

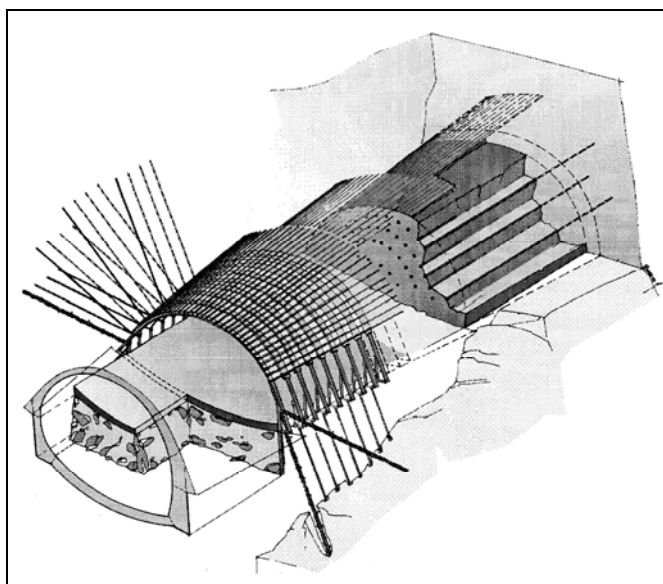


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*“Παραμετρική διερεύνηση εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής”*



**Βιόπουλος Πολυχρόνης**

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Αγιουτάντης Ζαχαρίας (επιβλέπων)

Καθηγητής Εξαδάκτυλος Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Προβιδάκης Κωνσταντίνος

Χανιά

Οκτώβριος 2006

*Αφιερώνεται,  
στην οικογένειά μου*

## Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να περιγραφούν οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής και ειδικότερα η μέθοδος προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας και έπειτα να γίνει μοντελοποίηση της με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά καινούργια όμως έχει αποδειχθεί στην πράξη η αποτελεσματικότητά της σε διάφορα κατασκευαστικά έργα (όπως σε τμήματα του Μέτρου στην Αθήνα).

Η μέθοδος αυτή γνωρίζει μεγάλη εφαρμογή ειδικά σε δύσκολες συνθήκες κατασκευής σήραγγων. Έτσι λοιπόν παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η μοντελοποίηση και η παραμετρική διερεύνηση της μεθόδου σε μια προσπάθεια όσο το δυνατόν καλύτερης προσομοίωσης των συνθηκών διάνοιξης σήραγγας με αυτήν.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο MSC Marc Mentat - το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων – και προσφέρει πολλές δυνατότητες στο χρήστη.

Για την καλύτερη επίλυση του θέματος κατασκευάστηκαν δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα ενώ το πέτρωμα της σήραγγας επιλύθηκε και σαν ελαστικό αλλά και σαν ελαστοπλαστικό υλικό με κριτήριο αστοχίας γραμμικό Mohr – Coulomb.

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί με επιτυχία χωρίς την υποστήριξη ορισμένων προσώπων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης τα οποία θα ήθελα στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω.

Μεγάλες ευχαριστίες λοιπόν οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αγιουτάντη Ζαχαρία για την ανάθεση αυτού του πολύ ενδιαφέροντος θέματος, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε όποτε χρειάστηκε, για την διόρθωση και τα εύστοχα σχόλιά του πάνω στο αντικείμενο, για τον χρόνο που διέθεσε και γενικά για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Στον καθηγητή κύριο Εξαδάκτυλο Γεώργιο για το χρόνο που διέθεσε για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και στην αξιολόγηση της εργασίας.

Στον αναπληρωτή καθηγητή κύριο Προβιδάκη Κωνσταντίνο για το χρόνο που διέθεσε για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και στην αξιολόγηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον Μηχανικό Μεταλλείων κύριο Μαυριγιαννάκη Στέλιο για τις ιδέες του, την μεγάλη διάθεσή του να με βοηθήσει σε κάποιες δύσκολες στιγμές, την αισιοδοξία του και την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν πραγματικά δίπλα μου σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης, στις χαρούμενες και στις άσχημες στιγμές.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Πρόλογος.....	ii
Περιεχόμενα.....	iii
Κατάλογος σχημάτων και πινάκων.....	v
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 2 Μέθοδοι Υποστήριξης Σηράγγων .....</b>	<b>3</b>
2.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης .....	4
2.1.1 Κοχλίωση.....	4
2.1.2 Μικροπάσσαλοι.....	9
2.2 Μέθοδοι Βελτίωσης Βραχώμαζας.....	10
2.2.1 Ενεμάτωση με χαμηλή πίεση .....	10
2.2.2 Ενεμάτωση υψηλής πίεσης.....	12
2.2.3 Ψύξη εδαφών.....	14
2.2.4 Αποστράγγιση.....	15
2.3 Μέθοδοι Προσωρινής Υποστήριξης.....	17
2.3.1 Προπασσάλωση οροφής.....	17
2.3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	18
2.3.3 Χαλύβδινα πλαίσια.....	19
2.3.4 Περιφερειακή πρότμηση.....	21
2.3.5 Μέθοδος Pretunnel.....	22
<b>Κεφάλαιο 3 Μέθοδοι Προπασσάλωσης.....</b>	<b>23</b>
3.1 Μέθοδος Προπασσάλωσης Οροφής με Ενεμάτωση Υψηλής Πίεσης.....	24
3.2 Μέθοδος Προπασσάλωσης Οροφής Pipe Roof.....	26
3.3 Μέθοδος Προπασσάλωσης Οροφής με Χαλύβδινες Δοκούς Προπορείας.....	28
3.3.1 Εγκατάσταση Χαλύβδινων Δοκών Προπορείας και Κατασκευή ομπρέλας.....	29
3.3.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας.....	33
<b>Κεφάλαιο 4 Αριθμητική ανάλυση σε σήραγγες.....</b>	<b>35</b>
4.1 Γενικά.....	35

4.2 Στοιχεία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	36
4.2.1 Γενικά.....	36
4.2.2 Φιλοσοφία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	36
4.2.3 Διαδικασία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	38
4.2.4 Διακριτοποίηση.....	39
4.2.5 Είδη στοιχείων.....	40
4.2.6 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου.....	41
4.2.7 Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες.....	42
4.2.8 Τύποι συνοριακών συνθηκών.....	43
4.3 Ελαστική και Ελαστοπλαστική Συμπεριφορά Υλικών.....	43
<b>Κεφάλαιο 5 Δισδιάστατα Μοντέλα.....</b>	<b>45</b>
5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	45
5.2 Ελαστικά Μοντέλα.....	50
5.2.1 Κύρια μοντέλα.....	50
5.2.2 Μοντέλο διατομής με διπλή σειρά δοκών προπορείας.....	52
5.2.3 Μοντέλο διατομής με κυκλικά στοιχεία δοκών προπορείας.....	55
5.2.4 Μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο.....	59
5.3 Ελαστοπλαστικά Μοντέλα.....	64
5.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα.....	69
<b>Κεφάλαιο 6 Τρισδιάστατα Μοντέλα.....</b>	<b>71</b>
6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	71
6.2 Ελαστικά Μοντέλα.....	75
6.2.1 Κύρια μοντέλα.....	75
6.2.2 Μοντέλο δοκών προπορείας με χαλύβδινο πλαίσιο.....	77
6.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα.....	83
<b>Κεφάλαιο 7 Σύγκριση Δισδιάστατων – Τρισδιάστατων Μοντέλων.....</b>	<b>84</b>
7.1 Μοντέλο ανυποστήρικτης διατομής.....	84
7.2 Μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας.....	85
7.3 Μοντέλο διατομής με ζώνη δοκών προπορείας.....	86
7.4 Μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο.....	88
7.5 Χαρακτηριστικά διαγράμματα.....	89
<b>Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα – Προτάσεις.....</b>	<b>91</b>
Βιβλιογραφία.....	94
Παράρτημα.....	96

## Κατάλογος Σχημάτων

2.1: Κοχλίας αναπτυσσόμενου κελύφους.....	5
2.2: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη.....	6
2.3: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο.....	7
2.4: Σχήματα πλακών αγκύρωσης.....	7
2.5: Μη προεντεταμένος διαχωριζόμενος κοχλίας σημειακής αγκύρωσης (split set) ®.....	8
2.6: Μη προεντεταμένος σωληνοειδής κοχλίας σημειακής αγκύρωσης (swellex) ®.....	8
2.7: Εφαρμογές μικροπασσάλων.....	9
2.8: Ενεμάτωση από την επιφάνεια.....	11
2.9: Τσιμεντενέσεις στο μέτωπο.....	12
2.10: Τεχνική τσιμεντοεδαφοπασσάλων (Jet grouting).....	13
2.11: Ψεκάσμος μίγματος από τα ακροφύσια της διατρητικής στήλης.....	13
2.12: Στάδια ανάπτυξης της ζώνης ψύξης γύρω από μια σήραγγα.....	15
2.13: Αποστράγγιση σήραγγας.....	16
2.14: Σύστημα Forepoling.....	17
2.15: Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	19
2.16: Χαλύβδινο πλαίσιο HEB 180.....	20
2.17: Μηχάνημα περιφερειακής πρότμησης.....	21
2.18: Μηχάνημα pretunnel.....	22
3.1: Ομπρέλα προστασίας.....	23
3.2: Jet grouting arch.....	24
3.3A: Jet grouting arch εντός της σήραγγας.....	25
3.3B: Jet grouting arch από την επιφάνεια.....	25
3.4: Διατάξεις σωλήνων στη μέθοδο pipe roof.....	26
3.5: Μέθοδος pipe roof κάτω από αυτοκινητόδρομο.....	27
3.6: Μέθοδος pipe roof κάτω από σιδηρόδρομο.....	27
3.7: Προπασσάλωση με χαλύβδινες δοκούς προπορείας, βήματα εκσκαφής - προχώρησης.....	30
3.8: Διπλή σειρά δοκών προπορείας.....	32
3.9A: Σταθερό προφίλ σήραγγας.....	33

3.9B: Προφίλ σήραγγας με βαθμίδες.....	33
4.1: Διακριτοποίηση σώματος.....	37
4.2: Είδη στοιχείων.....	41
4.3: Τύποι ελαστικής συμπεριφοράς υλικού.....	44
4.4: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού.....	44
5.1: Γενικά χαρακτηριστικά δισδιάστατου μοντέλου.....	47
5.2: Συνολική διακριτοποίηση.....	48
5.3: Τμήμα διακριτοποίησης.....	48
5.4: Συνοριακές συνθήκες δισδιάστατου μοντέλου.....	49
5.5: Κόμβος ελέγχου.....	49
5.6: Διατομή με δοκούς προπορείας .....	50
5.7: Διατομή με ζώνη δοκών προπορείας.....	50
5.8: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας .....	51
5.9: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας .....	51
5.10: Διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας.....	52
5.11: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας .....	53
5.12: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας .....	53
5.13: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας .....	54
5.14: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας.....	54
5.15: Διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία.....	55
5.16: Διακριτοποίηση διατομής με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία.....	56



5.17: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία.....	56
5.18: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία.....	57
5.19: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με forepoling και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία.....	57
5.20: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία.....	58
5.21: Διάγραμμα εμβαδών των στοιχείων δοκών προπορείας συναρτήσει των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων.....	58
5.22: Πλαίσιο προσομοιωμένο με γραμμικά στοιχεία (beam elements).....	59
5.23: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	60
5.24: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	60
5.25: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	61
5.26: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	61
5.27: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	62

5.28: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	62
5.29: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην συνολική περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	63
5.30: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο. Μοντέλα με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	65
5.31: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο. Μοντέλα με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	65
5.32: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για ανυποστήρικτη διατομή με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	66
5.33: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για ανυποστήρικτη διατομή με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	66
5.34: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	67
5.35: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	67

5.36: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	68
5.37: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.....	68
5.38: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας.....	69
5.39: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου.....	70
6.1: Τμήμα εξορυγμένου πετρώματος.....	72
6.2: Συνολική διακριτοποίηση.....	73
6.3: Τμήμα διακριτοποίησης.....	73
6.4: Συνοριακές συνθήκες τρισδιάστατου μοντέλου.....	74
6.5: Διατομή με δοκούς προπορείας.....	75
6.6: Διατομή με ζώνη δοκών προπορείας .....	75
6.7: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας.....	76
6.8: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας .....	76
6.9: Τοπικοί άξονες διατομής πλαισίου.....	77
6.10: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	78

6.11: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	78
6.12: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	79
6.13: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	79
6.14: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	80
6.15: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	80
6.16: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην συνολική περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	81
6.17: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο.....	82
6.18: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας.....	83
6.19: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου.....	83
7.1: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	84
7.2: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	85

7.3: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	85
7.4: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	86
7.5: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	86
7.6: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	87
7.7: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	88
7.8: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	88
7.9: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο.....	89

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Πεδία εφαρμογής διαφόρων μεθόδων υποστήριξης σηράγγων.....	34
Πίνακας 5.1: Βασικά χαρακτηριστικά δισδιάστατου μοντέλου.....	45
Πίνακας 5.2: Αριθμός στοιχείων για κάθε δισδιάστατο μοντέλο.....	46
Πίνακας 6.1: Αριθμός στοιχείων για κάθε τρισδιάστατο μοντέλο.....	72

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Παρόλο που ο άνθρωπος, σε κάθε χρονική στιγμή της Ιστορίας, έχει συνδέσει το όνομά του με την κατασκευή σιηράγγων και στοών, η κατασκευή μιας σήραγγας, παραμένει ένα από τα δυσκολότερα γεωτεχνικά έργα.

Ωστόσο τα τελευταία χρόνια η κατασκευή σιηράγγων βρίσκει μεγάλη εφαρμογή, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές όπου ο υπέργειος χώρος είναι περιορισμένος για την κατασκευή υδρευτικών, αποχετευτικών, συγκοινωνιακών και άλλων έργων αλλά και σε μη αστικές περιοχές για την κατασκευή συγκοινωνιακών έργων σε ορεινούς όγκους. Η εξέλιξη του μεταλλευτικού εξοπλισμού και η ανάπτυξη νέων κατασκευαστικών τεχνικών είχε ως επακόλουθο την διάνοιξη όλο και περισσότερων σιηράγγων..

Η μέθοδος προπασσάλωσης οροφής είναι από τις πιο διαδεδομένες νέες τεχνικές υποστήριξης σιηράγγων διότι είναι εύκολη η διαδικασία κατασκευής της, μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε γεωλογικό περιβάλλον και να συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι να αναπτυχθούν οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής και να διερευνηθεί παραμετρικά η εντατική κατάσταση σε μια σήραγγα που διανοίγεται με τη μέθοδο αυτή.

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει ως εξής:

Στο *Κεφάλαιο 2*, γίνεται μια κατηγοριοποίηση των μεθόδων υποστήριξης σιηράγγων και αναλύονται οι υποκατηγορίες που τις αποτελούν. Γίνεται αναφορά στα βασικά στοιχεία τα οποία χαρακτηρίζουν την κάθε μέθοδο

Στο *Κεφάλαιο 3*, αναλύονται οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στη μέθοδο προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας δεδομένου ότι είναι η μέθοδος προπασσάλωσης η οποία αναλύεται στη συνέχεια με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εγκατάστασης των χαλύβδινων δοκών προπορείας και η κατασκευή της ομπρέλας. Επιπλέον δίνονται κάποια στοιχεία για τα οποία πλεονεκτεί η συγκεκριμένη μέθοδος έναντι άλλων μεθόδων υποστήριξης σιηράγγων.

Στο *Κεφάλαιο 4*, αναφέρεται η χρησιμότητα των αριθμητικών μεθόδων σε θέματα αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων ελαστικότητας-πλαστικότητας σε διάφορους τύπους υλικών, αναφέρονται ονομαστικά οι κύριες αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης ενώ

παρατίθενται στοιχεία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμα αναφέρεται η βασική ιδέα της ελαστικής και ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των υλικών.

Στο *Κεφάλαιο 5*, αναλύονται και παρατίθενται τα αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση των δισδιάστατων μοντέλων της σήραγγας που κατασκευάζεται με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής με ελαστική και με ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Στο *Κεφάλαιο 6*, αναλύονται και παρατίθενται τα αποτελέσματα από την αριθμητική επίλυση των τρισδιάστατων μοντέλων της σήραγγας με ελαστική συμπεριφορά. Η αριθμητική επίλυση των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων μοντέλων, έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το λογισμικό MSC Marc Mentat 2005

Στο *Κεφάλαιο 7*, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δισδιάστατα και τα τρισδιάστατα μοντέλα.

Στο *Κεφάλαιο 8*, εξάγονται τα συμπεράσματα και γίνονται κάποιες προτάσεις για την βελτίωση της εργασίας αλλά και την περαιτέρω διερεύνησή της.

## Κεφάλαιο 2

### Μέθοδοι Υποστήριξης Σηράγγων

Ο κύριος σκοπός που εξυπηρετεί η αρχική υποστήριξη στις σήραγγες, είναι η σταθεροποίηση και η διατήρηση της σήραγγας μετά την εκσκαφή της και η συμβολή της στην ασφάλεια των εργαζόμενων και του εξοπλισμού.

Κατά την όρυξη μιας σήραγγας, η αρχική υποστήριξη, συνήθως τοποθετείται ταυτόχρονα με την εκσκαφή. Στις εκσκαφές που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο της διάτρησης και ανατίναξης, η αρχική ενίσχυση, συνήθως εγκαθίσταται αφού ανατιναχθεί και απομακρυνθεί το προηγούμενο τμήμα του πετρώματος και πριν διατρηθεί, γομωθεί και ανατιναχθεί το επόμενο τμήμα του πετρώματος. Στις σήραγγες που εξορύσσονται με τη μέθοδο της ολομέτωπου κοπής, όπου η εκσκαφή είναι συνεχής, η υποστήριξη εγκαθίσταται καθώς το μηχάνημα ολομέτωπου κοπής (Tunnel Boring Machine – TBM) προχωράει. Λόγω της κοντινής σχέσης μεταξύ των διεργασιών εκσκαφής και αρχικής υποστήριξης, θα πρέπει να υπάρχει εναρμονισμός μεταξύ τους και σωστός σχεδιασμός έτσι ώστε οι διεργασίες αυτές να είναι επαναλαμβανόμενες (να υπάρχει δηλαδή ένας συνεχής κύκλος εργασιών εκσκαφής και υποστήριξης) (USACE, 1997).

Η αρχική υποστήριξη στις σήραγγες, συνίσταται από *μεθόδους ενίσχυσης της βραχώμαζας* (rock reinforcement) όπως η κοχλίωση, η τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων και ατσάλινων πλεγμάτων, η τοποθέτηση μικροπασσάλων, από *μεθόδους βελτίωσης της βραχώμαζας* (rock improvement) όπως η ενεμάτωση υψηλής πίεσης, η ενεμάτωση χαμηλής πίεσης, η ψύξη εδάφους, η αποστράγγιση εδάφους και από *μεθόδους προσωρινής υποστήριξης σηράγγων* (pre-support) όπως η προπασσάλωση οροφής, η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η εγκατάσταση μεταλλικών πλαισίων, η περιφερειακή πρότμηση και η μέθοδος pretunnel.

Όσο αυξάνεται η ποιότητα του πετρώματος, κατά την εκσκαφή, μειώνεται και η ανάγκη για αρχική υποστήριξη. Μετά την εγκατάσταση της αρχικής υποστήριξης, μπορεί να μην χρειαστεί επιπλέον υποστήριξη. Τότε η αρχική υποστήριξη λαμβάνει το ρόλο της τελικής υποστήριξης. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, χρειάζεται επιπλέον υποστήριξη, όπως η τελική επένδυση από σκυρόδεμα.

Στις επόμενες ενότητες, θα αναλυθούν οι βασικές μέθοδοι υποστήριξης σηράγγων που αποτελούνται όπως προαναφέρθηκε από τις μεθόδους ενίσχυσης της βραχώμαζας, τις μεθόδους βελτίωσης της βραχώμαζας και τις μεθόδους προσωρινής υποστήριξης.



