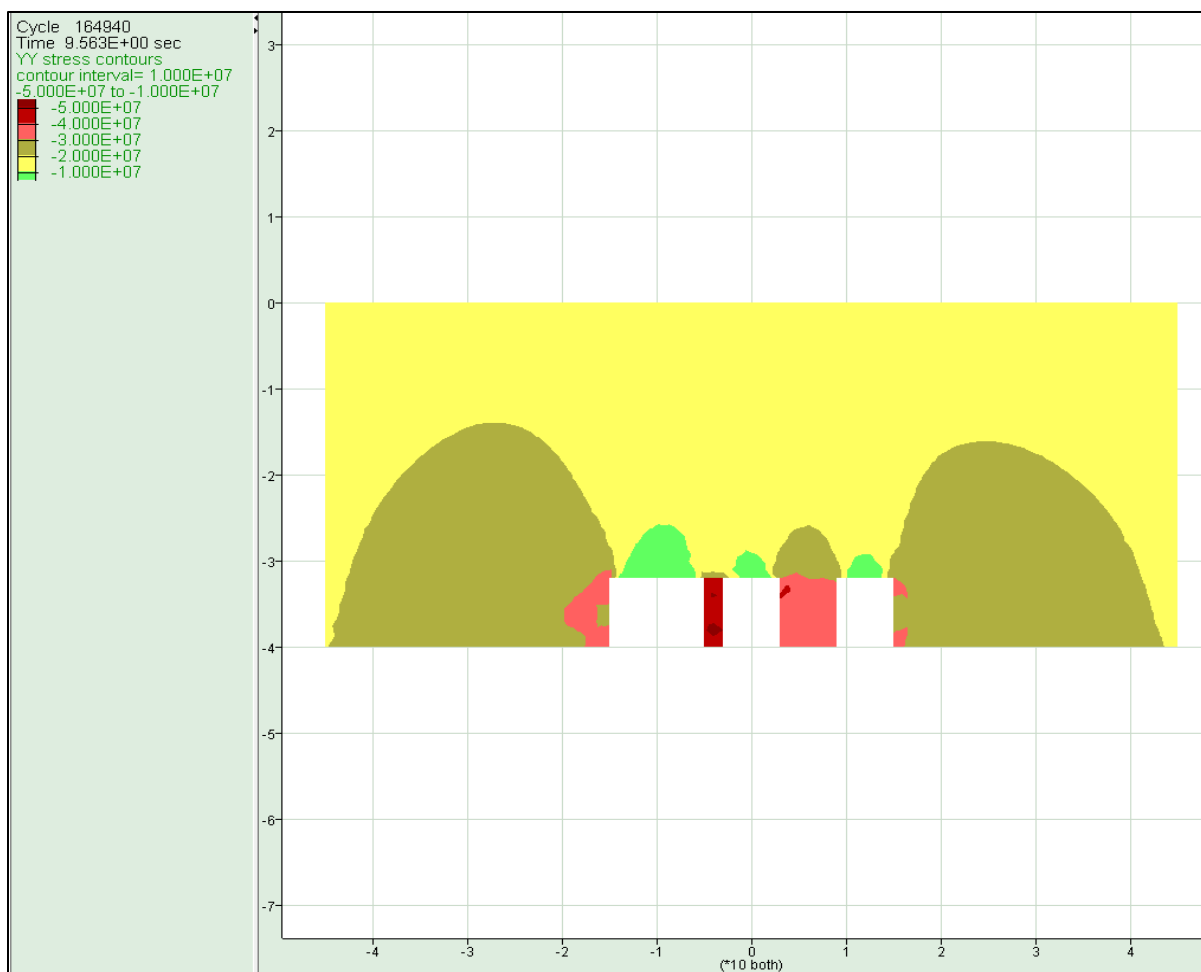
Εικόνα 43: Κατακόρυφες τάσεις στο δεύτερο στάδιο.

Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου ακόμη κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση ακόμη 1/3 του πρώτου στύλου.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 44, η διαρροή στο συγκεκριμένο στάδιο αφορά σε μερικά μεμονωμένα στοιχεία και οι κατακόρυφες τάσεις είναι συγκεντρωμένες στους στύλους (Εικόνα 45).



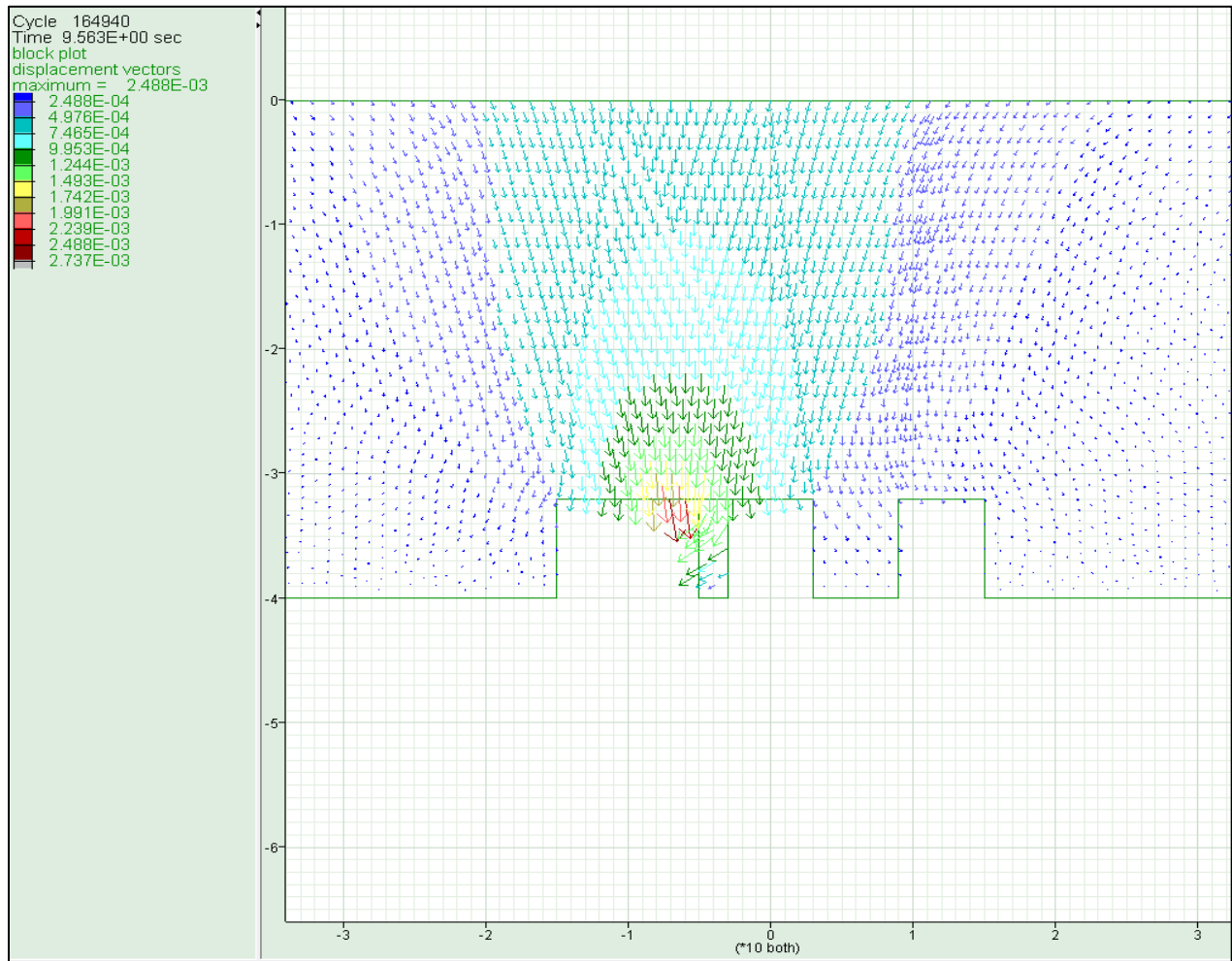
Εικόνα 44: Διαρροή πετρώματος στο τρίτο στάδιο.



Εικόνα 45: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τρίτο στάδιο.

### Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Παρατηρείται πως κατά τη στατική ανάλυση και στα τρία στάδια δεν υπάρχουν σημαντικές μετακινήσεις, καθώς είναι της τάξεως των χιλιοστών όπως φαίνεται και στο τρίτο στάδιο (Εικόνα 46). Η διαρροή που προκαλείται δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική καθώς δεν αναπτύσσεται ούτε σημαντική ταχύτητα των κόμβων. Επομένως, η εκσκαφή μπορεί να θεωρηθεί ευσταθής, χωρίς να παραπέμπει σε εκδήλωση φαινομένου rockburst.