## 2.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Βραχώμαζας

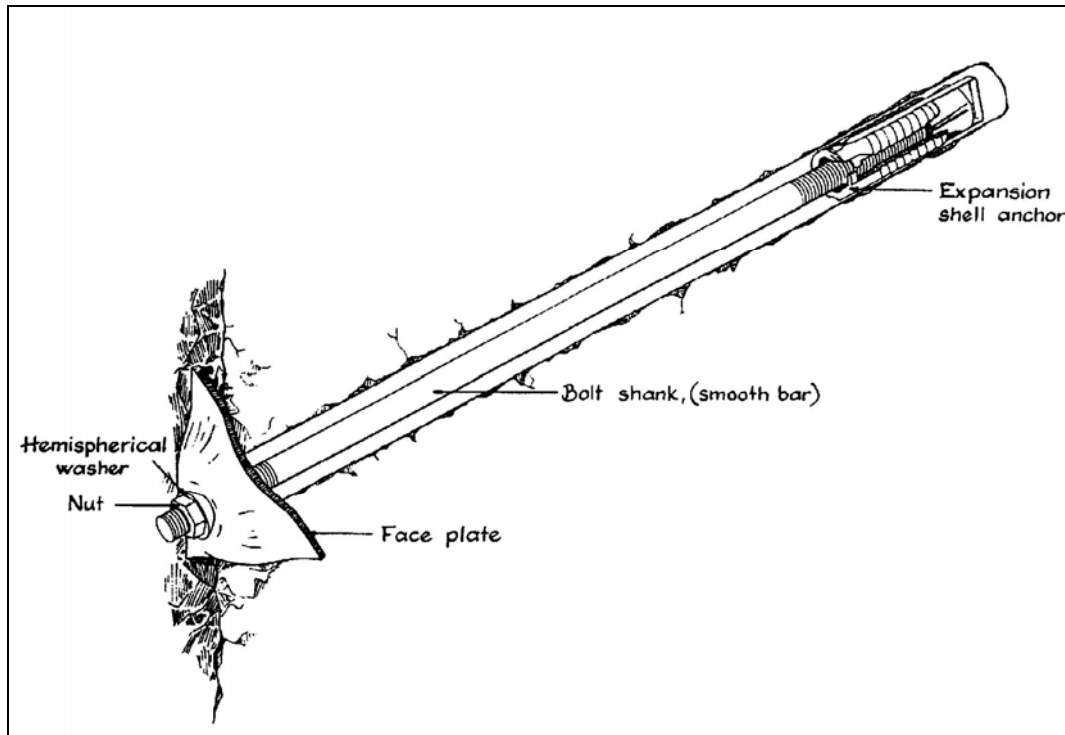
Ο όρος ενίσχυση της βραχώμαζας (rock reinforcement), καλείται έτσι εξαιτίας της λειτουργίας της να “βοηθάει” τη βραχώμαζα να αυτοϋποστηρίζεται. Οι μέθοδοι ενίσχυσης της βραχώμαζας, ενεργοποιούν τη φυσική αντοχή του πετρώματος εν αντιθέσει με τις μεθόδους προσωρινής υποστήριξης, στις οποίες η υποστήριξη που εφαρμόζεται αντιστοιχεί στο πλήρες φορτίο του πετρώματος. Οι βασικές μέθοδοι ενίσχυσης της βραχώμαζας είναι η *κοχλίωση* (bolting) και οι *μικροπάσσαλοι* (micropiles). Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση, τοποθετούνται μέσα στη μάζα του πετρώματος και γίνονται μέρος του εν αντιθέσει με τις μεθόδους προσωρινής υποστήριξης (όπως είναι για παράδειγμα η σκυροδέτηση με οπλισμένο σκυρόδεμα) όπου περιορίζονται οι μετακινήσεις του πετρώματος και προσφέρεται εξωτερική υποστήριξη στη βραχώμαζα (USACE, 1997).

### 2.1.1 Κοχλίωση

Η κοχλίωση των πετρωμάτων (bolting) εφαρμόζεται για την παρεμπόδιση της αύξησης του βέλους κάμψης των υπερκείμενων του ανοίγματος πετρωμάτων και συνεπώς στην αποφυγή της αστοχίας τους. Ο μηχανισμός της κοχλίωσης είναι παρόμοιος με αυτόν που λειτουργεί κατά τη υποστήριξη με πλαίσια ή άλλα συστήματα μεταφοράς φορτίων (Αγιουτάντης, 2002). Ένας κλασικός κοχλίας αποτελείται από μια μεταλλική ράβδο, η οποία στο ένα άκρο της έχει το σύστημα αγκύρωσης και στο άλλο άκρο είναι δυνατόν να τοποθετηθεί περικόχλιο (παξιμάδι), το οποίο αφού συσφιχθεί με ορισμένη ροπή, επιβάλλει μέσω μεταλλικής πλάκας αντίστοιχες τάσεις στο πέτρωμα (Αγιουτάντης, 2002).

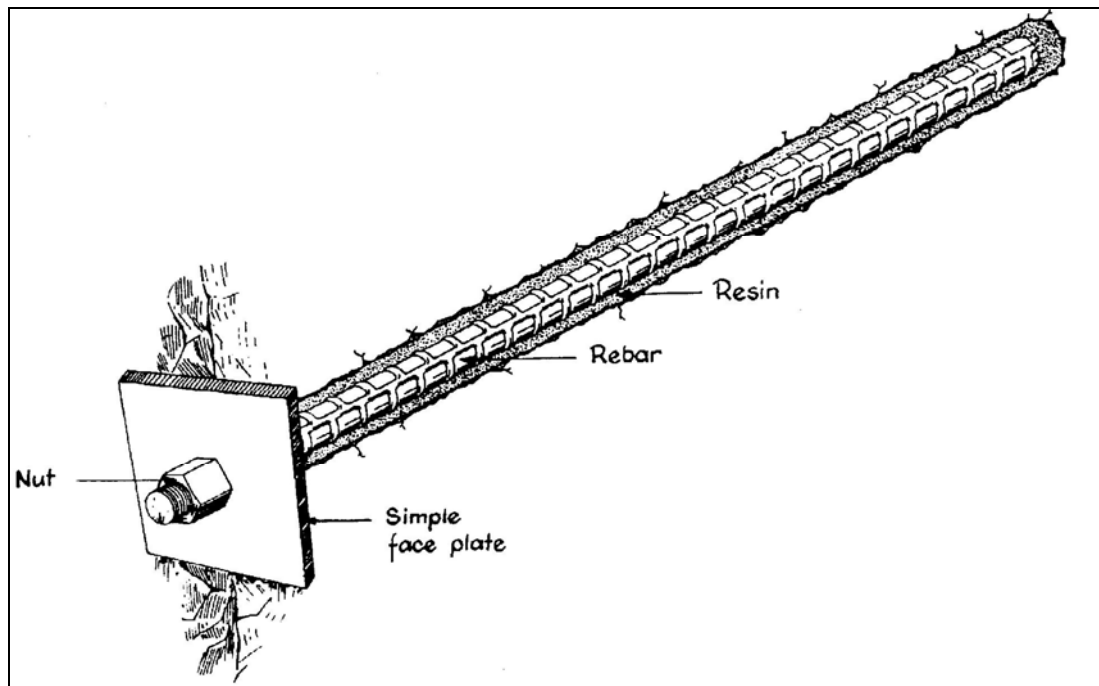
Οι κοχλίες μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με την προένταση της μεταλλικής ράβδου, στους προεντεταμένους και στους μη προεντεταμένους αλλά και ανάλογα με τον τύπο της αγκύρωσης σε κοχλίες σημειακής αγκύρωσης και σε κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης. Κάποιοι τύποι κοχλίων είναι οι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης με μεταλλική σφήνα, οι κοχλίες αναπτυσσόμενου κελύφους (σχήμα 2.1), οι προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη (σχήμα 2.2), οι προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο (σχήμα 2.3), οι μη προεντεταμένοι διαχωριζόμενοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (split set) (σχήμα 2.5)

και οι μη προεντεταμένοι σωληνοειδείς κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (swellex) (σχήμα 2.6). Οι κοχλίες split set και swellex, θεωρείται συχνά ότι προσφέρουν παροδική ενίσχυση στο πέτρωμα διότι θεωρείται αβέβαιη, μετά από ένα χρονικό διάστημα, η αντίστασή τους σε φαινόμενα διάβρωσης.



Σχήμα 2.1: Κοχλίας αναπτυσσόμενου κελύφους (USACE, 1997)

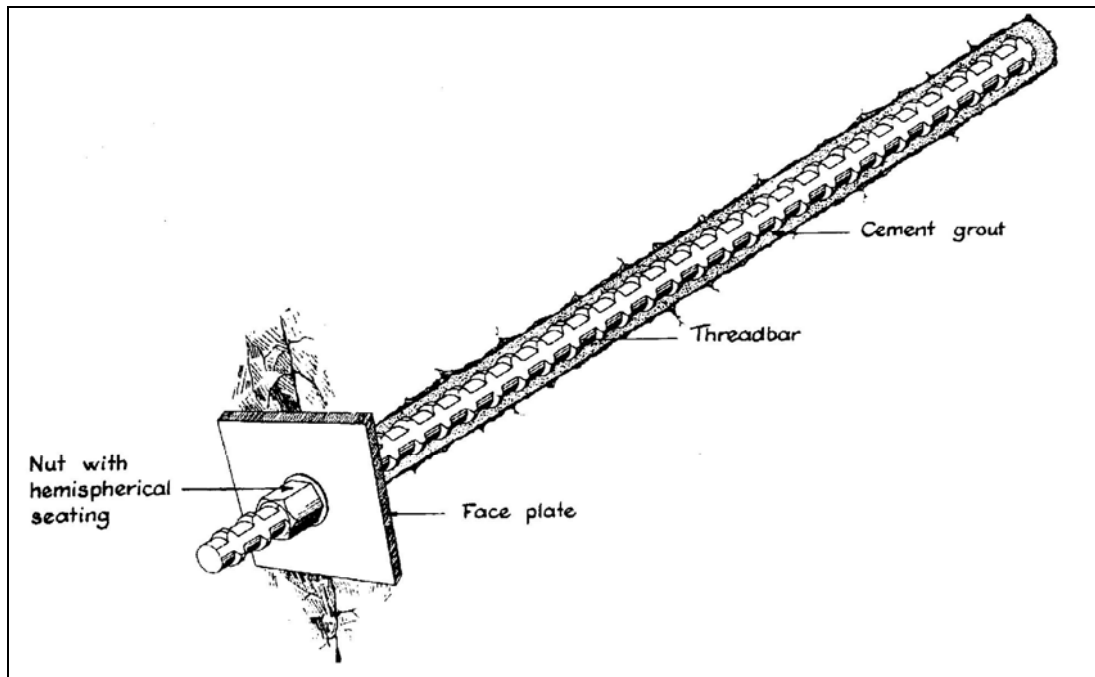
Για να εγκατασταθεί ένας κοχλίας, πρέπει να ορυχθεί στο πέτρωμα διάτρημα συγκεκριμένης διαμέτρου και συγκεκριμένου μήκους, ανεξαρτήτου του είδους του κοχλίου που θα εισαχθεί. Εκτός από την περίπτωση των κοχλίων split set, η διάμετρος του διατρήματος, μπορεί να ποικίλει. Είναι σύνηθες να υπάρχει 10% - 20% απόκλιση της διαμέτρου του διατρήματος εξαιτίας των μετακινήσεων και των δονήσεων που συμβαίνουν λόγω της διάτρησης και της εναλλαγής των πετρωμάτων. Αφού γίνει η όρυξη του διατρήματος, γίνεται ο καθαρισμός του. Έπειτα εισάγεται ο κοχλίας καθώς και το ένεμα (ρητίνη ή τσιμέντο) εάν αυτό απαιτείται. Το επόμενο στάδιο εγκατάστασης είναι να τοποθετηθεί το περικόχλιο και η πλάκα εφαρμογής τάσεων. Η πλάκα εφαρμογής τάσεων, η οποία μπορεί να έχει κυκλικό, τετραγωνικό ή τριγωνικό σχήμα (σχήμα 2.4), δημιουργεί την αντίδραση του κοχλίου στο πέτρωμα και επιβάλλει τις αντίστοιχες τάσεις σε αυτό. Επίσης στην πλάκα αυτή μπορεί να στερεωθεί μεταλλικό πλέγμα.



Σχήμα 2.2: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη (USACE, 1997)

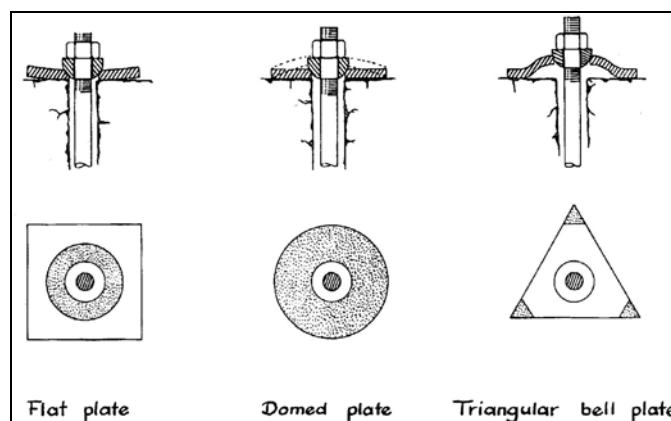
Το τελευταίο στάδιο της εγκατάστασης του κοχλίου είναι η τάνυσή του. Οι κοχλίες στους οποίους χρησιμοποιείται ένεμα, μπορούν να μην τανυστούν μετά την εγκατάστασή τους ή να τανυστούν αφού το ένεμα αποκτήσει την απαιτούμενη αντοχή. Όταν το ένεμα είναι ρητίνη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρητίνη γρήγορης πήξεως για να επιταχυνθεί η διαδικασία. Όταν το ένεμα είναι τσιμέντο, αυτό πήζει αργότερα ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί κάποιος επιταχυντής.

Στις σήραγγες, η τάνυση των κοχλίων γίνεται συνήθως αφού πρώτα προσαρμοστεί η βραχόμαζα στις αλλαγές των τάσεων που γίνονται εξαιτίας της διαδικασίας της εκσκαφής. Μέχρι να γίνει αυτό οι κοχλίες αφήνονται χωρίς την επιβολή τάνυσης.

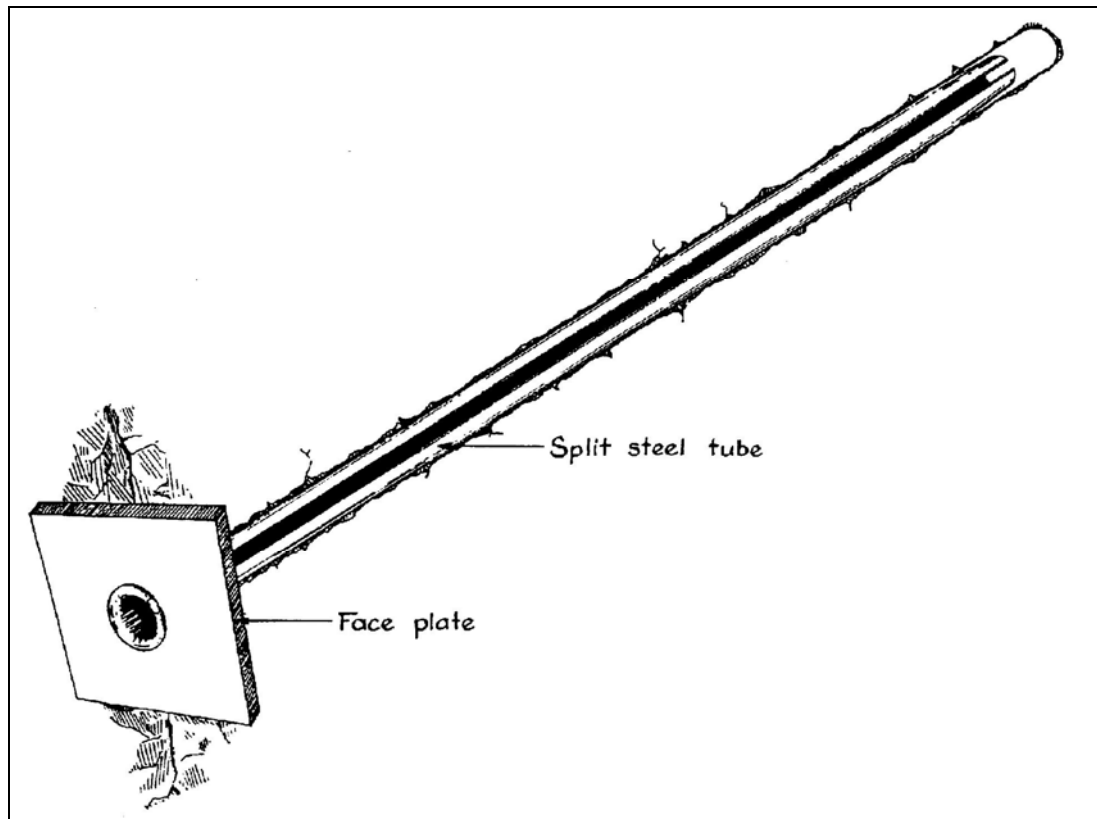


Σχήμα 2.3: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο (USACE, 1997)

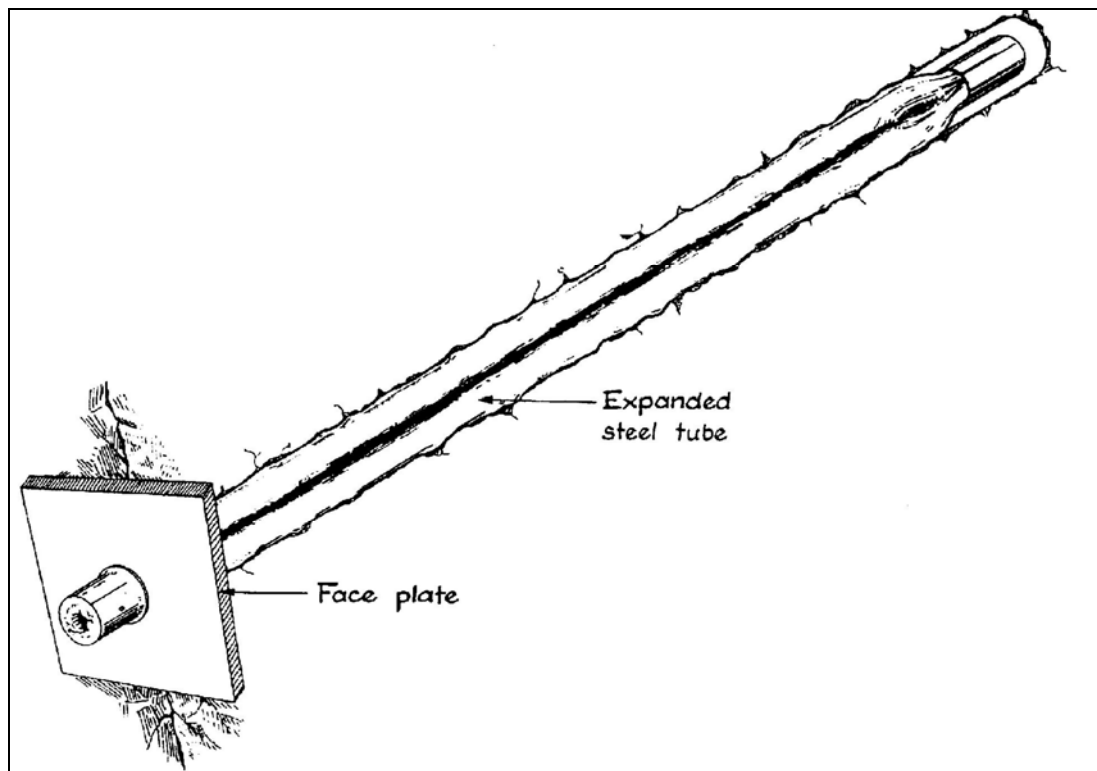
Μεγάλο ρόλο στην κοχλίωση έχει ο έλεγχος των κοχλίων. Αν οι κοχλίες δεν έχουν εγκατασταθεί σωστά, δεν θα αποδώσουν την αναμενόμενη λειτουργία. Πιθανοί λόγοι λανθασμένων εγκαταστάσεων είναι: λάθος επιλογή συστήματος αγκύρωσης, λάθος τοποθεσία του διατρήματος, λάθος μήκος του διατρήματος, λάθος διάμετρος του διατρήματος, ανεπαρκής καθαρισμός του διατρήματος, ανεπαρκές σφράγισμα διατρήματος, ανεπαρκής τοποθέτηση ενέματος, διάβρωση του μετάλλου του κοχλίου, μη επαρκής σύνδεση περικοχλίου και πλάκας στερέωσης, ακατάλληλο μίγμα ενέματος, κ.α. (USACE, 1997). Πολλά από τα προβλήματα αυτά, μπορούν να αποφευχθούν ακολουθώντας τις συστάσεις του κατασκευαστή.



Σχήμα 2.4: Σχήματα πλακών αγκύρωσης (USACE, 1997)



Σχήμα 2.5: Μη προεντεταμένος διαχωριζόμενος κοχλίας σημειακής αγκύρωσης (split set) ®  
(USACE, 1997)



Σχήμα 2.6: Μη προεντεταμένος σωληνοειδής κοχλίας σημειακής αγκύρωσης (swellex) ®  
(USACE, 1997)

### 2.1.2 Μικροπάσσалоι

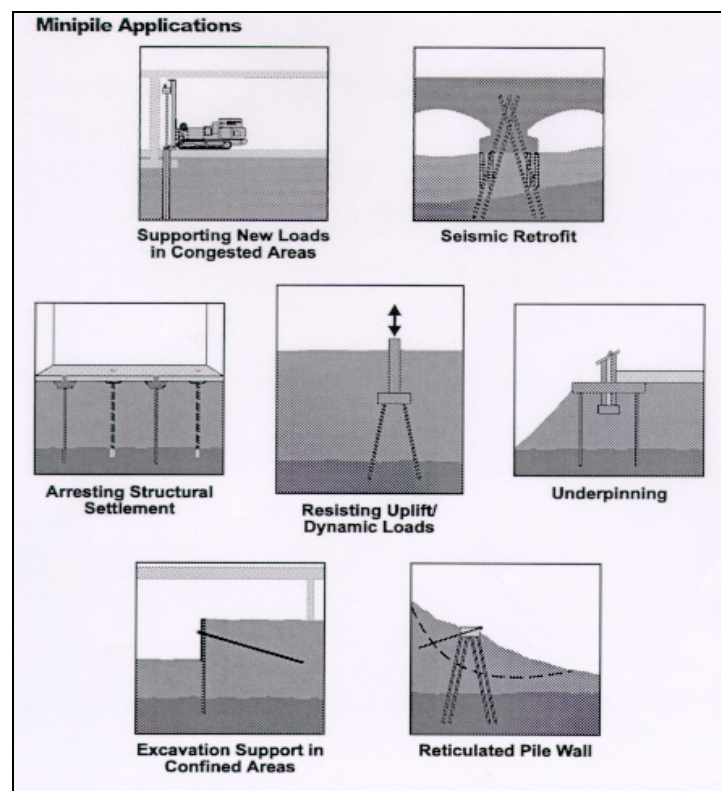
Οι μικροπάσσалоι (micropiles) είναι εύκαμπτα δομικά στοιχεία εντός του εδάφους που αποσκοπούν στην ανάληψη φορτίων. Οι πάσσалоι αυτοί έχουν μικρή διάμετρο (έως 300 mm για κατασκευή με εκσκαφή και έως 150 mm για κατασκευή με έμψηξη).

Οι μικροπάσσалоι έχουν την ικανότητα να αναλαμβάνουν υψηλά φορτία. Ο διατηρητικός εξοπλισμός και οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί, επιτρέπουν στους μικροπασσάλους να εγκαθίστανται σε οποιεσδήποτε εδαφικές συνθήκες, με ελάχιστες δονήσεις και σε οποιαδήποτε γωνία.

Το φορτίο αναλαμβάνεται κυρίως από το χαλύβδινο μέρος και μεταφέρεται διαμέσω του τσιμεντενέματος στο περιβάλλον πέτρωμα όπως στις περιπτώσεις των αγκυρίων και των ηλώσεων.

Η πλειοψηφία των μικροπασσάλων είναι διαμέτρου μεταξύ 100 και 250 χιλιοστών, μήκους 15 ως 30 μέτρων και αντοχή σε εφαρμογή θλιπτικής δύναμης 250 ως 1000 kN.

Κάποιες εφαρμογές των μικροπασσάλων φαίνονται στο σχήμα 2.7



Σχήμα 2.7: Εφαρμογές μικροπασσάλων (Hayward Baker, 1996)

## 2.2 Μέθοδοι Βελτίωσης Βραχώμαζας

Σε εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες κατασκευής σηράγγων, ενδείκνυται (ή ακόμα και απαιτείται σε ορισμένες περιπτώσεις) η χρησιμοποίηση μεθόδων βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών (ground improvement). Γενικά υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι βελτίωσης της βραχώμαζας. Αυτές είναι η *ενεμάτωση με χαμηλή πίεση* (grouting ή low pressure injection) η *ενεμάτωση υψηλής πίεσης* (jet-grouting), η *ψύξη* του εδάφους (freezing) και η *αποστράγγιση* (dewatering ή drainage). (Peila *et al*, 2006)

### 2.2.1 Ενεμάτωση με χαμηλή πίεση

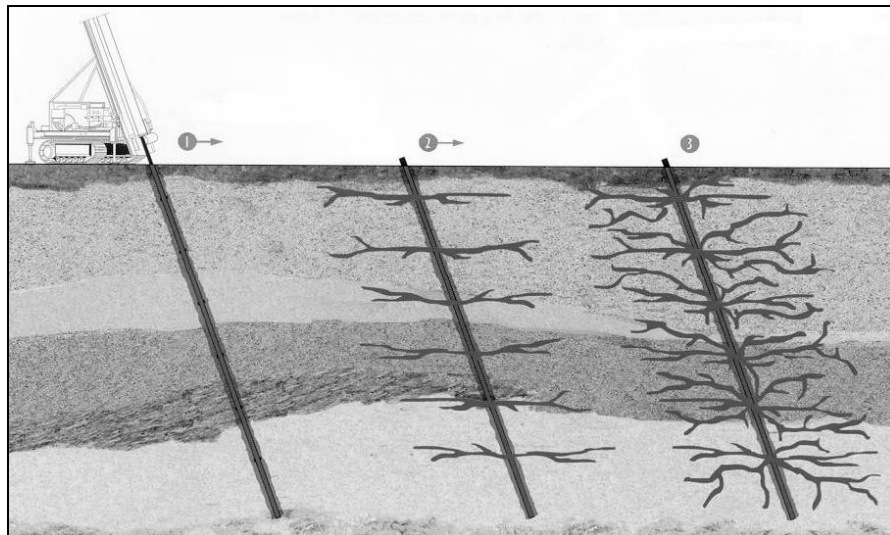
Οι σήραγγες, κατασκευάζονται για πολλούς και διαφορετικούς σκοπούς και κάτω από ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών και γεωλογικών συνθηκών. Στις σήραγγες είναι γνωστή η ύπαρξη διαφόρων ρευστών. Δεν θα πρέπει να υπάρχει διαρροή των ρευστών αυτών από τη σήραγγα, όπως δεν θα πρέπει να υπάρχει εισροή ύδατος από τα γειτονικά εδάφη. Η εισροή ύδατος στη σήραγγα, μπορεί να οδηγήσει στην πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε επίπεδο πολύ χαμηλότερο του κανονικού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καθιζήσεις στην επιφάνεια, σε ζημιές στις υπάρχουσες κατασκευές στην επιφάνεια σε ανικανότητα άντλησης νερού από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις νερού, καθώς και σε άλλες ανεπιθύμητες συνέπειες (Atlas Copco, 2005).

Σε άλλες περιπτώσεις, ειδικά σε ασταθή εδάφη ή σε καρστικούς σχηματισμούς, η ενεμάτωση είναι απαραίτητη για να σταθεροποιήσει, να βελτιώσει και να στεγανοποιήσει τα υπερκείμενα στρώματα.

Η ενεμάτωση με χαμηλή πίεση (grouting ή low pressure injection) έχει σκοπό να σταθεροποιήσει, να βελτιώσει αλλά και να στεγανοποιήσει τα υπερκείμενα στρώματα. Τα διατρήματα που χρησιμοποιούνται έχουν μήκος 15 – 25 μέτρα και θα πρέπει να μην ξεπερνούν τα 3 – 4 μέτρα έξω από τον θεωρητικό κάνναβο καθώς και να έχουν μια απόκλιση 3 – 5 % από τον επιδιωκόμενο στόχο. Η διάμετρός τους είναι συνήθως 51 – 64 mm. Όταν η ποιότητα του εδάφους είναι φτωχή, η διαδικασία της διάτρησης είναι δυσκολότερη ενώ η ανάγκη να διατρηθούν οριζόντια διατρήματα είναι πολύ μεγαλύτερη. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας να γίνεται τοποθέτηση του ενέματος εκεί όπου πραγματικά απαιτείται. Όπου είναι δυνατόν, τα διατρήματα της ενεμάτωσης, θα

πρέπει να γίνονται σε σωστές γωνίες σε σχέση με τις κύριες ρηγματώσεις, ούτως ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη πλήρωσή τους με σκυρόδεμα.

Όταν είναι γνωστό ότι η σήραγγα θα διασχίσει αδύναμα εδάφη (όπως μη συνεκτικά εδάφη ή ζώνες με κατακερματισμένα πετρώματα), με παρουσία νερού σε υψηλή πίεση, το έδαφος πρέπει να ενεματωθεί με χαμηλή πίεση έτσι ώστε να πληρωθούν τα κενά του χωρίς να αλλάξει σημαντικά η δομή του εδάφους ή ο όγκος του. Ο αρχικός σκοπός της ενεμάτωσης αυτής είναι η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους. Η βελτίωση του εδάφους στην περίπτωση αυτή είναι συνήθως ένα παράπλευρο κέρδος. Είναι προτιμότερο η διαδικασία αυτή να γίνει (όπου αυτό βέβαια είναι δυνατόν) από την επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 2.8) για να αποφευχθούν χρονοβόρες διαδικασίες μέσα στη σήραγγα.



Σχήμα 2.8: Ενεμάτωση από την επιφάνεια (Καββαδάς, 2000)

Όταν η ενεμάτωση δεν μπορεί να γίνει από την επιφάνεια του εδάφους, γίνεται από το μέτωπο της σήραγγας, πριν όμως φτάσει η σήραγγα σε ανεπιθύμητες συνθήκες. Μια διάταξη διατρημάτων για τσιμεντενέσεις με ακτινωτό σχήμα κατασκευάζονται, μερικές ακόμα και 20 – 40 μέτρα από το μέτωπο (σχήμα 2.9).



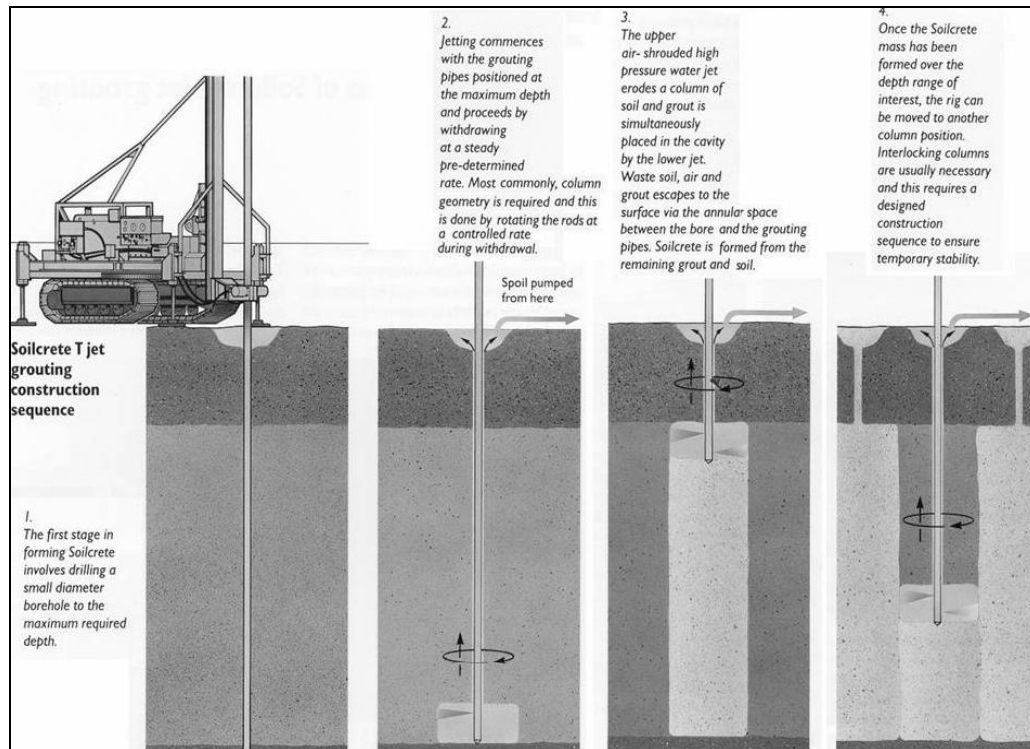


Σχήμα 2.9: Τσιμεντενέσεις στο μέτωπο (Peila *et al*, 2006)

### 2.2.2 Ενεμάτωση με υψηλή πίεση

Η ενεμάτωση με υψηλή πίεση (jet grouting), διαφέρει σημαντικά από τις άλλες μεθόδους βελτίωσης εδαφών. Με τη μέθοδο αυτή, καταστρέφεται ολοκληρωτικά η δομή του εδάφους, το εδαφικό υλικό μεταφέρεται στην επιφάνεια με τη βοήθεια των εισπιεζόμενων ρευστών και έπειτα διενεργείται ανάμιξη του εδαφικού υλικού με το τσιμέντο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ομογενοποιημένου εδάφους που στο επόμενο στάδιο, στερεοποιείται. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το είδος του εδάφους, την κοκκομετρία του ή την διαπερατότητά του. Θεωρητικά η τεχνική αυτή, μπορεί να βελτιώσει τα περισσότερα εδάφη από μαλακά αργιλώδη εδάφη ως αμμώδεις χάλικες (Jet-grouting.com, 2005).

Η διαδικασία της βελτίωσης του εδάφους με τη μέθοδο της ενεμάτωσης με υψηλή πίεση (σχήμα 2.10), έχει ως εξής: πρώτα γίνεται διάτρηση οπής διαμέτρου 100 – 150 mm μέχρι το επιθυμητό βάθος. Έπειτα με τη βοήθεια μιας ισχυρής αντλίας υψηλής πίεσης μέσω ενός ή περισσότερων ακροφυσίων (σχήμα 2.11) τα οποία είναι τοποθετημένα στο άκρο της διατρητικής στήλης, γίνεται ο ψεκασμός του μίγματος. Το μίγμα συνήθως αποτελείται από νερό και τσιμέντο ή σε άλλες περιπτώσεις από νερό, τσιμέντο και μπεντονίτη. Τέλος περιστρέφονται τα στελέχη και σταδιακά ανυψώνονται. Έτσι δημιουργείται μια στήλη μίγματος από εδαφικό υλικό και τσιμέντο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται και τεχνική τσιμεντοεδαφοπασσάλων.



Σχήμα 2.10: Τεχνική τσιμεντοεδαφοπασσάλων (Jet grouting) (Καββαδάς, 2000)

Έχουν αναπτυχθεί τρία συστήματα ενεμάτωσης με υψηλή πίεση σε σχέση με τα εισπιεζόμενα ρευστά που χρησιμοποιούνται. Το πρώτο σύστημα χρησιμοποιεί ένα μόνο ρευστό, το τσιμεντένεμα, το δεύτερο σύστημα χρησιμοποιεί τρία εισπιεζόμενα ρευστά (νερό, αέρας, τσιμεντένεμα) ενώ το τρίτο σύστημα χρησιμοποιεί δύο εισπιεζόμενα ρευστά (αέρας και τσιμεντένεμα) (Jet-grouting.com, 2005).



Σχήμα 2.11: Ψεκασμός μίγματος από τα ακροφύσια της διατρητικής στήλης (Καββαδάς, 2000)

Η ενεμάτωση με υψηλή πίεση, εκτός από τη βελτίωση εδαφών, χρησιμοποιείται και για άλλους σκοπούς, όπως για ανάσχεση κατολισθήσεων, για τη σταθεροποίηση εδάφους για τη διάνοιξη σήραγγας καθώς και για την προπασσάλωση οροφής της σήραγγας (η μέθοδος αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο).

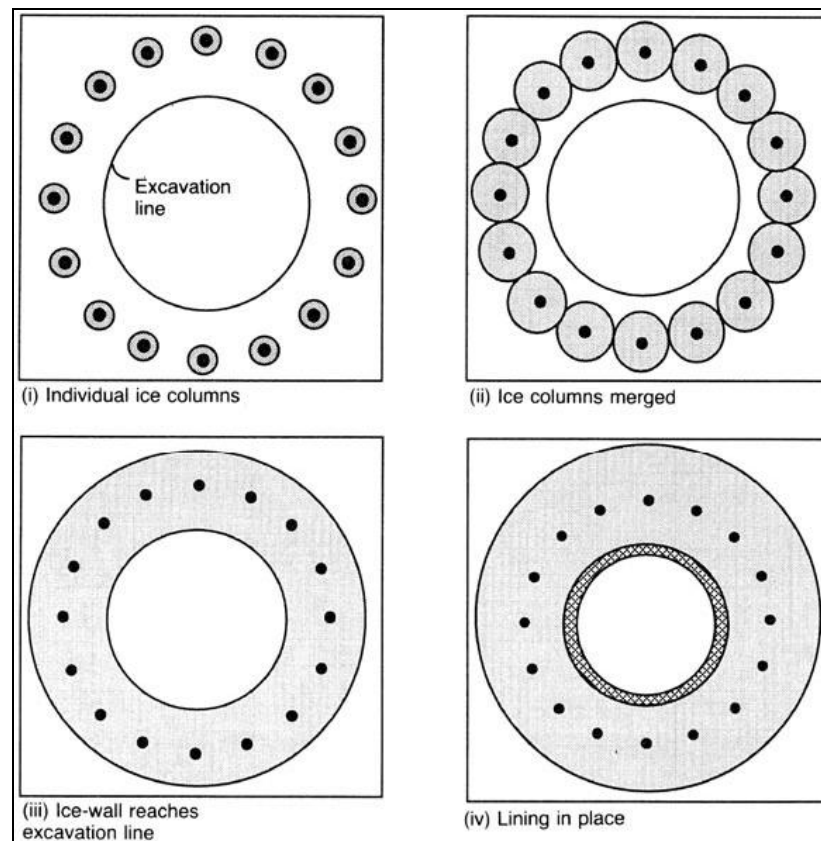
### 2.2.3 Ψύξη εδαφών

Η ψύξη εδαφών (ground freezing), είναι μια πιθανή εναλλακτική λύση από την ενεμάτωση με χαμηλή πίεση (grouting), όσον αφορά τον έλεγχο της εισροής υδάτων στη σήραγγα. Ειδικότερα, η ψύξη εδαφών είναι ιδιαίτερα δραστική εάν το έδαφος είναι φτωχής ποιότητας αλλά ανεπηρέαστο σε τσιμεντενέσεις. Η ιδέα της ψύξης εδαφών στηρίζεται στο γεγονός ότι με τον τρόπο αυτό, το νερό αποκλείεται προσωρινά από την σήραγγα μέχρι να κατασκευαστεί η τελική επένδυση της σήραγγας η οποία και θα προσφέρει μια πλήρη υδατοστεγή προστασία. Η ψύξη των υδάτων γύρω από μια σήραγγα, μπορεί να οδηγήσει επίσης σε σταθεροποίηση του εδάφους ακόμη και σε υποστήριξη της κατασκευής εάν οι εδαφικές συνθήκες είναι οι κατάλληλες (Harris, 1995).

Η διαδικασία της ψύξης εδαφών, είναι παροδική και έτσι δεν επηρεάζει την ποιότητα του υδροφόρου ορίζοντα, έχει ελάχιστες περιβαλλοντικές συνέπειες και είναι ασφαλής. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους των πετρωμάτων. Οι μόνοι περιορισμοί της μεθόδου είναι ότι η μάζα του πετρώματος πρέπει να έχει ένα ικανοποιητικό περιεχόμενο υγρασίας και ότι πρέπει να υπάρχει ελάχιστη ροή υδάτων διαμέσω ή γύρω από την παγωμένη ζώνη του πετρώματος.