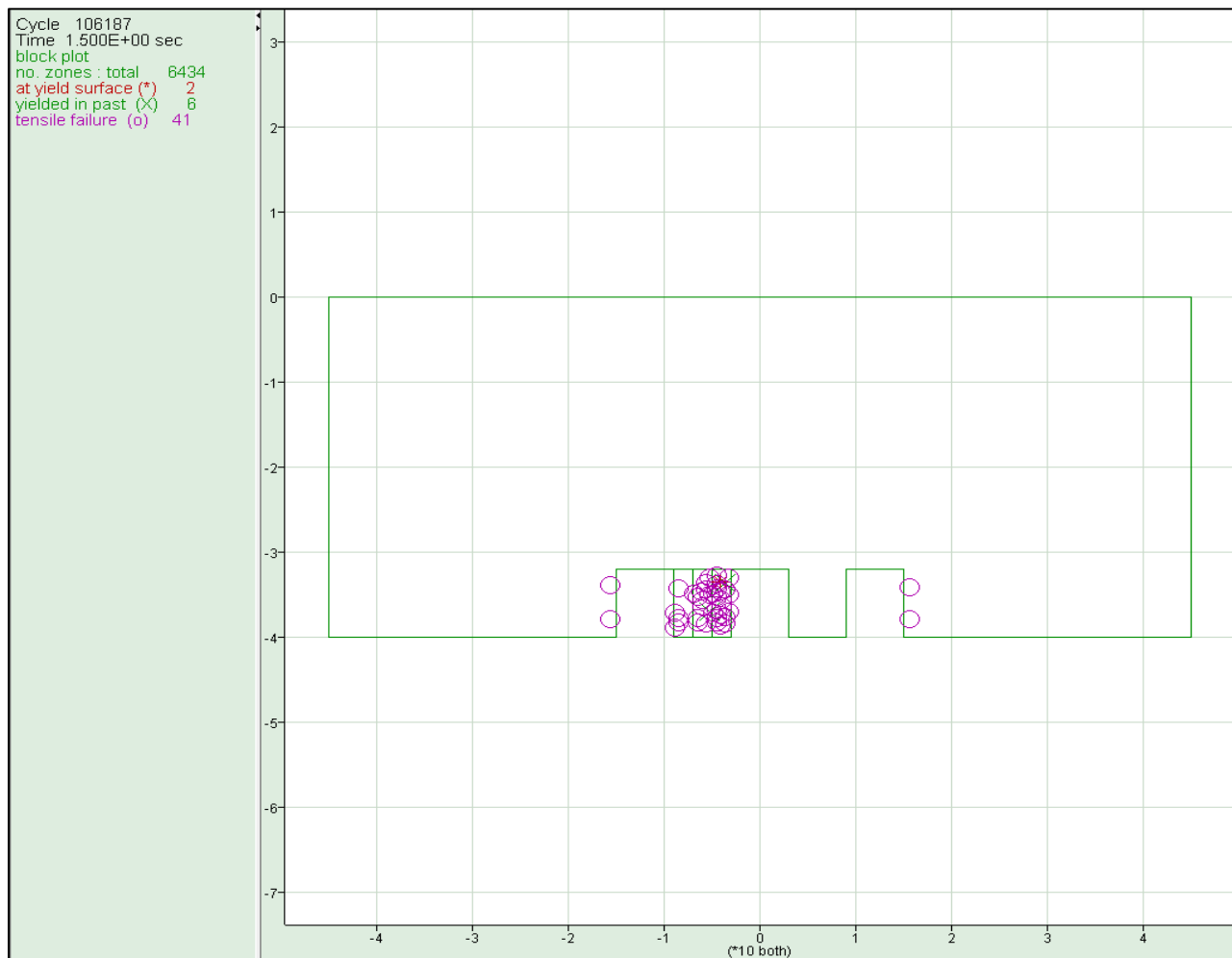
Εικόνα 46: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τρίτο στάδιο.

### 7.1.2 Δυναμική ανάλυση

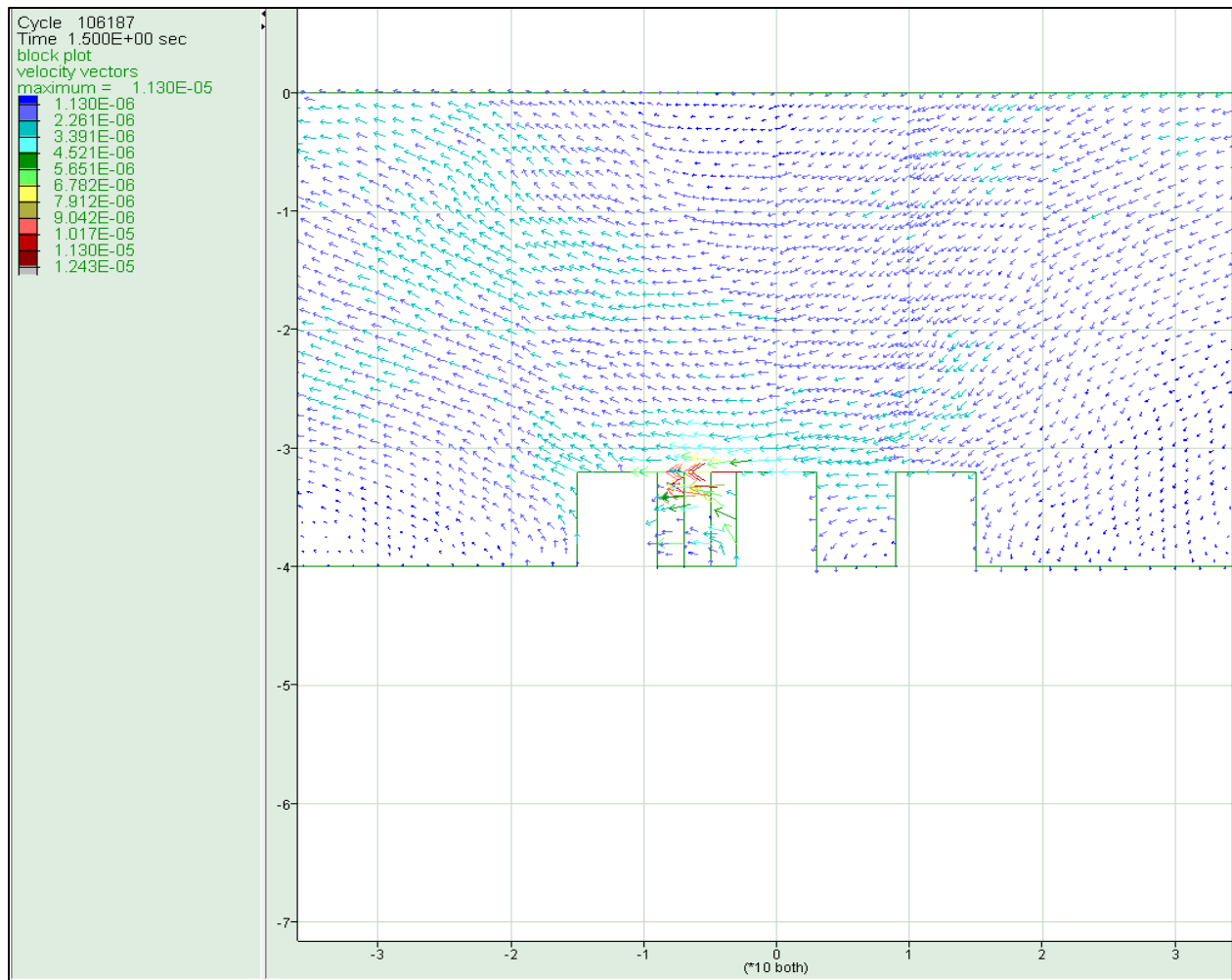
Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου κατά τη διάνοιξη των τριών στύλων ίδιου μεγέθους ακριβώς όπως και στην ανάλυση στο Κεφάλαιο 7.1.1.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση του 1/3 του πρώτου στύλου με όμοιο τρόπο όπως και στη στατική ανάλυση.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 47, προκαλείται διαρροή σε αρκετά σημεία των στύλων, τα οποία όμως δεν είναι ικανά να προκαλέσουν καθολική διαρροή. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα κόμβων αυξάνεται στο σημείο όπου παρατηρείται και η πιο έντονη διαρροή στον στύλο (Εικόνα 48).