Κατά την ψύξη, η ζώνη ψύξης (frozen zone ή ice-wall), δημιουργείται γύρω από τους σωλήνες πάγου (freeze-tubes). Η κατασκευή τους, εξαρτάται από το μέγεθος της εκσκαφής. Τα στάδια ανάπτυξης της ζώνης ψύξης γύρω από μια σήραγγα, φαίνονται στο σχήμα 2.12.

Η διαδικασία ψύξης μπορεί να ολοκληρωθεί σε τέσσερα στάδια. Αυτά είναι η εγκατάσταση του ψυκτικού συστήματος, η ενεργή ψύξη (active refrigeration) για τη δημιουργία της ζώνης ψύξης, η συντήρηση της ψύξης για να διατηρηθεί και πιθανόν να αυξηθεί το πάχος της ζώνης ψύξης όσο γίνεται η εκσκαφή και ο έλεγχος για την απόψυξη και τις συνέπειές της.



Σχήμα 2.12: Στάδια ανάπτυξης της ζώνης ψύξης γύρω από μια σήραγγα (Harris, 1995)

#### 2.2.4 Αποστράγγιση

Το νερό που υπάρχει μέσα σε μια υπό κατασκευή σήραγγα, πρέπει να απομακρυνθεί γιατί κάνει τα πετρώματα πιο επιρρεπή σε καταστάσεις αποχωρισμού και πτώσης, μειώνοντας τη φυσική συνοχή τους. Αφαιρώντας το νερό, βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, ενισχύεται η σταθερότητα της κατασκευής και βελτιώνονται οι συνθήκες εργασίας των εργαζόμενων (USACE, 1997).

Η αποστράγγιση (dewatering) πρέπει να γίνεται έτσι ώστε τα ύδατα που βρίσκονται σε συγκεκριμένα σημεία που ορύσσεται η σήραγγα, να απομακρύνονται πριν η προχώρηση της εκσκαφής φτάσει στο σημεία αυτά (σχήμα 2.13).

Το σύστημα αποστράγγισης που χρειάζεται μια σήραγγα, ποικίλλει καθώς εξαρτάται από τον τύπο της σήραγγας, το βάθος της και τις συνθήκες που επικρατούν στον υδροφόρο ορίζοντα. Σε μικρές και ρηχές εκσκαφές, η απορροή των υδάτων, μπορεί να γίνει μόνο με σωλήνες και χωρίς καθόλου έλεγχο των υδάτων. Σε μεγαλύτερες και βαθύτερες εκσκαφές όμως χρησιμοποιούνται μεγάλα συστήματα

αποστράγγισης με πολλές μεθόδους ελέγχου των υδάτων αφού ο ρυθμός ροής των τελευταίων είναι υψηλότερος και τα φαινόμενα εισροής νερού είναι σοβαρότερα. Το σύστημα αποστράγγισης πρέπει να είναι συμβατό με τη μέθοδο εκσκαφής της σήραγγας καθώς και με τα μέτρα υποστήριξης που λαμβάνονται. Το σύστημα αποστράγγισης δεν θα πρέπει να εμποδίζει τον εξοπλισμό της εκσκαφής ούτε και την εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος υποστήριξης.



Σχήμα 2.13: Αποστράγγιση σήραγγας (Peila *et al*, 2006)

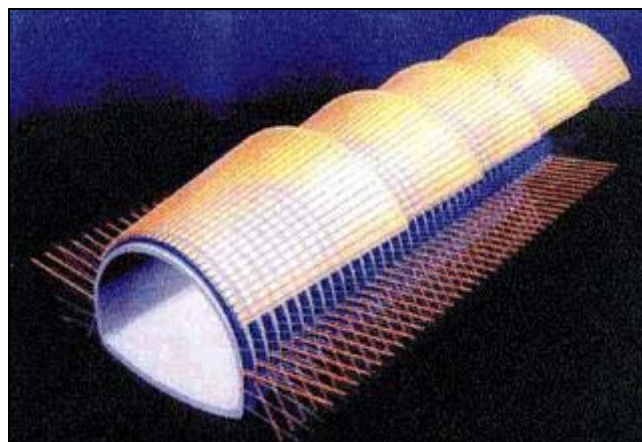
Κάποιες μέθοδοι αποστράγγισης προκύπτουν από τον έλεγχο των επιφανειακών υδάτων (με αγωγούς εκτροπής των υδάτων από τη σήραγγα) και από τον έλεγχο των υπόγειων υδάτων (με ανοιχτή άντληση, με οριζόντιους αγωγούς, με μικρές σήραγγες απορροής υδάτων έξω από την κύρια εκσκαφή, με γεωτρήσεις άντλησης κ.α.)

## 2.3 Μέθοδοι Προσωρινής Υποστήριξης Σηράγγων (Pre-Support)

Οι μέθοδοι προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, βασίζονται στην ιδέα της εξωτερικής υποστήριξης της βραχύμαζας και δρουν μέχρι την εγκατάσταση της μόνιμης υποστήριξη που είναι η τελική επένδυση. Οι κυριότερες από αυτές είναι: η προπασσάλωση οροφής (forepoling), η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete), η εγκατάσταση χαλύβδινων πλαισίων (steel ribs, lattice girders), η περιφερειακή πρότμηση (mechanical precut) και η μέθοδος pretunnel (Peila *et al*, 2006).

### 2.3.1 Προπασσάλωση οροφής

Η προπασσάλωση οροφής (forepoling), έχει γίνει μια πολύ δημοφιλής μέθοδος προσωρινής υποστήριξης σηράγγων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην τεχνική όπου η υποστήριξη τοποθετείται μπροστά από την εκσκαφή του μετώπου. Η υποστήριξη που παρέχεται από τη μέθοδο της προπασσάλωσης, αποτελείται από δοκούς που τοποθετούνται σαν ένα τόξο περιμετρικά μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής και πριν από αυτή. Έτσι κατασκευάζεται μια ομπρέλα προστασίας πάνω από την εκσκαφή που το μήκος της αντιστοιχεί στο μήκος των δοκών προπορείας. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάζονται και οι επόμενες ομπρέλες. Αυτές, αλληλοεπικαλύπτονται σε μήκος που καθορίζεται από το σχεδιασμό του έργου. Έτσι σταθεροποιείται το μέτωπο της σήραγγας σε περιμετρικές και επιμήκειες κατευθύνσεις της σήραγγας. Το σχήμα 2.14 δείχνει ένα χαρακτηριστικό σύστημα προπασσάλωσης οροφής.



Σχήμα 2.14: Σύστημα Forepoling (Peila *et al*, 2006)

Οι μέθοδοι προπασφάλωσης οροφής που μπορούν να αναφερθούν είναι η μέθοδος προπασφάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (jet grouting arch ή sub-horizontal jet grouting), η μέθοδος προπασφάλωσης pipe roof και η μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας (steel pipe umbrella).

Οι μέθοδοι προπασφάλωσης οροφής και ιδιαίτερα η μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας θα αναλυθούν εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3).

### 2.3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete), ονομάζεται το σκυρόδεμα που συνίσταται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή (συνήθως έως 10 mm) καθώς και κάποιο επιταχυντή πήξεως, το οποίο εφαρμόζεται με εκτόξευση με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα (σχήμα 2.15). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μίγμα (wet mix) όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Το υγρό μίγμα χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες (Καββαδάς, 2000).

Ακόμα στην σύνθεση του σκυροδέματος χρησιμοποιείται παιπάλη πυριτίου μια λεπτόκοκκη ποζολάνη η οποία αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και συντελεί στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη μείωση της διαπερατότητάς του. Επιπλέον με την προσθήκη της ποζολάνης επιτυγχάνεται μείωση της αναπήδησης κατά την εκτόξευση, βελτίωση της πρόσφυσης στη βραχώμαζα και δυνατότητα αύξησης του πάχους της στρώσης του νωπού σκυροδέματος (λόγω αύξησης του ιξώδους και της πρόσφυσης) έως και σε 200mm (Καββαδάς, 2000).

Με τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξασφαλίζεται η παθητική αντίσταση έναντι της πλαστικοποίησης του περιβάλλοντος υλικού, κατασκευάζεται μια φέρουσα υποστήριξη κατά μήκος της σήραγγας και υπάρχει κατανομή των φορτίων.





**Σχήμα 2.15: Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος**

Η αντοχή και η πλαστικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αυξάνονται με την προσθήκη μεταλλικών ινών (steel fibres) οι οποίες δρουν ως οπλισμός. Η συνήθης αναλογία μεταλλικών ινών είναι 40-60 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Η προσθήκη μεταλλικών ινών ως οπλισμού του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πλεονεκτεί ως προς τη χρήση μεταλλικού πλέγματος (wire mesh) και τείνει να την αντικαταστήσει. Αυτό συμβαίνει γιατί η προσθήκη μεταλλικών ινών δεν προκαλεί αυξημένη αναπήδηση του σκυροδέματος όπως το μεταλλικό πλέγμα. Επίσης το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν υπόκειται σε διάβρωση επειδή οι ίνες δεν είναι συνεχείς όπως το μεταλλικό πλέγμα. Επιπλέον η χρήση των ινών είναι ταχύτερη και κατασκευαστικά ευκολότερη απ' ό,τι η χρήση μεταλλικού πλέγματος ιδίως στην περίπτωση που η επιφάνεια της βραχώμαζας είναι αρκετά ανώμαλη (Καββαδάς, 2000).

### **2.3.3 Χαλύβδινά πλαίσια**

Τα χαλύβδινά πλαίσια (Steel ribs) αποτελούνται γενικά από στοιχεία που είναι σχετικά δύσκαμπτα για το μέγεθός τους, ενώ οι συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων είναι άλλοτε λίγο και άλλοτε πολύ δύσκαμπτες σύμφωνα με το σκοπό και τη λειτουργία της υποστήριξης. Χρησιμοποιούμενα από μόνα τους, τα πλαίσια αποτελούν γενικά μια ασυνεχή υποστήριξη που αποτελείται από δακτυλίους οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα. Επίσης, σε σύγκριση με άλλα τέτοια συστήματα στήριξης, όπως οι ηλώσεις και η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, διακρίνονται από τη σχετική ανεξαρτησία τους από το περιβάλλον πέτρωμα που αντιστηρίζουν. Τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα ή σε συνδυασμό με άλλα μέτρα. Μπορούν



για παράδειγμα να λειτουργούν ως οπλισμός του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και να εξασφαλίζεται έτσι η μακροχρόνια λειτουργία τους (Σοφιανός, 2000).

Στις σήραγγες, μπορούν να διακριθούν δύο βασικές περιπτώσεις χρήσης χαλύβδινων πλαισίων. Η πρώτη είναι όταν μόνος σκοπός είναι η προστασία από καταπτώσεις μεμονωμένων τεμαχίων πετρώματος, χωρίς προσπάθεια αποτροπής της σύγκλισης της διατομής. Αυτή η περίπτωση προκύπτει γενικά για βραχύμαζα που, ενώ θραύεται, οι γεωτεχνικές της ιδιότητες είναι επαρκείς για τη συγκράτηση των παραμορφώσεων σε μικρές τιμές. Τα πλαίσια στην περίπτωση αυτή "προστατεύουν". Αποσκοπούν στην προστασία των εργαζομένων κατά την κατασκευή του έργου, και διαδραματίζουν ένα δευτερεύοντα ρόλο στην υποστήριξη της περιβάλλουσας βραχύμαζας. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούνται μόνον τους ή τοπικά σε συνδυασμό με φύλλα. Η δεύτερη είναι όταν σκοπός είναι και η καθυστέρηση της παραμόρφωσης και της σύγκλισης των τοιχωμάτων πριν από την τοποθέτηση της οριστικής επένδυσης. Τα πλαίσια τότε "υποστηρίζουν" επειδή, στην πραγματικότητα, αναλαμβάνουν έναν μέρος της πίεσης σταθεροποίησης. Σε αυτή την περίπτωση τα τόξα διακρίνονται σε βαριά, με δύσκαμπτες συνδέσεις που αντέχουν ένα μεγάλο φορτίο και περιορίζουν τις παραμορφώσεις της διατομής, και σε ελαφρά που επιτρέπουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις αλλά αναλαμβάνουν μικρά φορτία (Σοφιανός, 2000).

Οι τύποι χαλύβδινων πλαισίων που τοποθετούνται στη διατομή της σήραγγας ανά βήμα προχώρησης εκσκαφής είναι πλαίσια με τυποποιημένες διατομές, συνήθως πλατύπελμες HEB 100 – 180 (σχήμα 2.16), δικτυωτά πλαίσια (lattice girders), τα οποία είναι ελαφρύτερα και αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος και συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού σε παράλληλη διάταξη συνδεδεμένους με εγκάρσιους συνδετήρες (σε αποστάσεις για παράδειγμα της τάξεως του μέτρου) (Καββαδάς, 2000)



**Σχήμα 2.16: Χαλύβδινό πλαίσιο HEB 180**

### 2.3.4 Περιφερειακή πρότμηση

Η περιφερειακή πρότμηση (mechanical precut) είναι μια μέθοδος υποστήριξης στην οποία, τέμνεται περιφερειακά ο θόλος της σήραγγας μπροστά από το μέτωπο και εισπιέζεται ένεμα από ινοπλισμένο (με χαλύβδινες ίνες) σκυρόδεμα στο κενό. Έτσι δημιουργείται κατά μήκος του τόξου της σήραγγας ένα συνεχές και λεπτό στρώμα σκυροδέματος.

Η μέθοδος αυτή, συνήθως βρίσκει εφαρμογή σε μαλακά πετρώματα καθώς και σε μαλακές έως μέτρια σκληρές αργίλους.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο της περιφερειακής πρότμησης φαίνεται στο σχήμα 2.17. Σε μια αλυσίδα κοπής, μήκους 150 έως 220 χιλιοστών, εφαρμόζεται μια λεπίδα μήκους 5 μέτρων η οποία εισέρχεται μέσα στο έδαφος περιφερειακά της σήραγγας και τέμνει ένα στρώμα από το έδαφος όσο και το πλάτος της λεπίδας. Κατόπιν το κενό που αφήνει η λεπίδα καθώς κινείται στην περίμετρο της σήραγγας, καλύπτεται με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Απόρροια όλων των παραπάνω είναι να δημιουργείται διαρκώς ένα συνεχές περίβλημα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το οποίο καλύπτει το θόλο και τις παρειές της σήραγγας σταθεροποιώντας τα. (Δουβής, 2002)

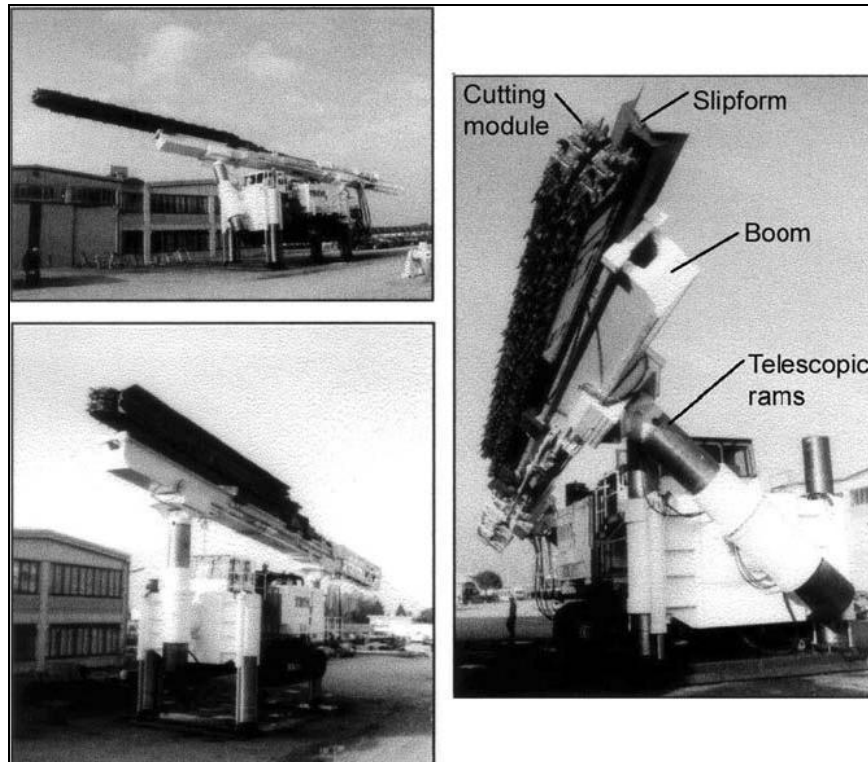


Σχήμα 2.17: Μηχάνημα περιφερειακής πρότμησης (Peila *et al*, 2006)

### 2.3.5 Μέθοδος Pretunnel

Η μέθοδος pretunnel, αναπτύχθηκε για την κατασκευή μεγάλης διατομής σηράγγων σε δύσκολες εδαφικές συνθήκες. Ιστορικά μπορεί να θεωρηθεί σαν την εξέλιξη της περιφερειακής πρότμησης (mechanical precast). Η σημαντική καινοτομία της μεθόδου αυτής βρίσκεται στο γεγονός ότι κατασκευάζεται η τελική επένδυση μπροστά από το μέτωπο πριν από την εκσκαφή. Αυτό εξαφανίζει την ανάγκη για προσωρινή υποστήριξη και δημιουργεί ασφαλείς εργασιακές συνθήκες κατά την κατασκευή της σήραγγας. Η κατασκευή της τελικής επένδυσης σε μια φάση και μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, έχει επίσης ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια (Tonon *et al*, 2005).

Υπάρχουν δύο πιθανοί τύποι κατασκευής τις μεθόδου pretunnel η συνεχής (continuous) και η μη συνεχής (discontinuous). Η συνεχής μέθοδος είναι η κλασσική μέθοδος pretunnel. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι παρόμοιος με της μεθόδου περιφερειακής πρότμησης σε μεγαλύτερη διάσταση (σχήμα 2.18) (Tonon *et al*, 2005).



Σχήμα 2.18: Μηχάνημα pretunnel (Tonon *et al*, 2005)

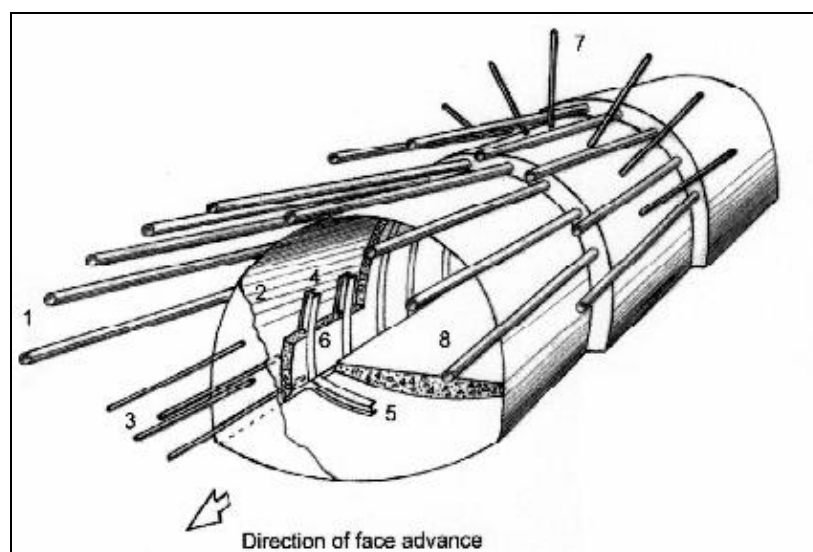
## Κεφάλαιο 3

### Μέθοδοι Προπασσάλωσης Οροφής

Σε αστικές περιοχές, εξαιτίας των απαιτήσεων λόγω του σχεδιασμού ή λόγω των συγκοινωνιών, οι σήραγγες σχεδιάζονται σε σχετικά ρηχά βάθη και με τέτοιο τρόπο ώστε στις κατασκευές στην επιφάνεια να προκαλείται η ελάχιστη δυνατή διαταραχή. Επίσης σήραγγες κατασκευάζονται και σε μη αστικές περιοχές που συχνά κυριαρχούν φτωχά από μηχανικής άποψης και “δύσκολα” εδάφη.

Για τους παραπάνω λόγους η μέθοδος της προπασσάλωσης οροφής (forepoling) έχει γίνει μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους υποστήριξης σε μεγάλης κλίμακας εκσκαφές σιηράγγων και όπως ισχύει και σε μερικές εφαρμογές τις Νέας Αυστριακής Μεθόδου (NATM), ζητήματα ασφάλειας και παραμορφώσεων, απαιτούν επιπλέον μεθόδους υποστήριξης στην εκσκαφή.

Η προπασσάλωση οροφής είναι μια τεχνική υποστήριξης στην οποία το σύστημα της υποστήριξης, τοποθετείται μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Ο μηχανισμός που παρέχεται από τη τεχνική αυτή, σταθεροποιεί το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας κατά μήκος και κατά πλάτος, δημιουργώντας μια ενισχυμένη ζώνη που μοιάζει με τοξοειδές κέλυφος μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής και πριν από αυτή, επιτρέποντας να εκτελεστεί η εκσκαφή της σήραγγας γρήγορα και με ασφάλεια κάτω από μια ομπρέλα προστασίας (σχήμα 3.1) (ROTEX ΟΥ, 2002).



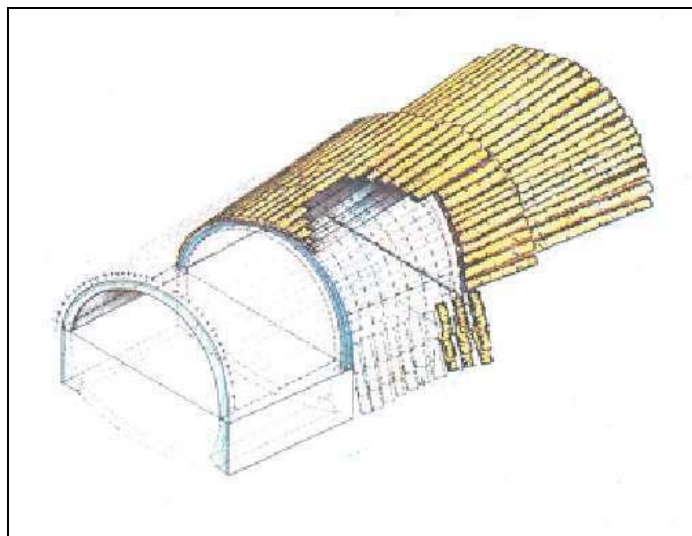
Σχήμα 3.1: Ομπρέλα προστασίας (Peila *et al*, 2006)

Οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής γενικά εφαρμόζονται σε συνθήκες ύπαρξης μικρών υπερκείμενων από τη σήραγγα, σε βραχώμαζα με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και όταν χρειάζεται περιορισμός των επιφανειακών καθιζήσεων.

Οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής που μπορούν να αναφερθούν είναι η μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (jet grouting arch ή sub-horizontal jet grouting), η μέθοδος προπασσάλωσης pipe roof και η μέθοδος προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας (steel pipe umbrella) στην οποία περιλαμβάνεται και η μέθοδος προπασσάλωσης με χαλύβδινες ράβδους προπορείας (spiling) (ROTEX ΟΥ, 2002).

### 3.1 Μέθοδος Προπασσάλωσης Οροφής με Ενεμάτωση Υψηλής Πίεσης

Η μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης στις σήραγγες (Jet grouting arch ή sub-horizontal jet grouting), χρησιμοποιείται κυρίως σε δύσκολες συνθήκες, όπου επικρατούν φτωχά εδάφη και υπερκείμενα με μικρό πάχος. Συνήθως η μέθοδος αυτή, εφαρμόζεται σε αμμώδεις σχηματισμούς ή χαλικώδεις σχηματισμούς. Η διαδικασία της ενεμάτωσης με υψηλή πίεση, είναι μια διαδικασία που απαιτείται υψηλή ενέργεια στην οποία αντικαθίσταται το έδαφος από ένα μίγμα εδάφους και τσιμέντου το οποίο μετά την πήξη του δημιουργεί ένα τσιμεντοεδαφοπάσσαλο διαμέτρου 0,6 μέτρων (Coulter *et al*, 2004). Το μήκος αυτών των τσιμεντοεδαφοπασσάλων κυμαίνεται από 10 έως 15 μέτρα. Το σχήμα 3.2 δείχνει ένα χαρακτηριστικό σύστημα προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης.

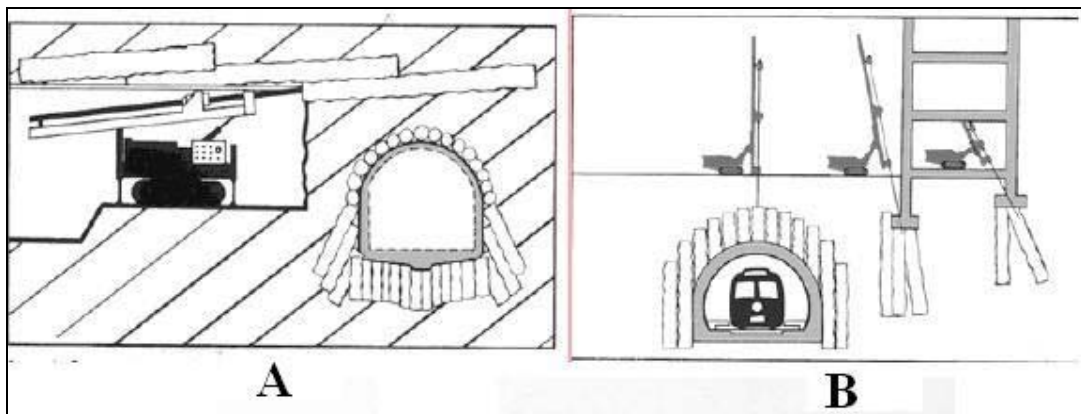


Σχήμα 3.2: Jet grouting arch (Peila *et al*, 2006)



Όπου χρειάζεται, προκειμένου να ενισχυθούν οι μηχανικές ιδιότητες των τσιμεντοεδαφοπασσάλων, εισάγεται με απλή έμπηξη (μετά την πλήρωση του ενέματος) ένας χαλύβδινος σωλήνας στον κάθε πάσσαλο όσο αυτός είναι ακόμα σε ρευστή φάση. Ο σωλήνας μαζί με το μίγμα εδάφους και τσιμέντου, δημιουργεί ένα υλικό με υψηλές αντοχές. Πραγματοποιούνται διατρήσεις σχεδόν οριζόντιες γύρω από τη σήραγγα.

Η μέθοδος μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης, ακολουθεί τα εξής βήματα: Εγκαθίστανται οι τσιμεντοεδαφοπάσσαλοι ούτως ώστε να σχηματιστεί η προστατευτική ανίδα. Αυτοί έχουν μια μικρή κλίση ούτως ώστε να σχηματίζουν μια σειρά από μερικώς αλληλοεπικαλυπτόμενες στήλες (σχήμα 3.3Α). Αν υποθεθεί ότι υπάρχουν 40 τσιμεντοεδαφοπάσσαλοι και κάθε τσιμεντοεδαφοπάσσαλος είναι 13 μέτρα με 2 μέτρα αλληλοεπικάλυψη, το στάδιο αυτό θα διαρκέσει περίπου τρεις με πέντε μέρες. Ακολουθεί η εκσκαφή του επόμενου βήματος προχώρησης της σήραγγας. Ο μέσος χρόνος εγκατάστασης ενός μόνο τσιμεντοεδαφοπασσάλου, είναι 40 λεπτά από την ολοκλήρωση του προηγούμενου (Coulter *et al*, 2004).



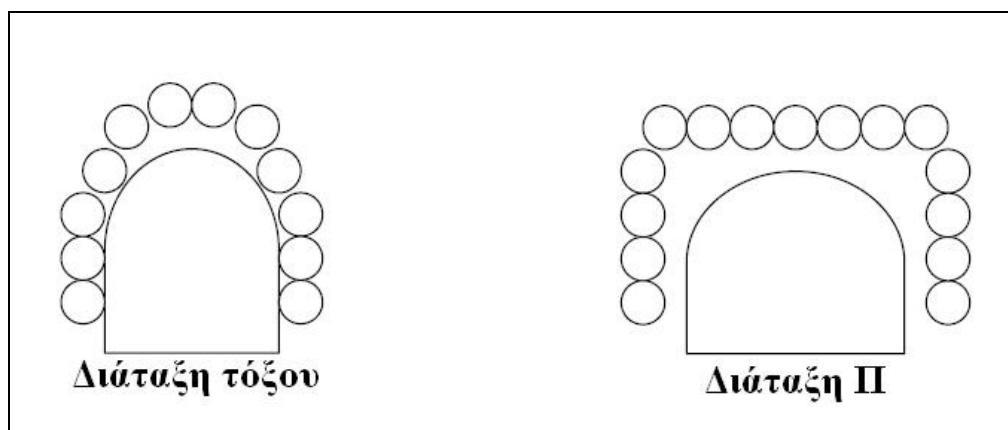
Σχήμα 3.3Α: Jet grouting arch εντός της σήραγγας (Καββαδάς, 2000)

Σχήμα 3.3Β: Jet grouting arch από την επιφάνεια (Καββαδάς, 2000)

Σε περίπτωση που η πρόσβαση στη σήραγγα είναι δυνατή από την επιφάνεια, το υπερκείμενο της σήραγγας έδαφος, μπορεί να ενισχυθεί και να σταθεροποιηθεί με την πλήρωση με ένεμα σε μια σειρά αλληλοτεμνόμενων στύλων (σχήμα 3.3Β).

### 3.2 Μέθοδος Προπασσάλωσης Οροφής Pipe Roof

Η μέθοδος προπασσάλωσης οροφής pipe roof, συνίσταται από μια σειρά μεγάλης διαμέτρου χαλύβδινους ή τσιμεντένιους σωλήνες σε διάταξη τόξου ή σε διάταξη Π (σχήμα 3.4). Η μέθοδος συνήθως χρησιμοποιείται όταν το πάχος των υπερκείμενων είναι εξαιρετικά μικρό καθώς και όταν υπάρχει σοβαρός κίνδυνος καθιζήσεων. Η απομάκρυνση γεωυλικού από την περιοχή εκσκαφής της σήραγγας, με την πάροδο του χρόνου μεταφράζεται σε μια αντίστοιχη καθίζηση της επιφάνειας. Αυτό μπορεί να είναι επικίνδυνο στις κοντινές κατασκευές της επιφάνειας. Έτσι, κάποια παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου είναι για κατασκευή σιράγγων κάτω από αυτοκινητόδρομους (σχήμα 3.5) ή και σιδηρόδρομους (σχήμα 3.6) έτσι ώστε να μη διακοπεί η κυκλοφορία ή να επιβληθεί κάποιος περιορισμός στο όριο της ταχύτητας. Ακόμα σε κατοικημένες περιοχές για να προστατευτούν τα κτίρια κάτω από τα θεμέλια των οποίων διανοίγεται η σήραγγα. Η μέθοδος προπασσάλωσης οροφής pipe roof χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην Ιαπωνία για την κατασκευή υπόγειων σιδηροδρομικών σταθμών. Επίσης χρησιμοποιείται ευρέως στις Η.Π.Α. για την κατασκευή σιράγγων μικρής διαμέτρου. (Tan *et al*, 2003)

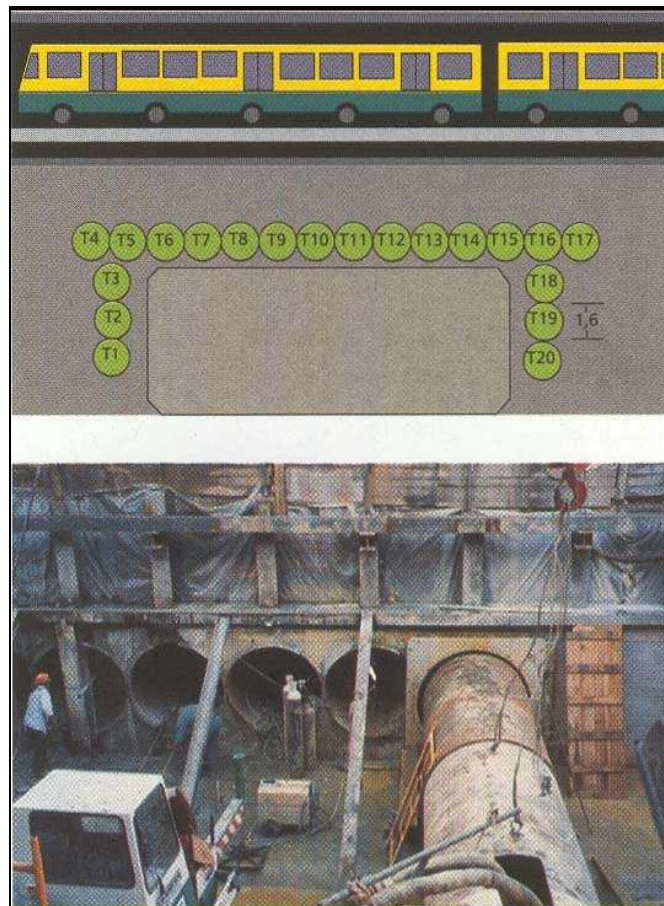


Σχήμα 3.4: Διατάξεις σωλήνων στη μέθοδο pipe roof (Tan *et al*, 2003)

Οι τυπικές μέθοδοι εγκατάστασης των σωλήνων είναι με τη μέθοδο pipe jacking και άλλες μεθόδους μικροσηράγγων (microtunneling). Οι σωλήνες στη μέθοδο αυτή, τοποθετούνται παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας ενώ σχεδιάζονται για να φέρουν μόνο φορτία κατά μήκος της σήραγγας (Tan *et al*, 2003) .



Σχήμα 3.5: Μέθοδος pipe roof κάτω από αυτοκινητόδρομο (Peila *et al*, 2006)



Σχήμα 3.6: Μέθοδος pipe roof κάτω από σιδηρόδρομο (Peila *et al*, 2006)



### 3.3 Μέθοδος Προπασφάλωσης Οροφής με Χαλύβδινες Δοκούς

#### Προπορείας

Η μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας (steel pipe umbrella), συνήθως αποτελείται από τρία διαφορετικά στάδια. Αυτά είναι η διάτρηση του πετρώματος και η τοποθέτηση των δοκών προπορείας σε αυτά, τσιμεντένεση στο εσωτερικό των δοκών και στα κενά γύρω από τις δοκούς και τοποθέτηση του χαλύβδινου πλαισίου. Ένα βήμα επιπλέον μπορεί να είναι πρόσθετες τσιμεντενέσεις βελτίωσης της βραχύμαζας. Αυτές γίνονται πριν την τοποθέτηση του πλαισίου. Η εισπίεση του ενέματος είναι καθοριστικής σημασίας ούτως ώστε να σχηματιστεί αυτή η τοξοειδής κατασκευή, ωστόσο η λειτουργία του των δοκών προπορείας, εξαρτάται από την περιβάλλουσα βραχύμαζα. Ο ρόλος της ενεμάτωσης είναι η ενίσχυση χαλαρών και αδύναμων εδαφών, η μείωση της διαπερατότητας, η μείωση φαινόμενων καθίζησης που προκαλούνται από την αποστράγγιση της σήραγγας και η σταθεροποίηση αμμωδών εδαφών.

Οι δοκοί προπορείας, τις περισσότερες φορές έχουν δώδεκα μέτρα μήκος και διάμετρο ίση ή μεγαλύτερη των 76 χιλιοστών και η κλίση τους ως προς τον άξονα της σήραγγας είναι  $5^{\circ} - 15^{\circ}$ . Όταν η διάμετρος των δοκών είναι μεταξύ 22 και 76 χιλιοστών, οι δοκοί αυτοί ονομάζονται ράβδοι προπορείας και η κλίση τους ως προς τον άξονα της σήραγγας μπορεί να είναι ως και  $30^{\circ}$ . Η μέθοδος τότε ονομάζεται μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες ράβδους προπορείας (spiling method).

Σε μια υποτιθέμενη κατασκευή μιας ομπρέλας προπορείας όπου απαιτούνται για παράδειγμα 40 δοκοί, ο χρόνος διάτρησης για τις δοκούς υπολογίζεται περίπου σε δέκα με δώδεκα ώρες και η διαδικασία της ενεμάτωσής τους με τσιμέντο άλλες δέκα με δώδεκα ώρες. Η διαδικασία της εκσκαφής υπολογίζεται περίπου σε εικοσιτέσσερις ώρες. Συνυπολογίζοντας τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός προχώρησης του έργου θα είναι δώδεκα μέτρα κάθε δύο μέρες (ROTEX OY, 2002).

Η πρώτη εμπορική εφαρμογή δοκών προπορείας με χαλύβδινες δοκούς και με ειδικά διατρήματα για forepoling, έγινε στην Ιταλία από την εταιρεία Casagrande και στην Ιαπωνία, από την AGF.

Η μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας μπορεί να εφαρμοστεί σε σήραγγες που εξορύσσονται με μεθόδους διάτρησης και ανατίναξης, όταν συναντώνται ρήγματα και γενικώς όπου απαιτείται επιπλέον υποστήριξη. Για τη

διάτρηση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συνήθη διατρητικά μηχανήματα Jumbo αλλά τα ειδικά διατρητικά μηχανήματα για forepoling όπως για παράδειγμα, το διατρητικό της εταιρείας Casagrande, παρέχουν τις υψηλότερες αποδόσεις.

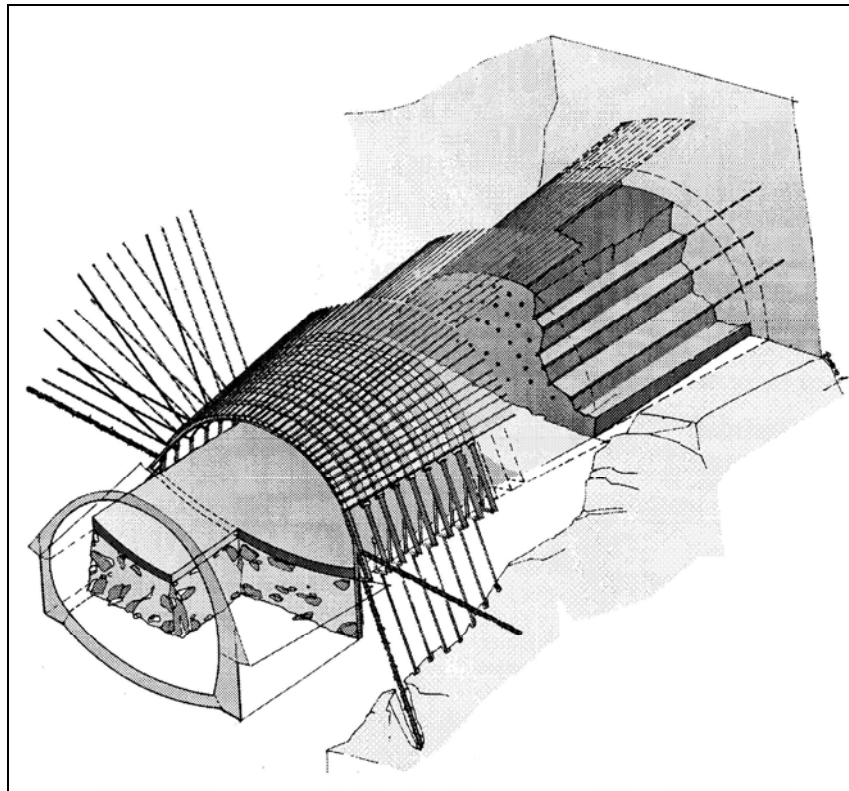
Σε ορισμένες περιπτώσεις, η προπασσάλωση οροφής, δεν παρέχει επαρκή σταθεροποίηση του μετώπου, οπότε απαιτούνται ειδικά στοιχεία σταθεροποίησης του μετώπου. Αυτά μπορεί να είναι παραδείγματος χάριν τσιμεντενέσεις ενισχυμένες με ίνες γυαλιού (fiberglass). Η τοποθέτηση των στοιχείων αυτών μέσα σε διάφορα σημεία του μετώπου και η πλήρωση τους με τσιμέντο, συνδυάζει την ακαμψία τους με την σταθεροποίηση από το τσιμέντο. Έτσι προσδίδουν στο μέτωπο επιπλέον σταθερότητα. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να απομακρυνθούν από την οπή χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία με κοινό εξοπλισμό διάτρησης.