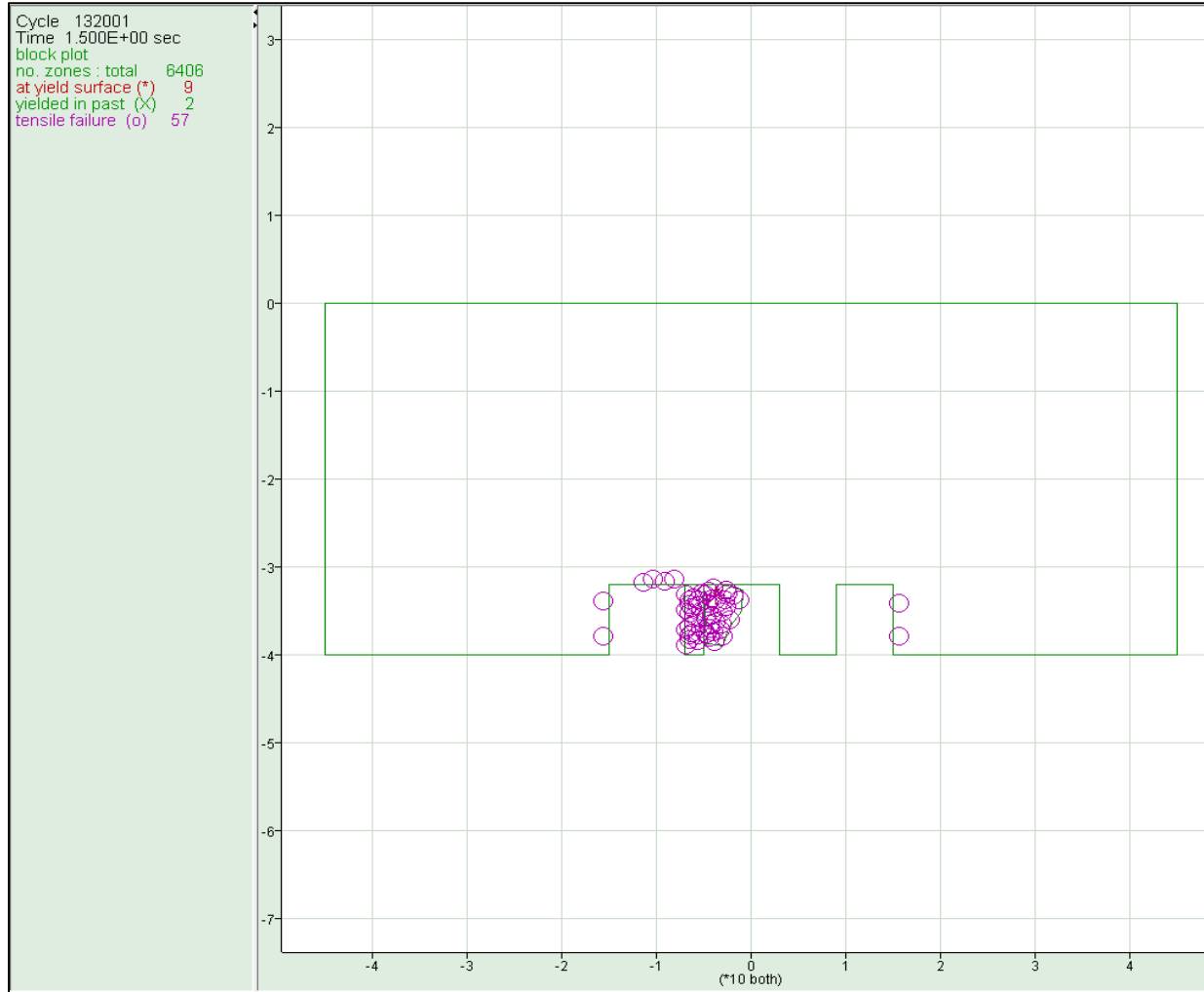
Εικόνα 47: Διαρροή πετρώματος στο δεύτερο στάδιο.



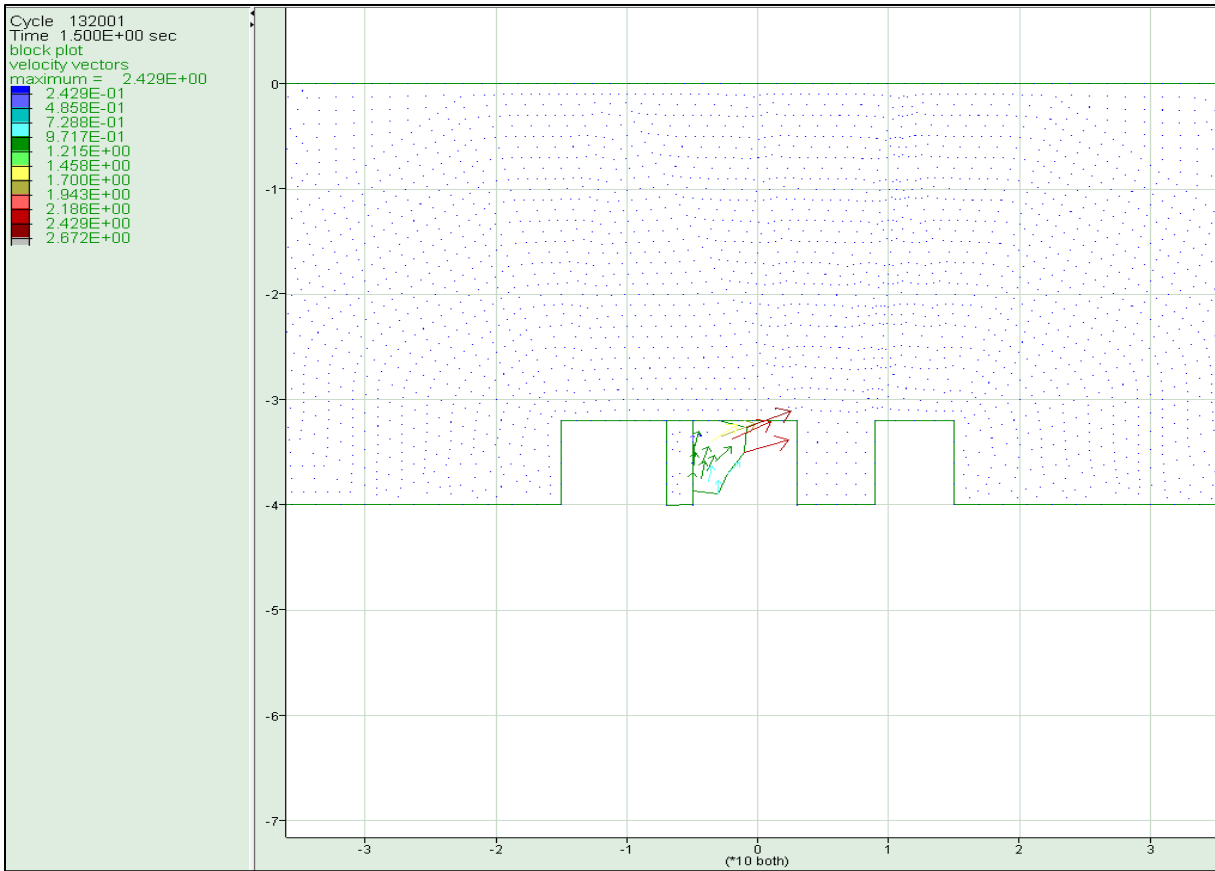
Εικόνα 48: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο δεύτερο στάδιο.

Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση του μοντέλου κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου ακόμη κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση ακόμη 1/3 του πρώτου στύλου.

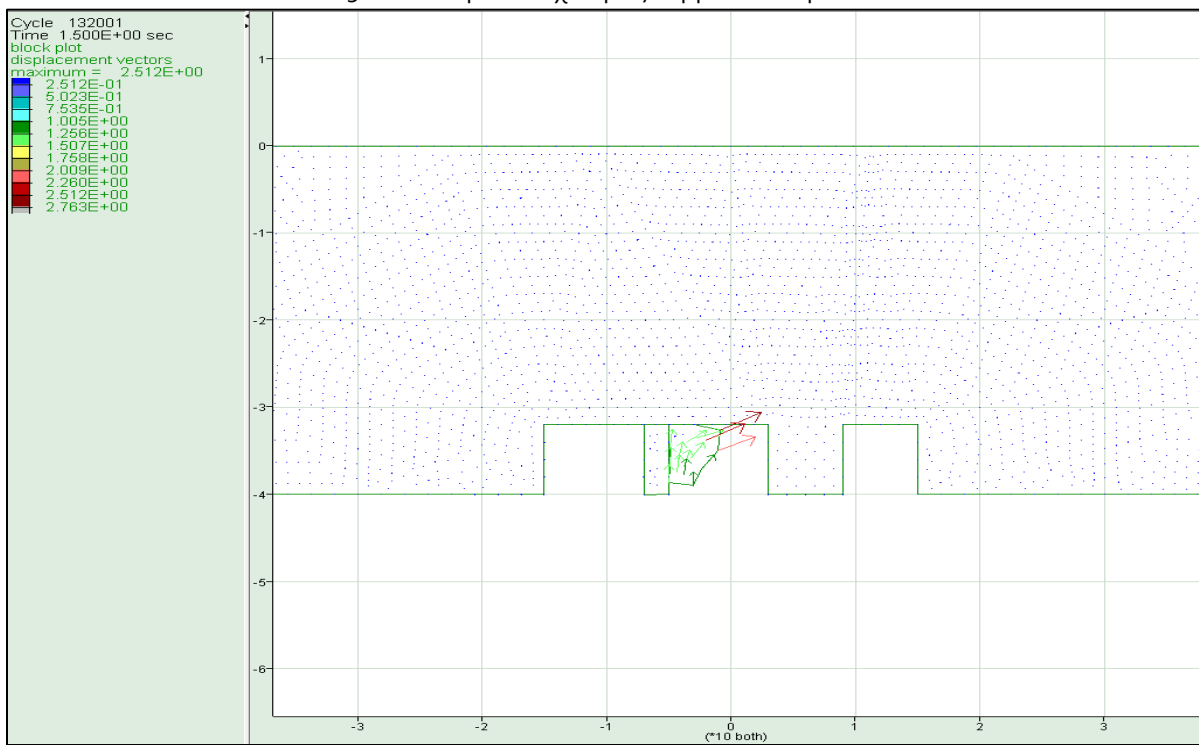
Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 49, προκύπτει διαρροή με αστοχία μέρους του στύλου, το οποίο θα έπρεπε να αφαιρεθεί στο τέταρτο στάδιο της εκσκαφής. Επίσης, αναπτύσσεται μεγάλη ταχύτητα στο συγκεκριμένο τέμαχος με μέγιστη ταχύτητα πολύ υψηλή για το μέγεθός του, δηλαδή 2.43 m/s πράγμα το οποίο παραπέμπει σε εκδήλωση rockburst (Εικόνα 50).



Εικόνα 49: Διαρροή πετρώματος στο τρίτο στάδιο.



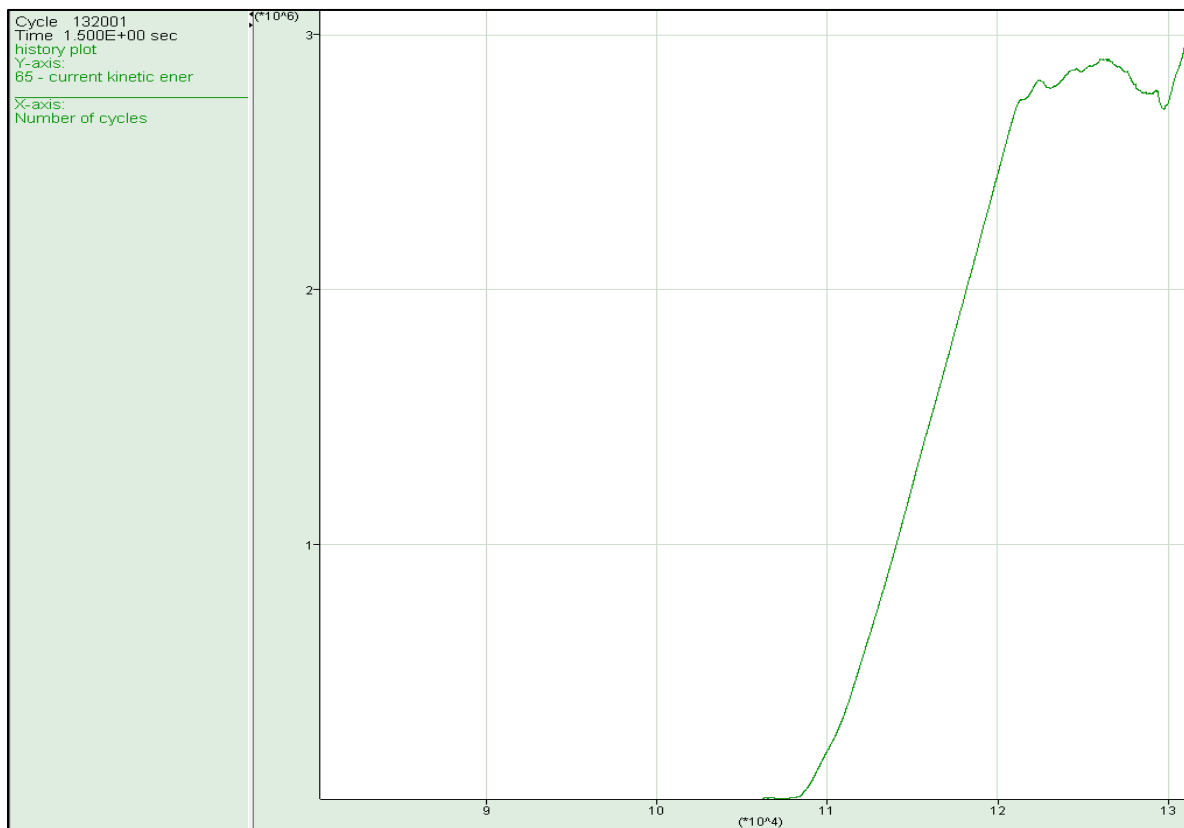
Εικόνα 50: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τρίτο στάδιο.



Εικόνα 51: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τρίτο στάδιο.



Οι μετακινήσεις που παρατηρούνται στον στύλο κυμαίνονται από εκατοστά έως και μέτρα (Εικόνα 51), πράγμα που και πάλι παραπέμπει σε εκδήλωση φαινομένου rockburst, αφού και μέρος του στύλου αστοχεί και η κινητική ενέργεια αυξάνεται συνεχώς (Εικόνα 52).



Εικόνα 52: Κινητική ενέργεια.

### Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

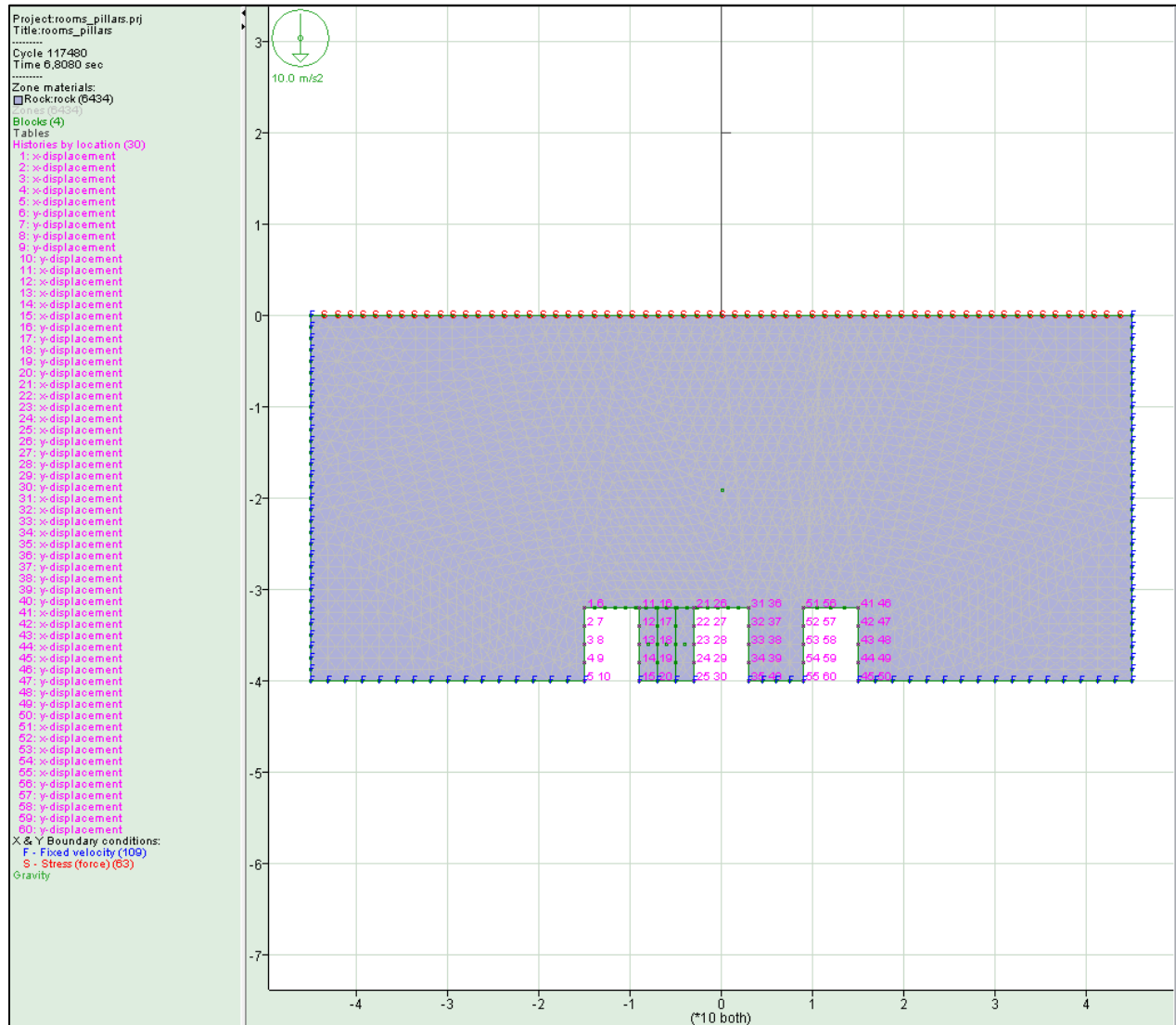
Στην παραπάνω προσομοίωση παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας των κόμβων, αστοχία του πετρώματος, μεγάλες μετακινήσεις σε μέρος του ενός στύλου και αυξανόμενη κινητική ενέργεια. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός παραπέμπει σε εκδήλωση φαινομένου rockburst, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της στατικής επίλυσης.

Ακόμη, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι προέκυψε τέτοιου είδους αστοχία ακόμη και με την ύπαρξη αποσβεστήρων, όπου ο ρόλος τους είναι να περιορίσουν την ανάκλαση των δυναμικών κυμάτων στα όρια του μοντέλου.

## 7.2 Αλλαγή βάθους εκσκαφής

Στην προσομοίωση που ακολουθεί εξετάζεται η μεταβολή του βάθους εκσκαφής και πώς αυτή μπορεί να επηρεάσει την εκδήλωση φαινομένου rockburst. Η διαδικασία παραμένει ίδια με τη διαδικασία στο Κεφάλαιο 7.1.