### 3.3.1 Εγκατάσταση Χαλύβδινων Δοκών Προπορείας και Κατασκευή Ομπρέλας

Οι χαλύβδινες δοκοί προπορείας, προβλέπεται να είναι σιδηροσωλήνες άνευ ραφής (tubo) ή με ραφή, με βαλβίδες για εισπίαση ενέματος, με βαλβίδες για εισπίαση ενέματος, διαμέτρου ίσης ή μεγαλύτερης των 76 χιλιοστών και μπορεί να φέρουν οπές έγχυσης ενέματος κατά μήκος τους. Το πάχος των σωλήνων είναι από τέσσερα χιλιοστά και πάνω. Εάν απαιτείται αυξημένη αντοχή στους σωλήνες, σύμφωνα πάντα με το σχεδιασμό της μελέτης χρησιμοποιούνται σωλήνες χωρίς ραφές. Η ποιότητα του χάλυβα είναι συνήθως St 37.

Ένα σημαντικό και ιδιαίτερα κρίσιμο τμήμα στην εκτέλεση της διαδικασίας εγκατάστασης των δοκών προπορείας, είναι η διάτρηση των οπών στο πέτρωμα καθώς απαιτείται η διάτρηση σχετικά βαθιών διατρημάτων με ακριβή τοποθέτηση, ώστε να σχηματίζεται μια τοξοειδής επιφάνεια στην περιφέρεια της εκσκαφής. Κατά την διάτρηση των οπών πρέπει να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του μετώπου εκσκαφής και γενικότερα της σήραγγας ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος αποσταθεροποίησής τους. Στην τεχνική της διάτρησης που θα ακολουθηθεί πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες που επικρατούν στο γεωϋλικό, οι διαστάσεις της σήραγγας, οι περιβαλλοντικοί όροι και περιορισμοί, οι απαιτήσεις που αφορούν στην υγιεινή και ασφάλεια των εργαζόμενων και φυσικά οι χρονικοί περιορισμοί για την κατασκευή του έργου. Η διάνοιξη των διατρημάτων (οπών), γίνεται πριν την εκσκαφή του επόμενου τμήματος της σήραγγας, συνήθως υπό μικρή γωνία ( $5^{\circ} - 15^{\circ}$ ) ως προς τον άξονα της σήραγγας (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2005).

Οι χαλύβδινες δοκοί, τοποθετούνται στις οπές σε μία διάταξη που όπως προαναφέρθηκε σχηματίζει μια τοξοειδή επιφάνεια (ομπρέλα) στο θόλο της σήραγγας. Υπό την προστασία αυτής της ομπρέλας, γίνονται τα βήματα της εκσκαφής – προχώρησης (σχήμα 3.7). Οι διαδοχικές ομπρέλες που κατασκευάζονται, αλληλοεπικαλύπτονται σε μήκος που καθορίζεται από το σχεδιασμό του έργου. Το μήκος αυτό πάντως δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το μήκος δύο βημάτων προχώρησης, ούτε από το 20% του μήκους των δοκών προπορείας. Συνήθως όμως, όταν οι δοκοί προπορείας έχουν μήκος 12 μέτρα, το μήκος αλληλοεπικάλυψης είναι 3 μέτρα. Με αυτό το σύστημα υποστήριξης, παρέχεται άμεση σταθερότητα της οροφής και των παρειών της σήραγγας μέσα από κάθε βήμα εκσκαφής. Επίσης, οι εργασίες στη σήραγγα εκτελούνται εκτός των άλλων, γρήγορα και υπό συνεχή προστασία. Οι δοκοί προπορείας θα πρέπει να έχουν επαρκή ροπή αδράνειας ούτως ώστε να ανταποκρίνονται στον σκοπό για τον οποίο τοποθετούνται. Η εντατική τους κατάσταση εξαρτάται από το βήμα διάνοιξης της σήραγγας, από τις συνθήκες έδρασής τους και από την παραμορφωσιμότητα του μετώπου. Μετά την τοποθέτηση των δοκών, επακολουθεί η εισπίεση του ενέματος μέσα σε αυτές.



**Σχήμα 3.7: Προπασφάλωση με χαλύβδινες δοκούς προπορείας  
Βήματα εκσκαφής- προχώρησης (Peila *et al*, 2006)**

Η γωνία κλίσης των δοκών ως προς τον άξονα της σήραγγας, καθώς και η απόστασή τους από την εσωτερική επιφάνεια των ήδη τοποθετημένων υποστυλωμάτων της διατομής επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται για λόγους κατασκευαστικούς η διεύρυνση της διατομής της εκσκαφής της σήραγγας. Αφού ολοκληρωθεί το προβλεπόμενο από τον σχεδιασμό βήμα εκσκαφής, τοποθετείται η υποστύλωση. Η τελευταία συνίσταται από την εγκατάσταση χαλύβδινου πλαισίου, χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και ενδεχομένως και αγκυρίων όπου χρειάζεται.

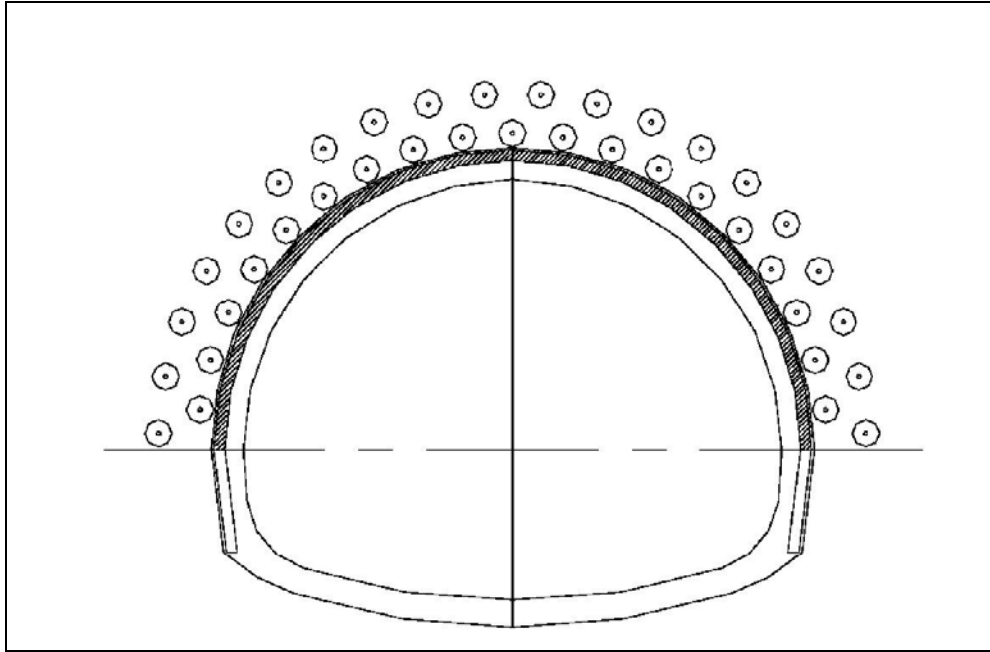
Γενικά οι διαστάσεις των χαλύβδινων δοκών, ο τύπος και η μεταξύ τους απόσταση όπως και το βήμα εκσκαφής και το μήκος επικάλυψης τους, εξαρτώνται από παράγοντες όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους, το πάχος των υπερκείμενων, η ύπαρξη υπόγειων νερών, οι κατασκευές στην επιφάνεια, η μέθοδος εκσκαφής της σήραγγας και οι φάσεις των εργασιών σε αυτήν.

Οι τυπικές διαδικασίες της τεχνικής προπασσάλωσης οροφής με χαλύβδινες δοκούς προπορείας είναι οι εξής:

- Τοποθέτηση του διατρητικού βραχίονα στην προβλεπόμενη θέση και διεύθυνση τοποθέτησης της δοκού.
- Τοπογραφική επιβεβαίωση.
- Διάνοιξη του διατρήματος και τοποθέτηση της δοκού.
- Τοποθέτηση πλαστικού σωλήνα επιστροφής του ενέματος.
- Απομόνωση – στεγάνωση του ελεύθερου άκρου του σωλήνα.
- Εισπίεση τσιμεντενέματος στον σωλήνα.
- Εκσκαφή της σήραγγας στο επόμενο προβλεπόμενο βήμα.

Η πλήρωση της δοκού με τσιμεντένεμα εξασφαλίζεται ως εξής: Ο πλαστικός σωλήνας επιστροφής, τοποθετείται από τη μια άκρη της δοκού ως την άλλη. Έτσι ο μεταλλικός σωλήνας και η οπή διάτρησης θα έχει πληρωθεί με ένεμα την στιγμή που θα αρχίσει να εκχέεται ένεμα από τον πλαστικό σωλήνα επιστροφής στο ελεύθερο άκρο του μεταλλικού σωλήνα.

Σε ορισμένα κρίσιμα σημεία της σήραγγας, όπως είναι τα τμήματα εισόδου και εξόδου της σήραγγας, κυρίως για λόγους ασφαλείας, μπορεί να χρειαστούν δύο σειρές δοκών προπορείας, σε διάταξη η μια πάνω από την άλλη με τις δοκούς της πάνω σειράς να τοποθετούνται στα σημεία πάνω από τα διαστήματα που αφήνουν μεταξύ τους οι δοκοί της κάτω σειράς (σχήμα 3.8) (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2005).



Σχήμα 3.8: Διπλή σειρά δοκών προπορείας (Asano *et al*, 2003)

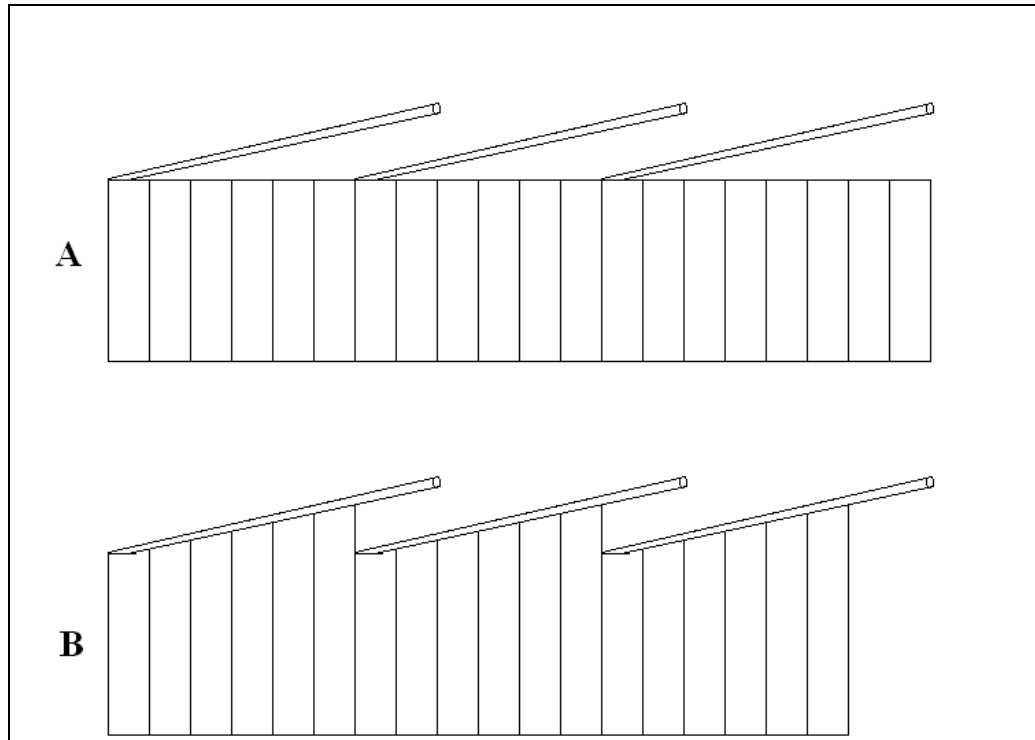
Ακόμη, σε περιοχές με ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας, διανοίγονται μικρές οπές κατά μήκος των δοκών. Έτσι όταν γεμίζουν οι σωλήνες με ένεμα, πληρώνονται τα εδαφικά κενά γύρω από το διάτρημα. Με αυτόν τον τρόπο, οι δοκοί προπορείας ενεργούν και σαν τσιμεντενέσεις, βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και προσδίδοντας της καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Όσον αφορά την τεχνική κατασκευής της ομπρέλας μπροστά στο μέτωπο, υπάρχουν δύο τρόποι που διαμορφώνουν δυο διαφορετικά προφίλ σήραγγας.

Ο πρώτος τρόπος είναι να παραμείνει σταθερό το προφίλ της σήραγγας κατά μήκος της εκσκαφής (σχήμα 3.9Α). Οι δοκοί προπορείας σε αυτή την περίπτωση κατευθύνονται από τα χαλύβδινα πλαίσια αφού τα σημεία διάτρησης των οπών για τις δοκούς προπορείας είναι καθορισμένα και μέσα σε αυτά. Έτσι δε χρειάζεται καμιά ειδική διαδικασία σκόπευσης για να καθοριστούν τα σημεία που θα διατρηθούν οι οπές. Μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι οι δοκοί παραμένουν συνεχώς μέσα στο πέτρωμα.

Ο δεύτερος τρόπος είναι το προφίλ της σήραγγας να σχηματίζει βαθμίδες κατά μήκος της εκσκαφής (σχήμα 3.9Β). Τα χαλύβδινα πλαίσια, τοποθετούνται μετά από κάθε βήμα εκσκαφής, έχουν μεταβλητή ακτίνα η οποία αυξάνει με την προχώρηση μέχρι την εγκατάσταση της επόμενης σειράς δοκών. Πάνω στα πλαίσια αυτά στηρίζονται οι δοκοί προπορείας ενώ η εκσκαφή έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να

αποκαλυφθεί ένα μέρος των δοκών. Η σκόπευση για να καθοριστούν τα σημεία που θα διατηρηθούν οι οπές, πραγματοποιείται είτε με συστήματα laser είτε με διατηρητικό με ελεγχόμενο σύστημα.



Σχήμα 3.9Α: Σταθερό προφίλ σήραγγας

Σχήμα 3.9Β: Προφίλ σήραγγας με βαθμίδες

### 3.3.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας

Η μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος υποστήριξης σηράγγων. Χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε γεωμετρία διατομής σήραγγας, σε μεγάλη ποικιλία εδαφών και είναι πρακτικά ανεξάρτητη της ποιότητας της βραχώμαζας. Με τη μέθοδο αυτή, παρατηρείται μείωση των καθιζήσεων στην επιφάνεια, μόνιμη μείωση των μετατοπίσεων γύρω από την εκσκαφή αλλά και αύξηση της σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής και των παρειών της σήραγγας. Επίσης η μέθοδος προπασφάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας είναι πολύ ευέλικτη αφού επιτρέπει την χρησιμοποίηση οποιουδήποτε άλλου μέτρου ενίσχυσης σε συνδυασμό με αυτή. Ακόμα η μέθοδος αυτή είναι απλή και ασφαλής αφού οι εργασίες γίνονται υπό την προστασία ομπρέλας που δημιουργεί ένα ενισχυμένο κέλυφος (περίβλημα) γύρω από το άνοιγμα αλλά και γρήγορη αφού μειώνονται οι

φάσεις εκσκαφής και οι ρυθμοί προχώρησης της ανά ημέρα αυξάνονται (Δουβής, 2002).

Στον πίνακα 3.1 φαίνεται ότι η μέθοδος προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας (Umbrella arch) μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους εδαφών ακόμα και χωρίς άλλη μέθοδο υποστήριξης.

**Πίνακας 3.1: Πεδία εφαρμογής διαφόρων μεθόδων υποστήριξης σηράγγων**

<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ</b>	<b>ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</b>				
	Συνεκτικό έδαφος	Αμμώδες/ Χαλικώδες έδαφος			
			Εδάφη με ογκόλιθους	Ρηγματωμένο πέτρωμα	Συνδυασμός εδαφών
Grouting	■1	●			
Jet grouting	■2	●	■3		
Freezing		●	●		
Dewatering	■4	●	●	●	
Fiberglass elements	●	■5		■6	●
Precut	●	●			
Pretunnel	●	●		●	
Umbrella arch	●	■7	●	●	●

Όπου ● Εφαρμόσιμο. ■ Εφαρμόσιμο με ειδική παρέμβαση: 1 – Χημικό μίγμα, 2 - Ενεμάτωση με υψηλή πίεση χρησιμοποιώντας δύο ή τρία ρευστά, 3 - Μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης, 4 – Ενεργή αποστράγγιση (απαιτείται αντλία κενού), 5 – Επιπλέον τσιμεντένεμα, 6 – Στοιχεία υψηλής αντίστασης, 7 - Επιπλέον τσιμεντένεμα. (Russo, 2003)

## Κεφάλαιο 4

### Αριθμητική ανάλυση σε σήραγγες

#### 4.1 Γενικά

Η διαδικασία της κατασκευής στοών και σιηράγγων εμφανίζεται συνεχώς στην ιστορία του ανθρώπου. Η πρώτη εφαρμογή μαθηματικών σχέσεων για την κατασκευή σήραγγας μπορεί να σχετίζεται με την κατασκευή της σήραγγας για μεταφορά νερού, μήκους 1036m, στη Σάμο από τον Ευπαλίνο (Duddeck, 1988).

Η όρυξη σιηράγγων, η εκσκαφή πρικών καθώς και η κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στο εντατικό πεδίο των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Για την κατανόηση των φαινομένων που σχετίζονται με τη δημιουργία των έργων αυτών, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, τάσεων, μετατοπίσεων, καθώς και ανηγμένων παραμορφώσεων σε φυσικά υλικά κάτω από δεδομένες συνθήκες (Αγιουτάντης, 2002).

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης (numerical methods). Σήμερα, υπάρχει πλήθος μεθόδων για την αριθμητική επίλυση των προβλημάτων ελαστικότητας-πλαστικότητας σε ομογενή, ανομοιογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά (π.χ. εδάφη, πετρώματα) (Αγιουτάντης, 2002).

Οι κυριότερες των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων είναι οι εξής:

- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method)
- Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)
- Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (boundary element method)
- Η μέθοδος των διακριτών (ή διακεκριμένων) στοιχείων (distinct element method)
- Υβριδικές μέθοδοι (hybrid methods), οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες μεθόδους

Το κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθεί αποκλειστικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



## 4.2 Στοιχεία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

### 4.2.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική η οποία πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950. Από τότε βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών. Σήμερα αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων σε πολλούς θεωρητικούς ή εφαρμοσμένους επιστημονικούς τομείς.

Η ευρύτετη χρήση της μεθόδου από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες βασίζεται στην ικανότητα των πεπερασμένων στοιχείων να περιγράφουν και να αναλύουν προβλήματα που είναι εξαιρετικά περίπλοκα και πολλές φορές, αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Η αναλυτική επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος. Η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για ορισμένα υπεραπλουστευμένα μοντέλα. Προβλήματα που αφορούν περίπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συννοριακές συνθήκες είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση οι αναλυτές καταφεύγουν στη χρήση αριθμητικών μεθόδων, μια εκ των οποίων είναι και αυτή των πεπερασμένων στοιχείων.

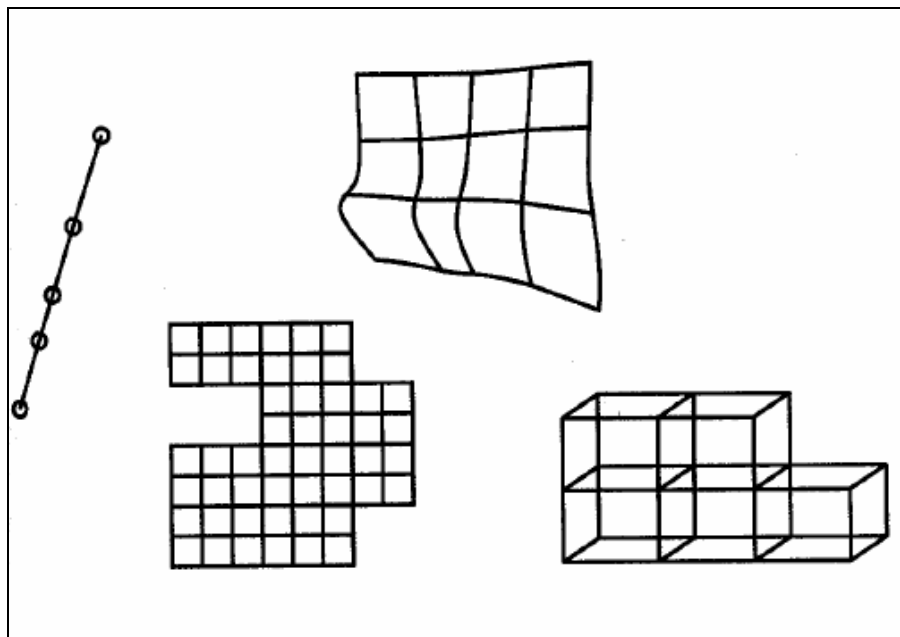
### 4.2.2 Φιλοσοφία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Οι βασικές αρχές που διέπουν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι ιδιαίτερα περίπλοκες. Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος, ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σώμα του οποίου ζητείται να βρεθεί η κατανομή μιας άγνωστης μεταβλητής έστω η μετατόπιση.