Το νέο βάθος εκσκαφής είναι 765 m. Επομένως, η τάση που εφαρμόζεται είναι ίση με 15 MPa.



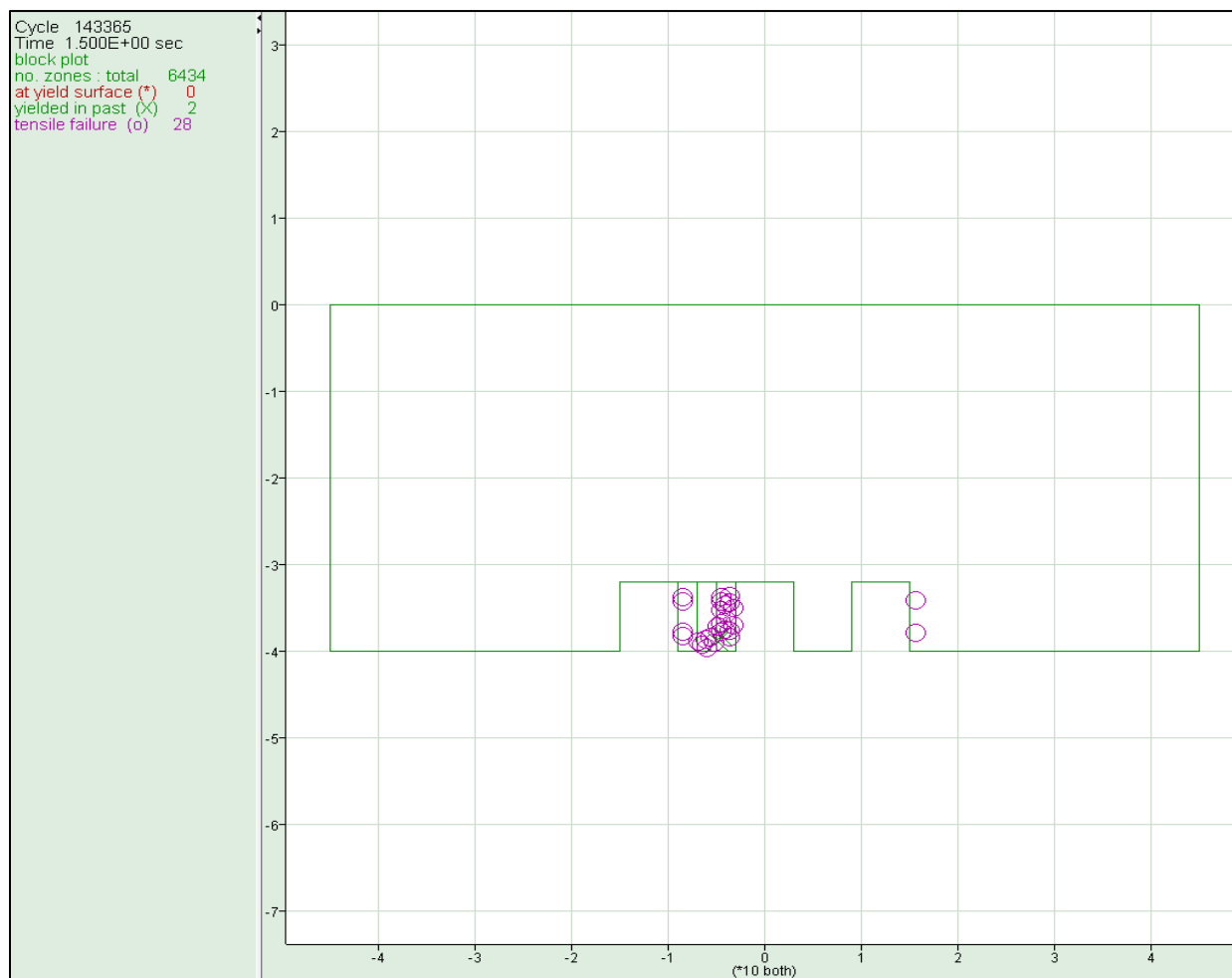
Εικόνα 53: Στατικό μοντέλο στο αρχικό στάδιο επίλυσης.

### 7.2.1 Δυναμική Ανάλυση

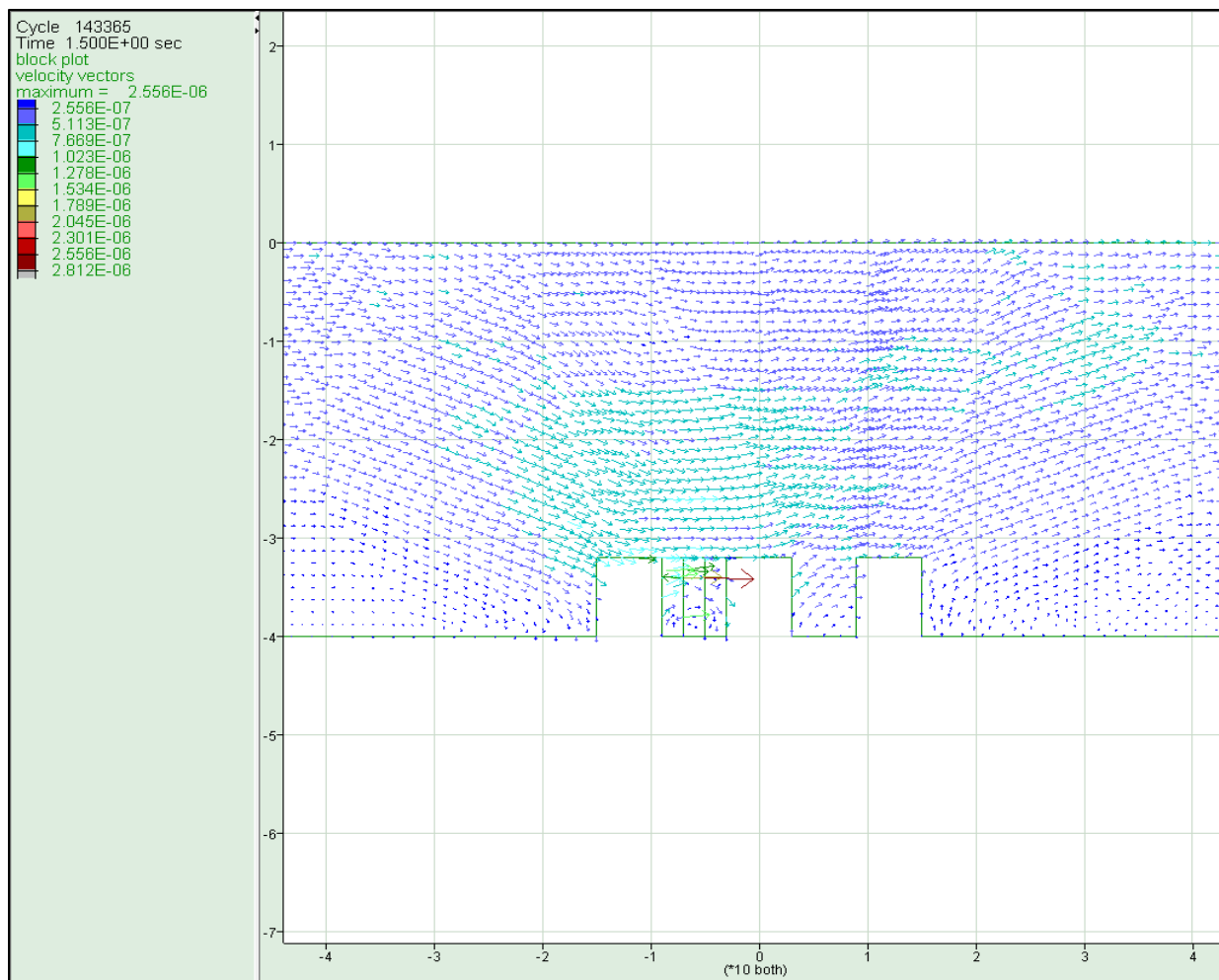
Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται στατική ανάλυση του μοντέλου κατά τη διάνοιξη των τριών στύλων ίδιου μεγέθους ακριβώς όπως και στην ανάλυση στο Κεφάλαιο 7.1.1 (Εικόνα 53).

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση του 1/3 του πρώτου στύλου με όμοιο τρόπο όπως και στο Κεφάλαιο 7.1.2.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 54, προκαλείται διαρροή του πετρώματος στην περιοχή των στύλων, η οποία όμως δεν είναι ικανή να προκαλέσει καθολική διαρροή. Επίσης, η μέγιστη ταχύτητα κόμβων είναι χαμηλή και λαμβάνει υψηλότερη στην περιοχή του ενός στύλου (Εικόνα 55).



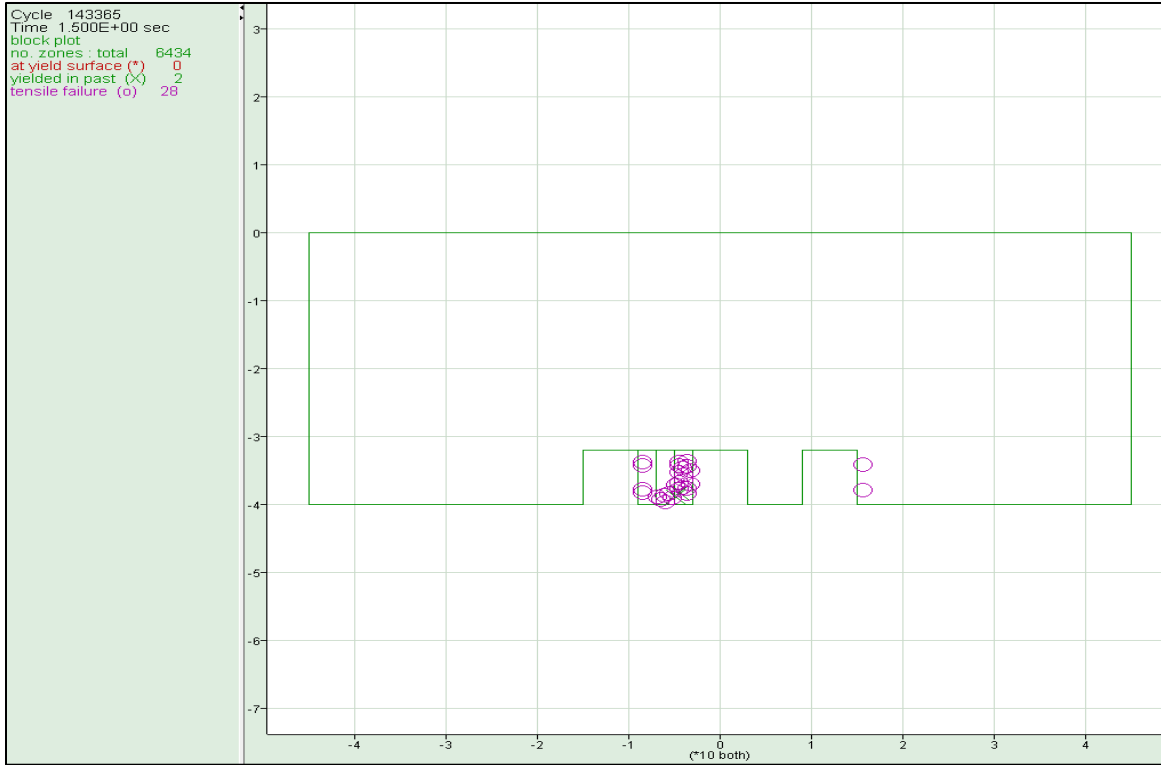
Εικόνα 54: Διαρροή πετρώματος στο δεύτερο στάδιο.



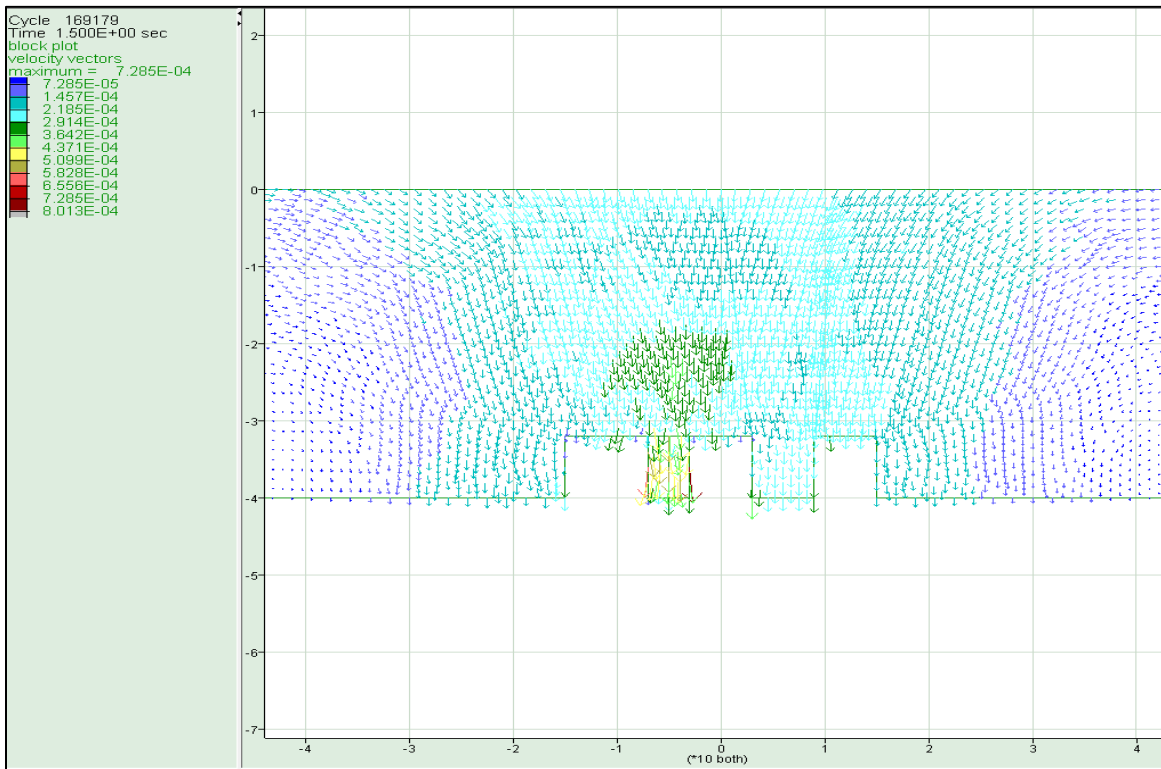
Εικόνα 55: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο δεύτερο στάδιο.

Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση του μοντέλου κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου ακόμη κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση ακόμη 1/3 του πρώτου στυλού.

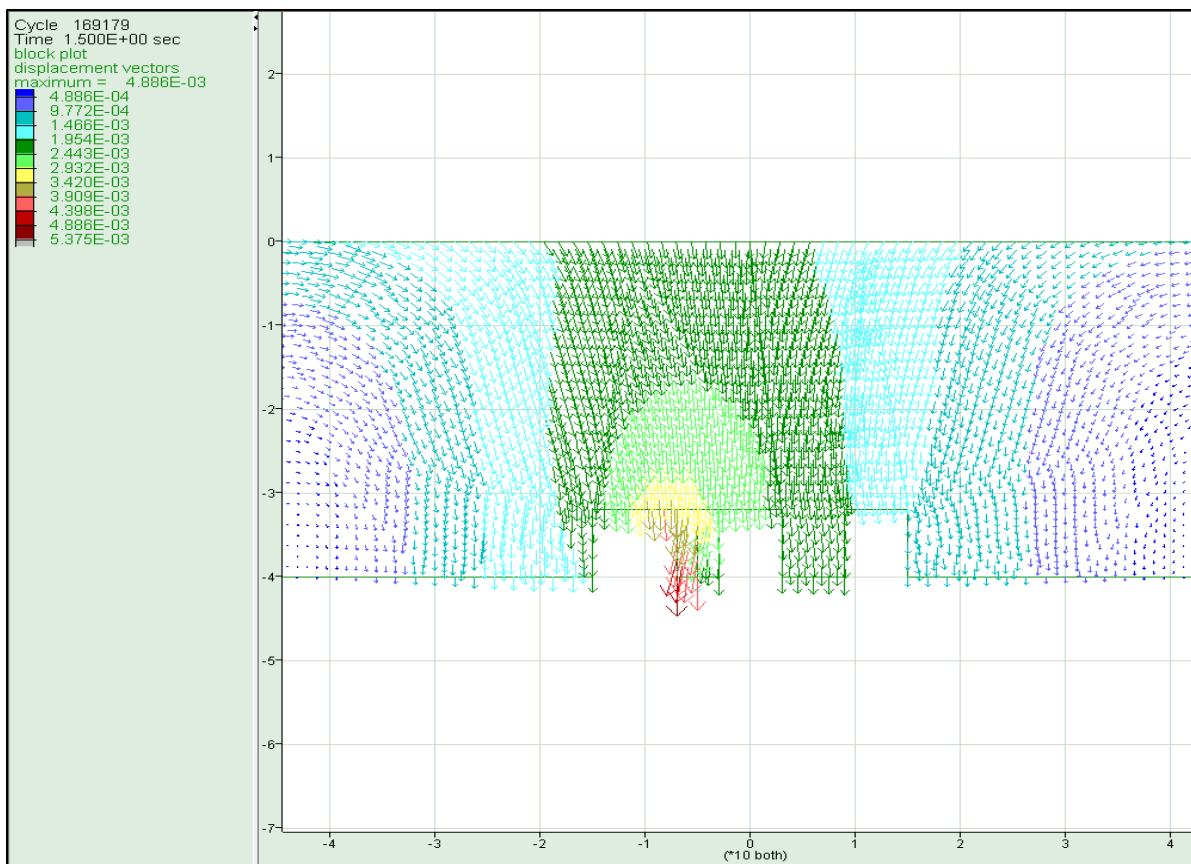
Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 56, προκύπτει διαρροή με όμοιο τρόπο με το δεύτερο στάδιο. Επίσης, οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στους κόμβους είναι υψηλότερες σε σχέση με το δεύτερο στάδιο, αλλά παραμένουν χαμηλές και οι μετακινήσεις είναι της τάξεως των χιλιοστών. (Εικόνες 57,58).