Αρχικά, το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών γνωστών ως «στοιχεία» (elements). Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται «κόμβοι» (nodes). Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση (σχήμα 4.1).

Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των στοιχείων που έχουν επιλεχτεί να περιγράψουν το σώμα, η ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή θεωρείται ότι επιδρά σε κάθε

στοιχείο με κάποιο προκαθορισμένο τρόπο. Τελικά η κατανομή της άγνωστης μεταβλητής στη μάζα του σώματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά αν αυτό έχει διακριτοποιηθεί σωστά. Η κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο ορίζεται από μαθηματικές σχέσεις όπως είναι οι τριγωνομετρικές και οι πολωνυμικές συναρτήσεις. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται περισσότερο γιατί είναι απλός και εύχρηστος ο μαθηματικός τους χειρισμός και μπορούν να αποδώσουν με αρκετή ακρίβεια τις μετατοπίσεις των κόμβων.



Σχήμα 4.1 : Διακριτοποίηση σώματος (Αγιουντάντης, 2002)

Μετά από τη διαδικασία της διακριτοποίησης, υπολογίζονται οι εξισώσεις ισορροπίας που διέπουν κάθε στοιχείο, με βάση τη μέθοδο των μετατοπίσεων, και σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό περιγράφει τη συμπεριφορά όλων των στοιχείων του σώματος και κατά συνέπεια όλο το σώμα. Το σύστημα αυτό περιγράφει τη συμπεριφορά όλων των στοιχείων του σώματος και κατά συνέπεια όλο το σώμα. Το σύστημα αυτό των εξισώσεων έχει τη γενική μορφή:

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad (1)$$

όπου  $[K]$  είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, γνωστός με τον όρο μητρώο ακαμψίας του σώματος, το  $\{U\}$  παριστάνει το διάνυσμα των άγνωστων μετατοπίσεων στους κόμβους και το  $\{F\}$  περιγράφει τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους.

Η επίλυση της εξίσωσης (1) ως προς το διάνυσμα των μετατοπίσεων θα αποδώσει τις τιμές των άγνωστων μεταβλητών. Πριν όμως πραγματοποιηθεί η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας και η επίλυση της εξίσωσης, πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Για παράδειγμα σε προβλήματα στατικών υπολογισμών η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών εμποδίζει ένα σώμα να μετατοπίζεται κατά την εφαρμογή δυνάμεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι η λύση της εξίσωσης (1) δεν είναι μια απλή διαδικασία. Η δυσκολία έγκειται στον μεγάλο αριθμό εξισώσεων που απαιτούνται για να περιγράψουν το μεγάλο αριθμό κόμβων. Δεν είναι υπερβολή να αναφερθεί ότι κάποια προβλήματα για να περιγραφούν σωστά χρειάζονται πάνω από 50.000 εξισώσεις. Είναι λοιπόν κατανοητό ότι η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας δεν είναι εύκολη διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία ειδικών μαθηματικών μεθόδων έχει γίνει εφικτή η επίλυση αυτών των εξισώσεων σε ικανοποιητικά χρονικά όρια.

Από τη στιγμή που θα λυθεί η εξίσωση (1), θα βρεθούν οι άγνωστες μετατοπίσεις για κάθε κόμβο, είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και στη συνέχεια των τάσεων στα στοιχεία. Από αυτές γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων σε όλο το σώμα.

#### 4.2.3 Διαδικασία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η διαδικασία που ακολουθείται σε μια ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κάποιο λογισμικό πακέτο αποτελείται από τρία στάδια:

1. Την *προεπεξεργασία* η οποία αποτελεί το βασικότερο μέρος ορισμού από το χρήστη των παραμέτρων της ανάλυσης. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η διακριτοποίηση και η δημιουργία του προς ανάλυση μοντέλου. Εισάγονται οι εξισώσεις που διέπουν τους κόμβους, με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν και οι συνοριακές συνθήκες.
2. Την *επεξεργασία* που αποτελεί το καθαρά μαθηματικό μέρος της μεθόδου και κατά κύριο λόγο εκτελείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια του λογισμικού. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μητρώων και των διανυσμάτων κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύνδεση των επιμέρους πινάκων και διανυσμάτων ώστε να δημιουργηθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν όλο το μοντέλο που πρόκειται να

αναλυθεί. Από τις εξισώσεις αυτές δημιουργείται το μητρώο ακαμψίας και τα διανύσματα όλου του μοντέλου. Σε αυτά εισάγονται και οι συνοριακές συνθήκες που επιδρούν στο μοντέλο. Στο τελευταίο μέρος αυτού του σταδίου πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων και η εύρεση των άγνωστων μεταβλητών στους κόμβους.

3. Την *μετα-επεξεργασία* όπου λαμβάνει χώρα η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να παρασταθούν στο μοντέλο οι τάσεις και οι παραμορφώσεις. Συνήθως αυτές, εκτός από τις αριθμητικές τους τιμές μπορούν να παρασταθούν και γραφικά ώστε να είναι καλύτερα κατανοητές από τον μελετητή.

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης των σταδίων που περιγράφηκαν παραπάνω για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

#### 4.2.4 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός της διακριτοποίησης είναι ο διαμερισμός του υπό εξέταση σώματος σε μικρότερα στοιχεία με τέτοιο τρόπο, ώστε η άγνωστη μεταβλητή να εκπροσωπείται με ικανοποιητικό τρόπο στη μάζα αυτού.

Στη διαδικασία της διακριτοποίησης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να προσφέρει όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια, στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, οικονομία πεπερασμένων στοιχείων, άρα και του χρόνου ανάλυσης, μπορεί να επιτευχθεί από τη χρήση απλοποιημένης γεωμετρίας και την παρουσία συμμετρίας σε ένα μοντέλο.

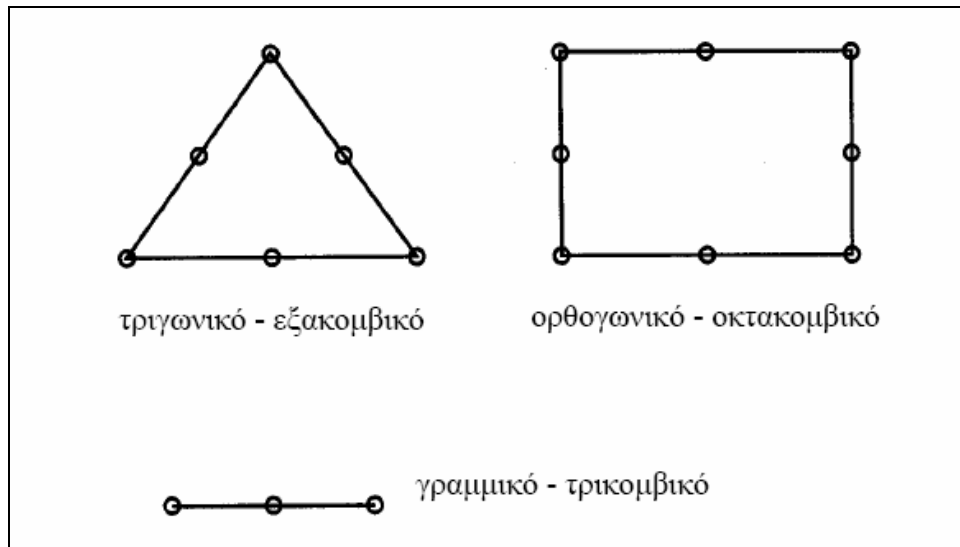
Όλα τα σώματα και οι κατασκευές στην πραγματικότητα αποτελούνται από τρεις διαστάσεις. Πολλές φορές όμως, για λόγους απλότητας και ευκολίας, προβλήματα τριών διαστάσεων ανάγονται στο επίπεδο με μικρή μείωση της ακρίβειας της ανάλυσης. Αν η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε κάποιο σώμα μπορούν να παρασταθούν σε ένα επίπεδο τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δύο διαστάσεις. Τέτοιου είδους σώματα είναι αυτά που διαθέτουν μια μεγάλη διάσταση σε σχέση με τις άλλες και σε αυτή τη διάσταση η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε αυτή δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Η ανάλυση αυτών μπορεί να γίνει με τη μοντελοποίηση με θεώρηση επίπεδης τάσης ή επίπεδης παραμόρφωσης.

Εκτός από τη γεωμετρική απλοποίηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποιο σώμα που μελετάται, υπάρχει και η απλοποίηση λόγω συμμετρίας. Υπάρχουν κυρίως τέσσερα είδη συμμετρίας που συναντώνται στα προβλήματα μηχανικής: η αξονική, η επίπεδη, η κυκλική και η επαναλαμβανόμενη. Αν η γεωμετρία του σώματος και οι εξωτερικοί παράγοντες όπως είναι τα φορτία που δέχεται το σώμα παρουσιάζουν κάποιο από τα παραπάνω είδη συμμετρίας, μπορεί να αναλυθεί μέρος του σώματος που παρουσιάζει συμμετρία και όχι ολόκληρο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο μέρος του σώματος που αναλύεται ώστε πραγματικά να αντικατοπτρίζεται η συμμετρία του σώματος.

#### 4.2.5 Είδη στοιχείων

Απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι όπως προαναφέρθηκε, η διακριτοποίηση, ή η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία ή τμήματα με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με καμπύλα ή ευθύγραμμα τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους του πλέγματος ή κάρναβου διακριτοποίησης του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις (σχήμα 4.2) και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου ένα στοιχείο περιγράφεται από παραπάνω κόμβους και προκύπτουν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ. (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.2: Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

#### 4.2.6 Χαρακτηριστικά της διαίρεσης του πεδίου

Ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η κατάλληλη διαίρεση του. Η διαδικασία διαίρεσης του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους τμήματα (στοιχεία) περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- Την επιλογή του αριθμού των κόμβων του στοιχείου
- Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου
- Την επιλογή της πυκνότητας του κάρναβου

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών (Αγιουτάντης, 2002).

Για παράδειγμα, στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις, συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος να αυξηθούν οι κόμβοι σε ένα στοιχείο και να χρησιμοποιηθούν τετραπλευρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους (Αγιουτάντης, 2002).

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου.

#### 4.2.7 Φόρτιση των υλικών και συνοριακές συνθήκες

Μετά την διαίρεση του χωρίου σε υποπεδία και την δημιουργία των καταστατικών εξισώσεων που τα διέπουν, προσαρτώνται στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος πεδίου.

Εάν σε ένα πρόβλημα απαιτούνται και αρχικές και συνοριακές συνθήκες, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα αρχικών συνοριακών τιμών.

Αντίθετα, αν δεν υπάρχει χρονοεξαρτώμενος όρος στη διαφορική εξίσωση, τότε απαιτούνται μόνο συνοριακές συνθήκες και το πρόβλημα είναι συνοριακών τιμών.

Σκοπός της εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών είναι καταρχήν να αποδοθούν δυνάμεις και τάσεις στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί, και κατά δεύτερον να επιβληθούν περιοριστικές δυνάμεις, ώστε να κρατηθεί το μοντέλο σε ισορροπία. Η αξιοποίηση της συμμετρίας καθίσταται σημαντική διότι δύναται να λυθεί το μισό πρόβλημα, αντί όλου, έτσι ώστε να μειωθεί κατά το ήμισυ οι πράξεις και του χρόνου επίλυσης του προβλήματος.

Η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου, που αντιπροσωπεύει το υλικό, δύναται να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

- επιβολή δυνάμεων πεδίου στην μάζα του στοιχείου (πχ. βαρυτικές δυνάμεις, body forces).
- επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις, nodal forces).
- επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις, traction forces).
- επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

Οι βαρυτικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε περιπτώσεις βραχομάζας, υπόγειων ανοιγμάτων και λοιπών προβλημάτων γεωμηχανικής. Από την άλλη, οι κομβικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε μοντέλα υλικών όπου η φόρτιση είναι σημειακή. Οι δυνάμεις επιφάνειας έχουν εφαρμογή σε δοκίμια υλικών ή όπου αλλού δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι προαναφερθέντες τρόποι φόρτισης.

Η επιβολή μετατοπίσεων στους συνοριακούς κόμβους εφαρμόζεται όταν υπάρχει ενδεδειγμένη συμμετρία στο μοντέλο, όπου κατά την περίπτωση αυτή οι μετατοπίσεις

είναι μηδενικές στην διάσταση που είναι κάθετη στο σύνορο. Εφόσον δηλαδή υπάρχει συμμετρία του μοντέλου ως προς τον άξονα  $y$ , τότε, επάνω στο σύνορο η μετατόπιση ως προς την διάσταση  $x$  θα είναι μηδενική ( $dx=0$ ) και αντιστρόφως. Η αξιοποίηση της συμμετρίας, όπως προαναφέρθηκε, και η κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, δύναται να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των στοιχείων, κατά συνέπεια και των κόμβων στο χωρίο, με αποτέλεσμα να μειωθεί αισθητά και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος.

Στην περίπτωση κατά την οποία φορτιστεί ένα σώμα και όλοι του οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινηθούν, τότε δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση (ή στροφή). Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος, διότι το φαινόμενο δεν υπακούει στην ίδια καταστατική εξίσωση (Αγιουτάντης, 2002).

#### 4.2.8 Τύποι συνοριακών συνθηκών

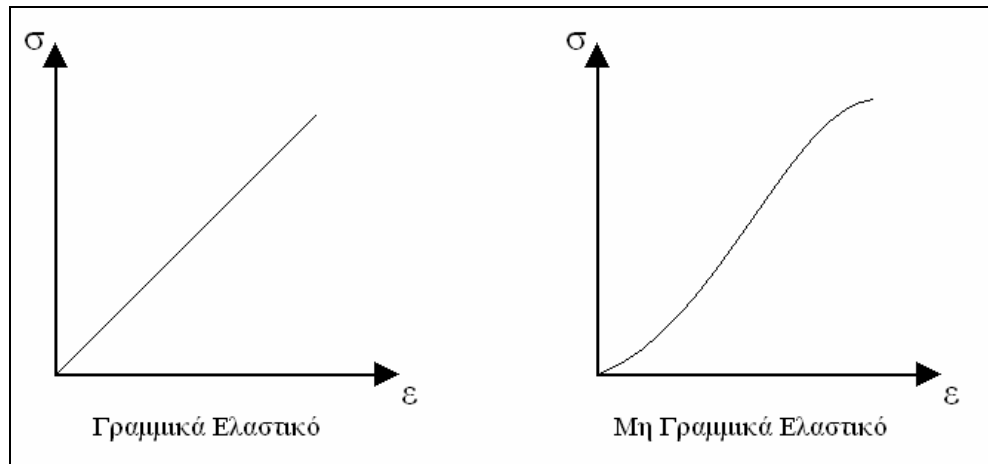
Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές (geometric or forced boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες (slope or gradient, natural boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δυο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.

### 4.3 Ελαστική και Ελαστοπλαστική Συμπεριφορά Υλικών

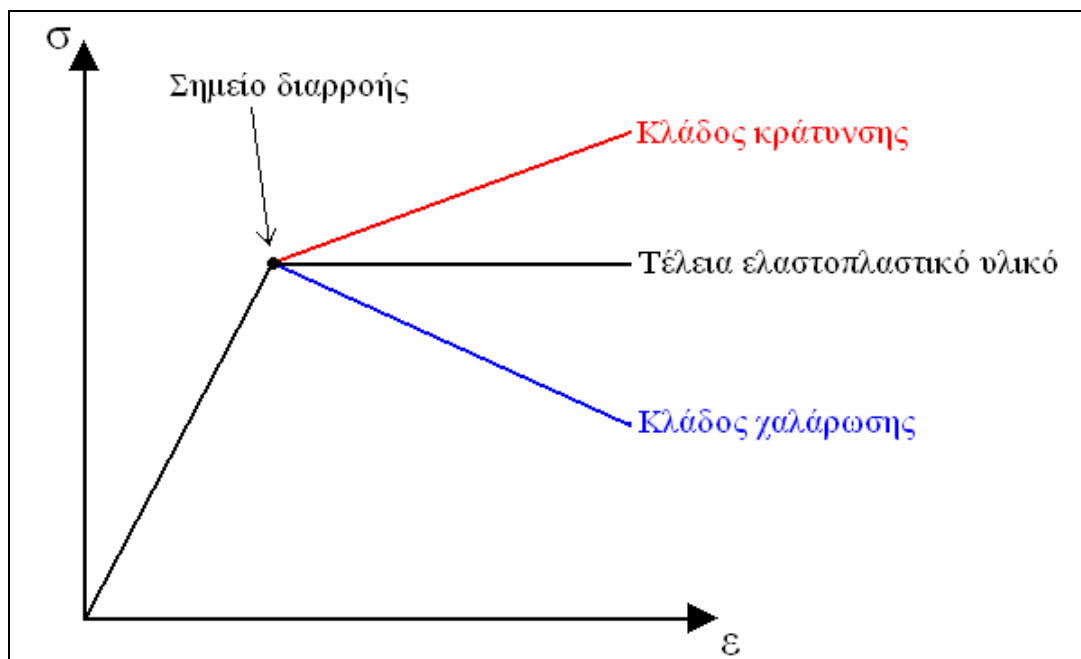
Η ελαστική συμπεριφορά στα υλικά περιγράφεται σε διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης σαν γραμμική ή μη γραμμική (σχήμα 4.3). Η εντατική κατάσταση είναι τέτοια ώστε για οποιαδήποτε επιβολή τάσης σε αυτά τα όρια, το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά και ως εκ τούτου δεν εμφανίζει μόνιμες παραμορφώσεις.





Σχήμα 4.3: Τύποι ελαστικής συμπεριφοράς υλικού

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά στα υλικά χαρακτηρίζεται από έναν γραμμικά ή μη γραμμικά ελαστικό κλάδο. Όταν η εντατική κατάσταση του υλικού αντιπροσωπεύεται από τον ελαστικό κλάδο, τότε το υλικό παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά. Όταν όμως η εντατική κατάσταση υπερβεί το σημείο διαρροής του υλικού (yield point), τότε αρχίζει η εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων. Επίσης, ένα πέτρωμα ή γεωϋλικό μπορεί να μην χαρακτηρίζεται από τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά, αλλά όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4, στον κλάδο, μετά το σημείο διαρροής, να παρουσιάζει είτε κράτυνση (strain hardening) είτε χαλάρωση (strain softening) (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.4: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού

## Κεφάλαιο 5

### Δισδιάστατα Μοντέλα

#### 5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Για την παραμετρική διερεύνηση της εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής, δημιουργήθηκε αρχικά ένα μοντέλο που τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, δίνονται στον πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1: Βασικά χαρακτηριστικά δισδιάστατου μοντέλου**

ΜΟΝΤΕΛΟ		
ΥΨΟΣ	52 m ή 5200 cm	
ΠΛΑΤΟΣ	26 m ή 2600 cm	
ΑΚΤΙΝΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ	6,5 m ή 650 cm	
$\gamma$	24 kN/m <sup>3</sup> ή 0,024 N/cm <sup>3</sup>	
K	1/3	
ELEMENTS	ΠΕΤΡΩΜΑ	FOREPOLING
ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΑ	-	$\alpha = 14$ cm
ΚΥΚΛΙΚΑ	-	d = 14 cm
	ΠΕΤΡΩΜΑ	FOREPOLING
E	150 MPa	210 GPa
$\nu$	0,25	0,30

Έτσι, το ύψος του μοντέλου είναι 52 μέτρα, το πλάτος του 26 μέτρα και η ακτίνα της σήραγγας που εξορύσσεται είναι 6,5 μέτρα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1, η σήραγγα, έχει κατασκευαστεί σαν τεταρτοκύκλιο. Αυτό έγινε λόγω της συμμετρίας του μοντέλου και ως εκ τούτου για τη μείωση των στοιχείων του μοντέλου, άρα και την επίτευξη ταχύτερης επίλυσής του. Η διακριτοποίηση του μοντέλου φαίνεται στα σχήματα 5.2 και 5.3.