Εικόνα 56: Διαρροή πετρώματος στο τρίτο στάδιο.



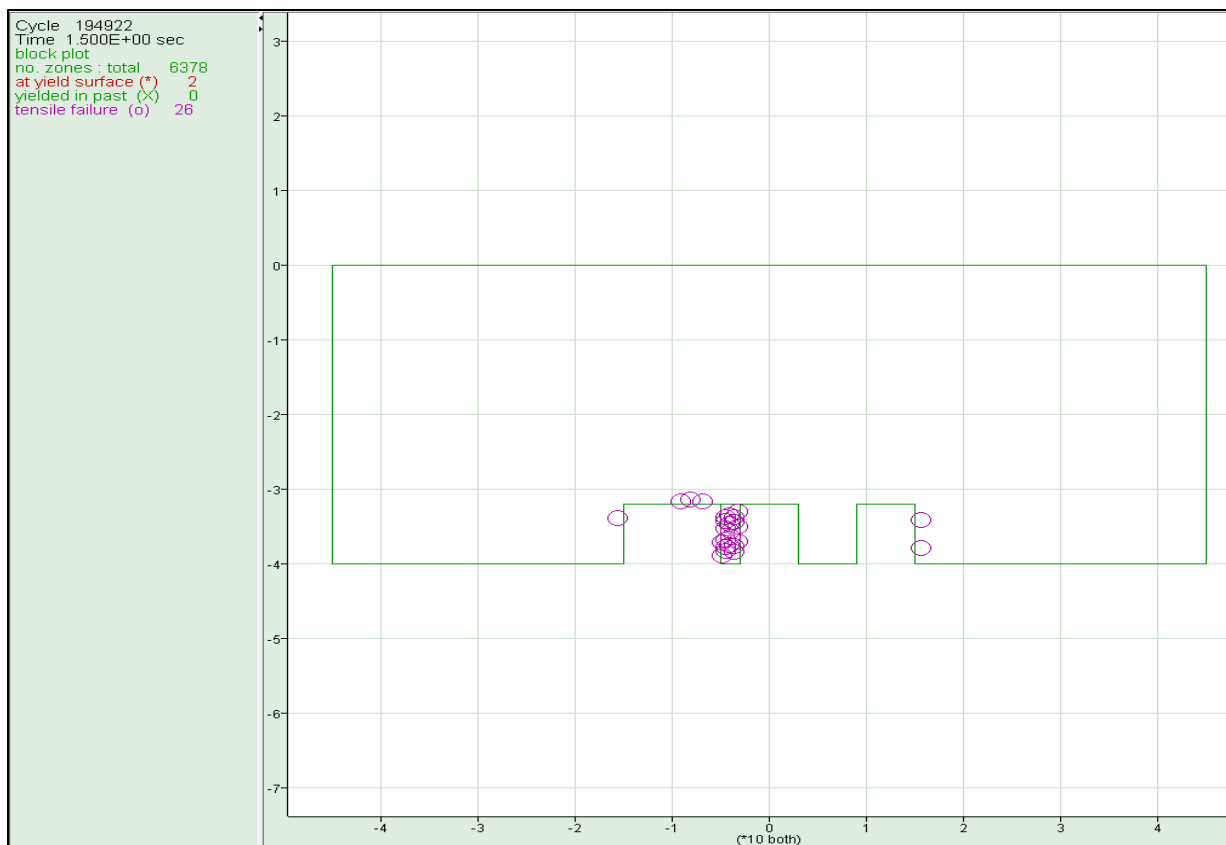
Εικόνα 57: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τρίτο στάδιο.



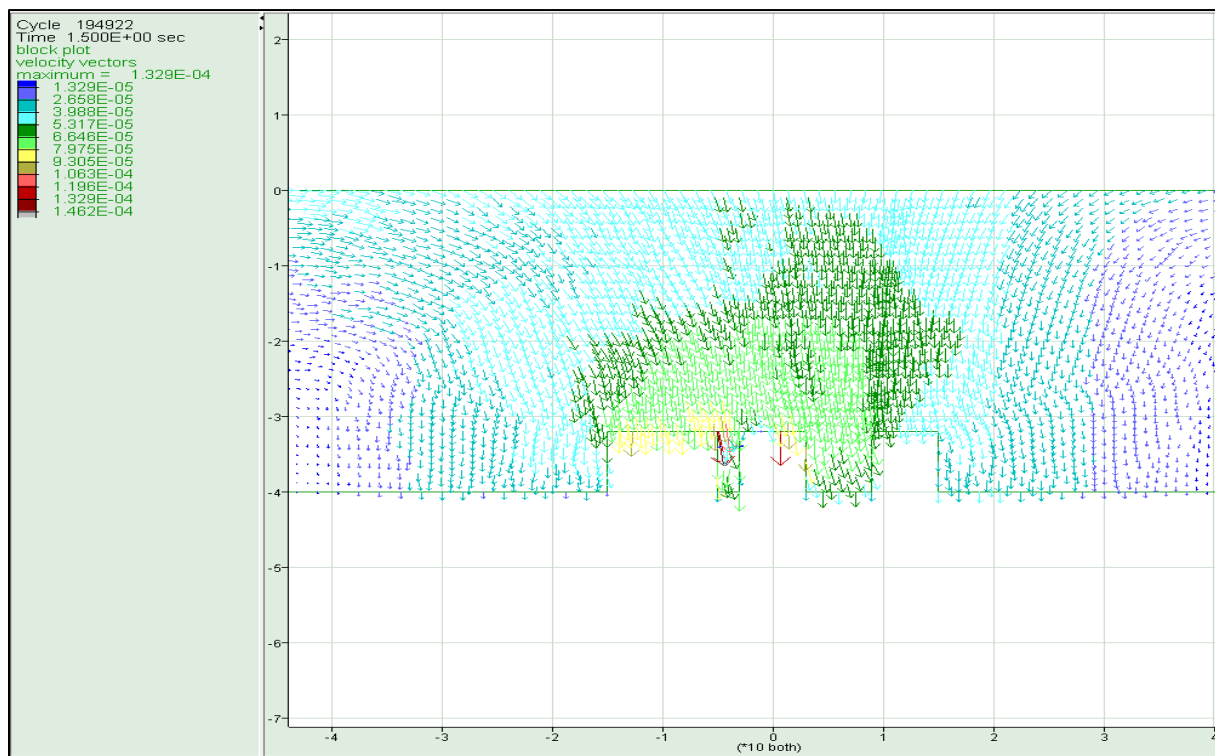
Εικόνα 58: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τρίτο στάδιο.

Ακολουθεί το τέταρτο στάδιο, όπου πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση του μοντέλου κατά την επέκταση του αριστερού θαλάμου ακόμη κατά 2m, δηλαδή κατά την αφαίρεση ακόμη 1/3 του πρώτου στύλου. Αυτό είναι και το τελικό μέγεθος του στύλου.

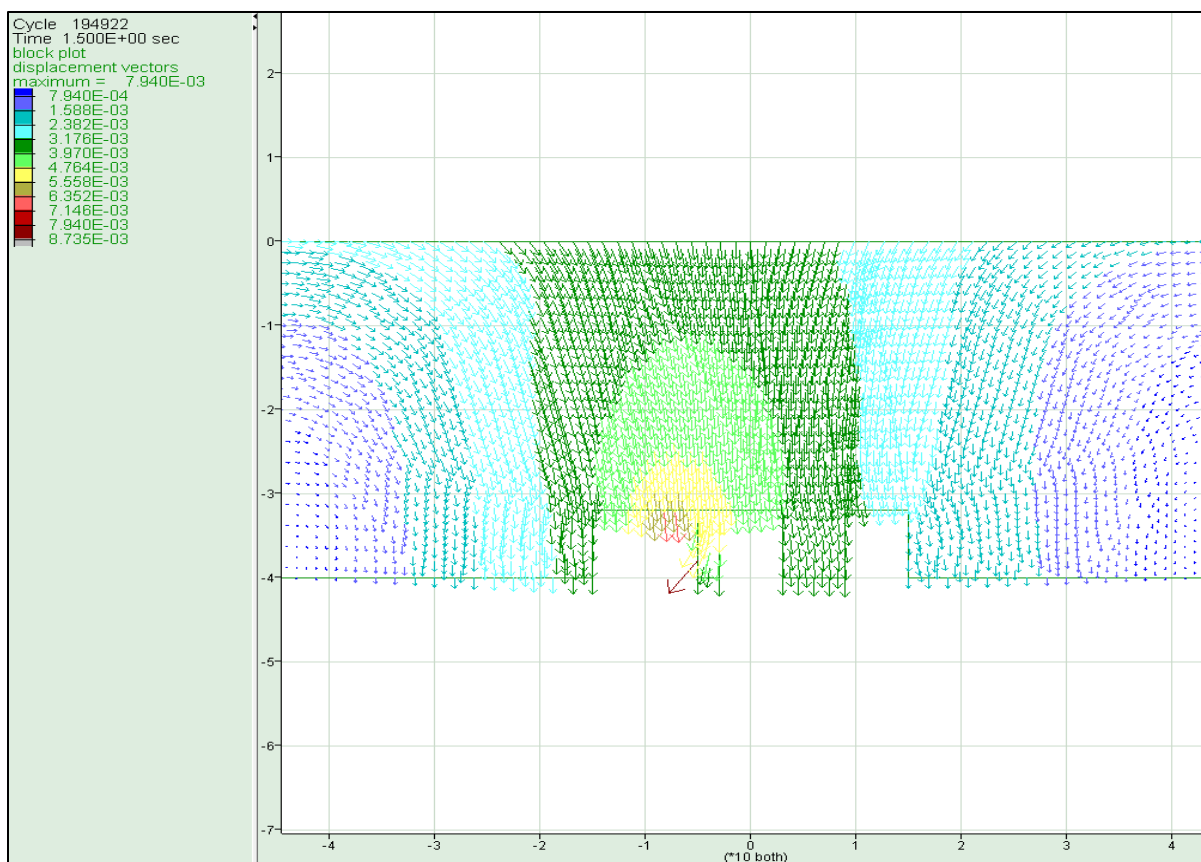
Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 59, συνεχίζει η διαρροή με όμοιο τρόπο με τα προηγούμενα στάδια. Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στους κόμβους είναι παρόμοιες σε μέγεθος με το τρίτο στάδιο και οι μετακινήσεις είναι ομοίως της τάξεως των mm παρατηρώντας μία μικρή αύξηση. (Εικόνες 60,61).



Εικόνα 59: Διαρροή πετρώματος στο τέταρτο στάδιο.



Εικόνα 60: Διανύσματα ταχύτητας κόμβων στο τέταρτο στάδιο.



Εικόνα 61: Διανύσματα μετατοπίσεων στο τέταρτο στάδιο.

### Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Από την παραπάνω προσομοίωση συμπεραίνεται ότι το βάθος έχει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του πετρώματος, διότι με τη μείωσή του μειώνονται και οι τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου.

Στην περίπτωση του μεγαλύτερου βάθους εκσκαφής παρατηρήθηκε ήδη στο τρίτο στάδιο της επίλυσης αστοχία του στύλου, λόγω της ακαριαίας αφαίρεσης ενός μέρους του. Αντιθέτως, στην περίπτωση του μικρότερου βάθους εκσκαφής, αυτό δεν παρατηρείται. Υπάρχει διαρροή, αλλά αυτή δεν είναι τόσο έντονη ώστε να προκληθεί καθολική αστοχία.

Η ταχύτητα των κόμβων του μοντέλου είναι εμφανώς μεγαλύτερη στην περίπτωση του μεγαλύτερου βάθους, όπως και οι μετακινήσεις.



## Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της ακαριαίας διάρρηξης πετρωμάτων και αξιολογήθηκε βάσει της ταχύτητας που αναπτύσσεται στους κόμβους του μοντέλου καθώς και της αστοχίας και των μετακινήσεων που προκύπτουν.

Η εκδήλωση τέτοιου φαινομένου συνοδεύεται από διάδοση ενέργειας και μπορεί να οδηγήσει σε ολική καταστροφή του έργου, του εξοπλισμού και μπορεί ακόμη και να κοστίζει την ανθρώπινη ζωή. Ο συγκεκριμένος κίνδυνος έχει αυξηθεί στη σημερινή εποχή κυρίως επειδή η επέκταση των έργων σε όλο και μεγαλύτερα βάθη είναι αναγκαία.

Αρχικά, ύστερα από εξέταση των τύπων rockburst και του μηχανισμού διάρρηξης καθώς και των συνθηκών που μπορεί να το προκαλέσουν (π.χ. συγκέντρωση τάσεων) κρίνεται αναγκαίο κριτήριο αξιολόγησης η ύπαρξη δυναμικών διαταραχών, οι οποίες μπορεί να αποτελέσουν το έναυσμα του φαινομένου.

Στη συνέχεια, στο πειραματικό μέρος κρίθηκε σημαντικό να ελεγχθεί η ταχύτητα που αναπτύσσεται στους κόμβους σε συνδυασμό με την αστοχία του πετρώματος έπειτα από στατική και δυναμική επίλυση. Δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα προσομοίωσης στο UDEC 5 με το πρώτο να είναι η προσομοίωση οδικής σήραγγας και τα επόμενα δύο να είναι μία εκμετάλλευση με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων σε δύο διαφορετικές παραδοχές.

Έγινε στατική ανάλυση, όπου καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του πετρώματος και οι συνθήκες ισορροπίας και στη συνέχεια γίνεται δυναμική ανάλυση. Στην περίπτωση της σήραγγας επιβλήθηκε δυναμική φόρτιση με επιβολή σεισμικού κύματος και στις περιπτώσεις της μεθόδου θαλάμων και στύλων έγινε ακαριαία αφαίρεση τμήματος του πετρώματος.

Όσον αφορά στην περίπτωση της διάνοιξης σήραγγας, το μοντέλο λύνεται στατικά και ισορροπεί. Κατά τη δυναμική επίλυση, κατά τη διάδοση του σεισμικού κύματος υπάρχει αύξηση της ταχύτητας των κόμβων. Υπάρχει διαρροή του πετρώματος σε μεγάλη έκταση γύρω από τη σήραγγα και ολίσθηση της ασυνέχειας που βρίσκεται στο δάπεδο της σήραγγας. Οι τιμές των μετακινήσεων είναι αρκετά υψηλές και επομένως ο συνδυασμός των παραπάνω μπορεί να θεωρηθεί ως εκδήλωση rockburst.

Κατά την εκμετάλλευση με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων γίνεται στατική ανάλυση όπως και στην περίπτωση της σήραγγας και αφαιρούνται σε τρία στάδια μέρη του ενός στύλου. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για τη δυναμική ανάλυση. Σε όλα τα στάδια στατικής ανάλυσης δεν υπάρχουν σημαντικές μετακινήσεις, καθώς είναι της τάξεως των χιλιοστών. Η διαρροή που προκαλείται δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική καθώς δεν αναπτύσσεται ούτε σημαντική ταχύτητα των κόμβων. Επομένως, η εκσκαφή μπορεί να θεωρηθεί ευσταθής, χωρίς να παραπέμπει σε εκδήλωση φαινομένου rockburst. Όσον αφορά στη δυναμική ανάλυση, η ακαριαία αφαίρεση μέρους του στύλου δίνει διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη στατική ανάλυση. Παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας των κόμβων, αστοχία του πετρώματος, αύξηση της κινητικής ενέργειας και μεγάλες μετακινήσεις και αστοχία του ενός στύλου. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός παραπέμπει σε εκδήλωση φαινομένου rockburst. Επίσης, από τη μεταβολή του βάθους της εκσκαφής και συγκεκριμένα τη μείωσή του,

συμπεραίνεται ότι δεν προκύπτει rockburst. Παρατηρήθηκαν μετακινήσεις έως της τάξεως των mm, η κινητική ενέργεια αυξάνεται στιγμιαία μέχρι τον μηδενισμό της και οι ταχύτητες των κόμβων δε λαμβάνουν υψηλές τιμές.

Τέλος, κρίνεται απαραίτητη η δυναμική ανάλυση ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλου βάθους εκσκαφής, διότι τα αποτελέσματά τους διαφέρουν ιδιαιτέρως από αυτά της στατικής ανάλυσης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η μελέτη θα έπρεπε να γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τον συνδυασμό των αναλύσεων. Επιπλέον, η τρισδιάστατη ανάλυση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τις συγκεκριμένες αναλύσεις.

## Βιβλιογραφία

Cai M. (2013), *Principles of rock support in burst-prone ground*, Tunnelling and Underground Space Technology, ELSEVIER

Charlie C. et al. (2018), *Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines*, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway

Marty Hudyma (2004), *Mining-Induced Seismicity in Underground, Mechanised, Hardrock Mines - Results of a World Wide Survey*, Laurentian University

Kabwe E., Wang Y., (2015), *Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines*. Open Journal of Safety Science and Technology, p 105-119

Kaiser P.K., Cai M. (2012), *Design of rock support system under rockburst condition*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, CSRME.

Kevin W. Harris (2015), *Improved understanding of coal pillar behavior and bump potential through the ground response curve*, University of Kentucky.

A. Mazaira and P. Konicek (2015), *Intense rockburst impacts in deep underground construction and their prevention*, Canadian Geotechnical Journal.

Ortlepp W.D. and Stacey T.R. (1994), *Rockburst Mechanisms in Tunnels and Shafts. SPECIAL SECTION: SOUTH AFRICAN TUNNELLING*.

Saqib Ahmad (2013), *Rockburst presentation*, University of Engineering and Technology, Lahore

Αγιουτάντης Ζ. (2010), *Μηχανική Πετρωμάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ

Νομικός Π.Π. (2015), *Εισαγωγή στη μηχανική πετρωμάτων*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)

Σοφιανός Α. (2018), *Υποστήριξη Υπόγειων Έργων*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)