Το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος είναι 150 MPa ενώ των δοκών προπορείας (forepoling) είναι 210 GPa. Ο λόγος Poisson για το πέτρωμα είναι 0,25 ενώ για τις δοκούς προπορείας είναι 0,30.

Το μοναδιαίο βάρος του πετρώματος είναι  $\gamma = 24$  kN/m<sup>3</sup>. Η κατακόρυφη φόρτιση των μοντέλων επιλέγεται να είναι ίση με  $\sigma_v = \gamma h$ , όπου h η κάθετη απόσταση από την επιφάνεια ως τον άξονα της σήραγγας, δηλαδή h = 52 m. Οπότε είναι  $\sigma_v = 1248$  kN/m<sup>2</sup> ή  $\sigma_v = 1,248$  MPa. Η πλευρική φόρτιση των μοντέλων επιλέγεται να είναι ισούται με

$\sigma_h = K\gamma h$ , όπου  $K$  ο συντελεστής πλευρικών τάσεων, για τον οποίο ισχύει  $K = 1/3$ . Επομένως είναι  $\sigma_h = 416 \text{ kN/m}^2$  ή  $\sigma_h = 0,416 \text{ MPa}$ . Η φόρτιση επιβάλλεται στα μοντέλα σε δέκα στάδια.

Οι συννοριακές συνθήκες που τέθηκαν (σχήμα 5.4) είναι:

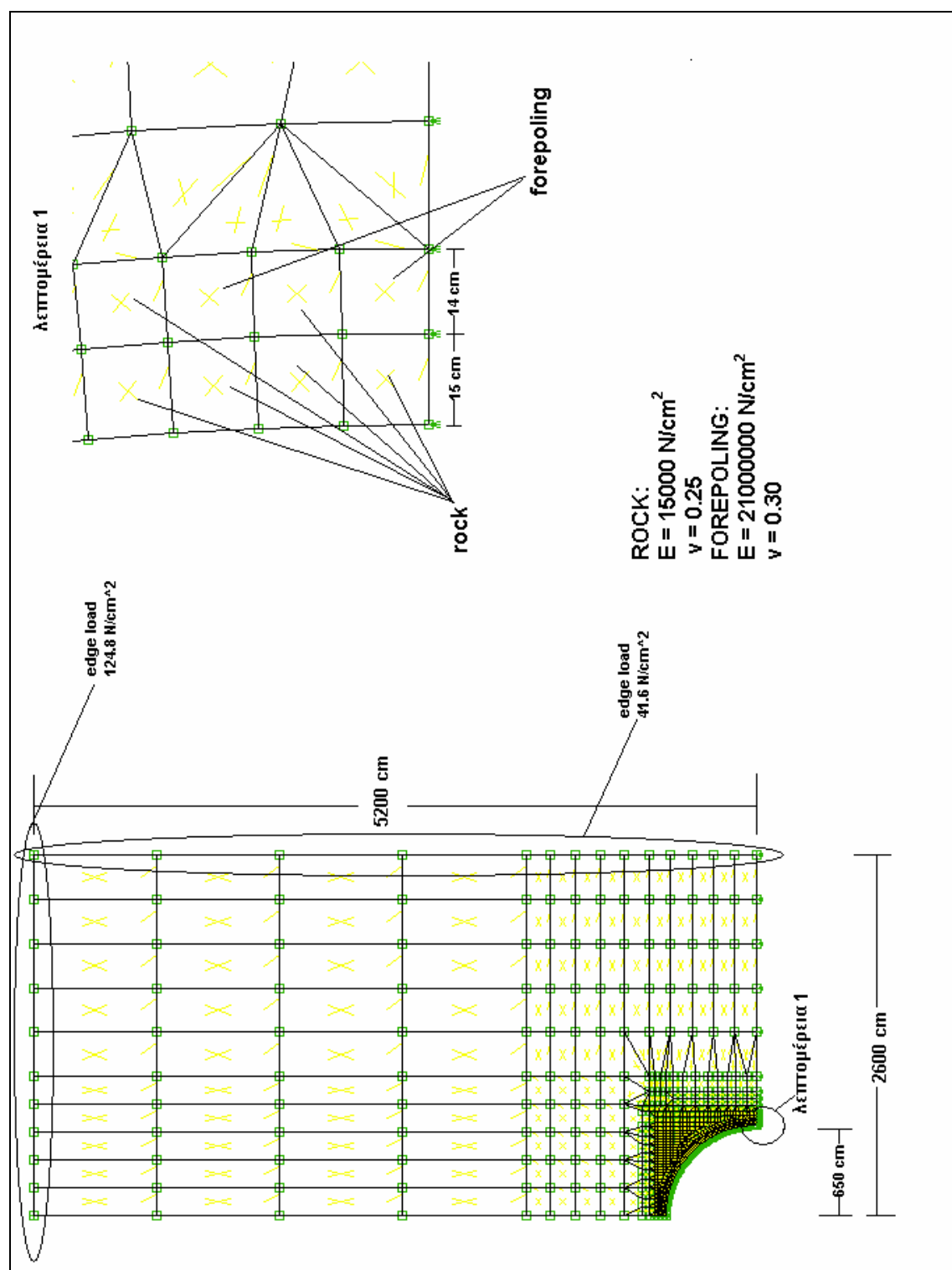
- Επιβολή φόρτισης άνω επιφάνειας (edge load) με  $\sigma_v = 1,248 \text{ MPa}$
- Επιβολή πλευρικής φόρτισης (edge load) στην δεξιά πλευρά του μοντέλου, ίσης με  $\sigma_h = 0,416 \text{ MPa}$
- Κύλιση στον άξονα  $X$  ( $d_Y = 0$ )
- Κύλιση στον άξονα  $Y$  ( $d_X = 0$ )

Ακόμα, στα μοντέλα ορίστηκε ένας κόμβος ελέγχου (control node), ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 5.5. Από τον κόμβο αυτό εξάγονται τα αποτελέσματα για να κατασκευαστούν διαγράμματα που δίνουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις στον κόμβο για κάθε στάδιο φόρτισης. Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται διαγράμματα history plot. Ένας άλλος τύπος διαγραμμάτων, που κατασκευάζονται είναι διαγράμματα που δίνουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις στην περίμετρο της σήραγγας, ξεκινώντας από τη στέψη της. Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται διαγράμματα node path.

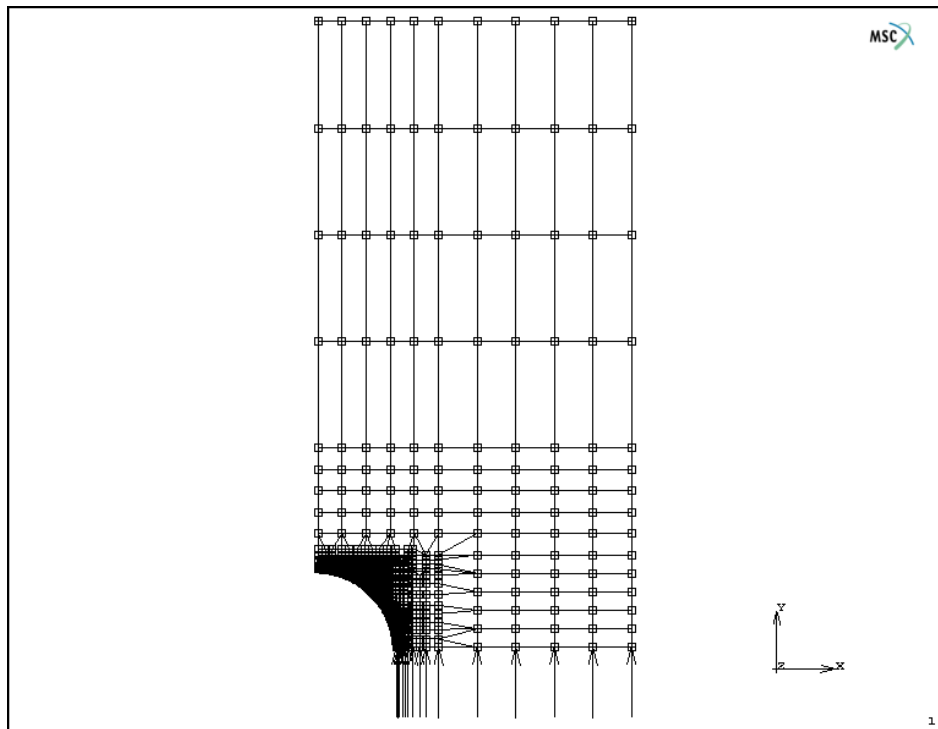
Η επίλυση των δισδιάστατων μοντέλων έγινε με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain), αφού η τρίτη διάσταση που είναι το βάθος της σήραγγας, δεν είναι μικρή σε σχέση με τις άλλες δύο ( $x, y$ ) και τα φορτία που δέχεται η σήραγγα είναι πάνω στο επίπεδο ( $x, y$ ). Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων ( $u$ ) είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση ( $u_z = 0$  και επομένως  $\varepsilon_z = 0$ ) καθώς και ότι τα διανύσματα μετατόπισης στο επίπεδο  $x, y$  είναι ανεξάρτητα από την τρίτη διάσταση δηλαδή  $u_x = f(x, y)$  και  $u_y = f(x, y)$  (Αγιουτάντης, 2002). Το πάχος της “φέτας” επιλέχθηκε ίσο με 100 cm. Ο πίνακας 5.2 δείχνει τον αριθμό των στοιχείων (elements) που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα.

**Πίνακας 5.2: Αριθμός στοιχείων για κάθε δισδιάστατο μοντέλο**

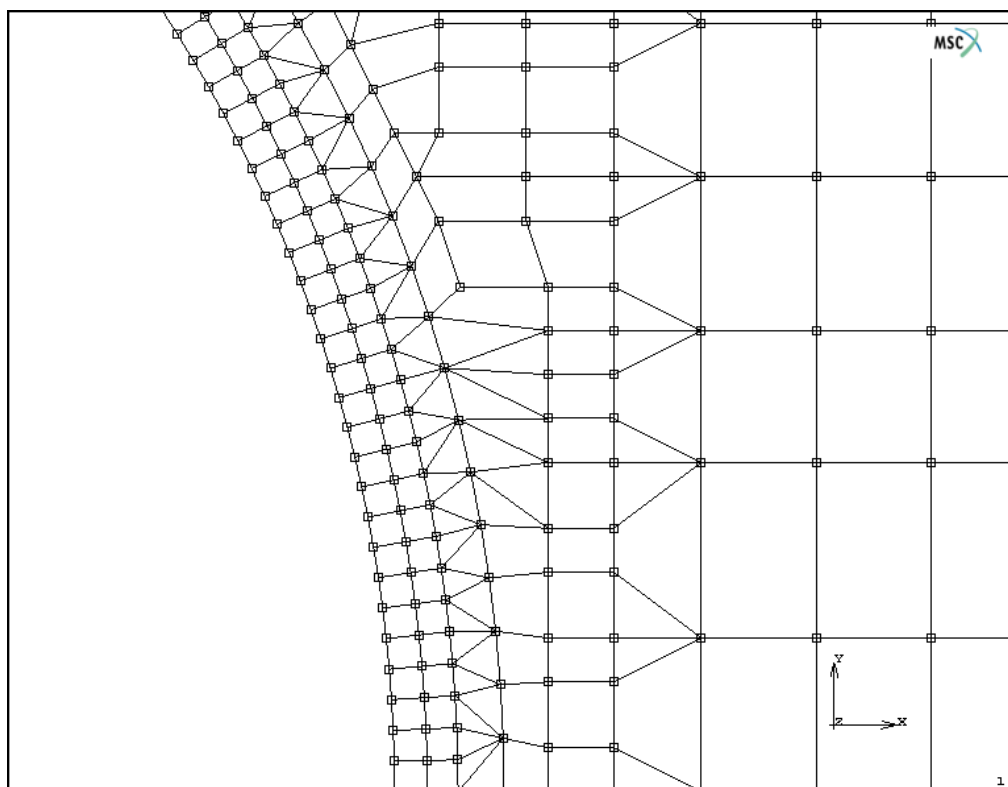
Μοντέλο	Πέτρωμα	Forepoling	Πλαίσιο	Σύνολο
Ανυποστήρικτη διατομή	771	-	-	771
Διατομή με δοκούς προπορείας	734	37	-	771
Διατομή ζώνης δοκών προπορείας	698	73	-	771
Διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας	763	73	-	836
Διατομή με κυκλικά στοιχεία δοκών προπορείας	3748	2068	-	5816
Διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο	734	37	73	844



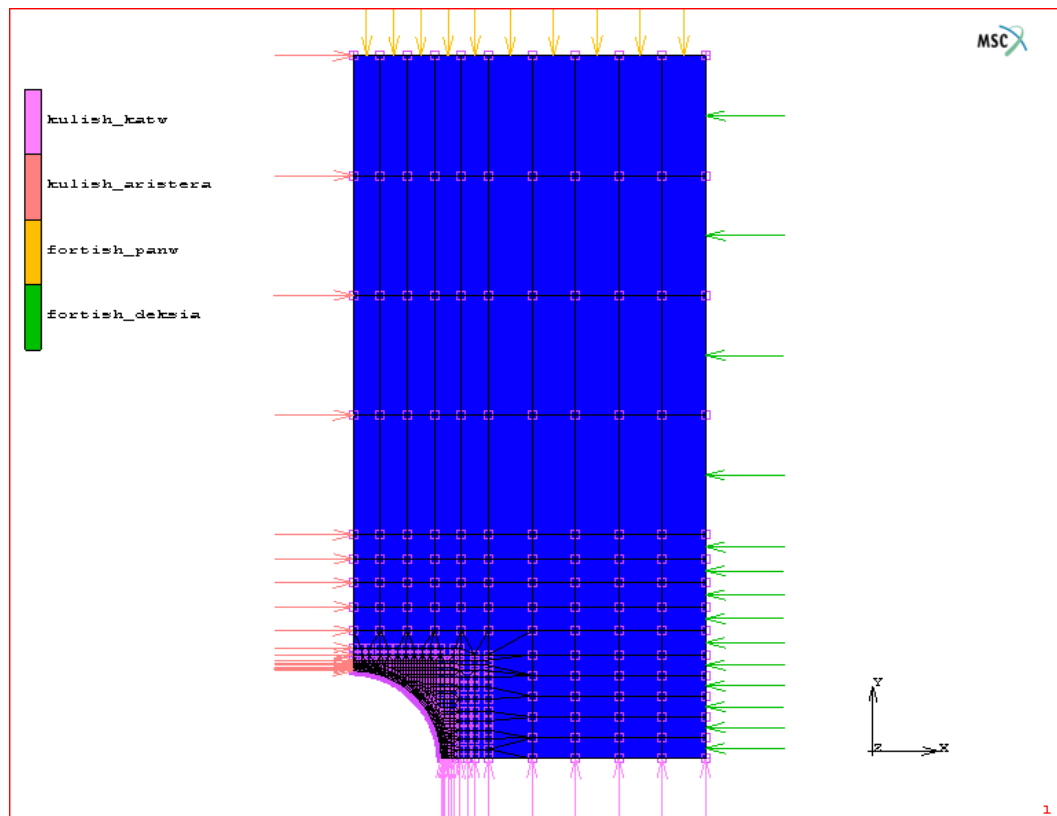
Σχήμα 5.1: Γενικά χαρακτηριστικά δισδιάστατου μοντέλου



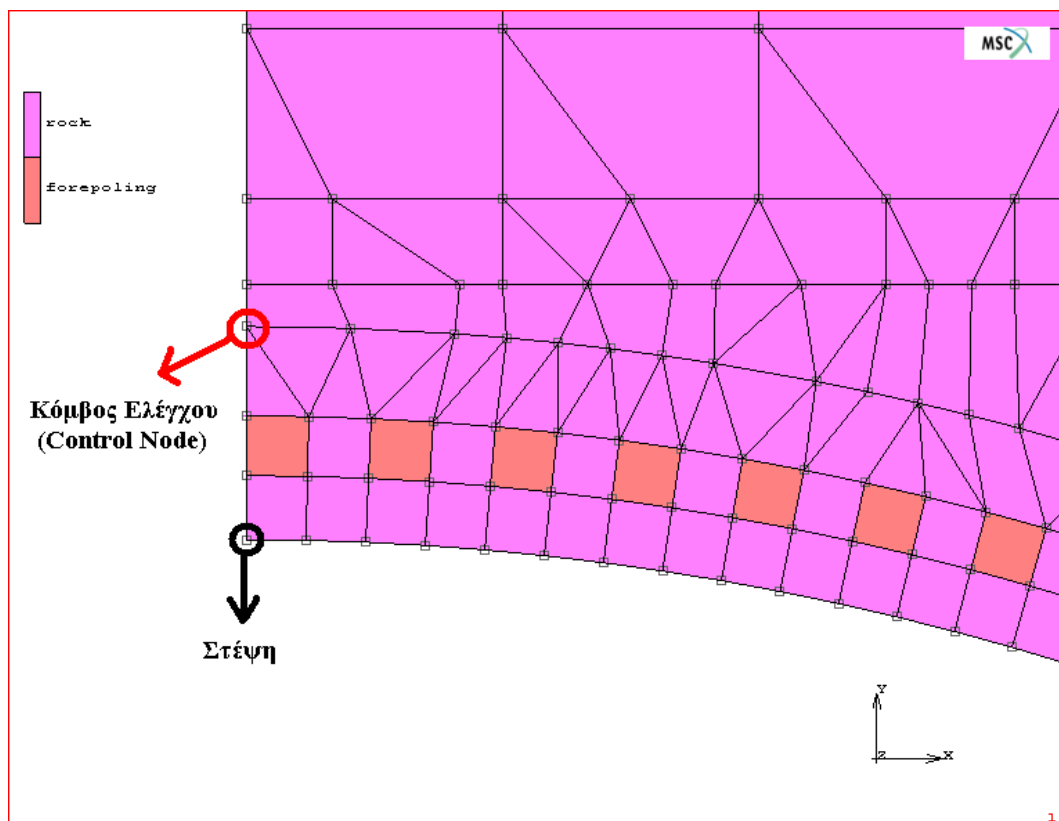
Σχήμα 5.2: Συνολική διακριτοποίηση



Σχήμα 5.3: Τμήμα διακριτοποίησης



Σχήμα 5.4: Συνοριακές συνθήκες δισδιάστατου μοντέλου

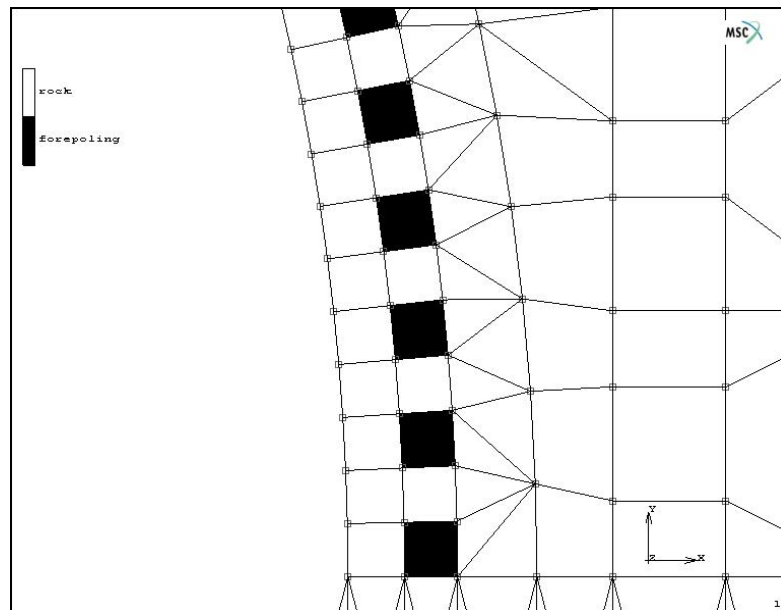


Σχήμα 5.5: Κόμβος ελέγχου

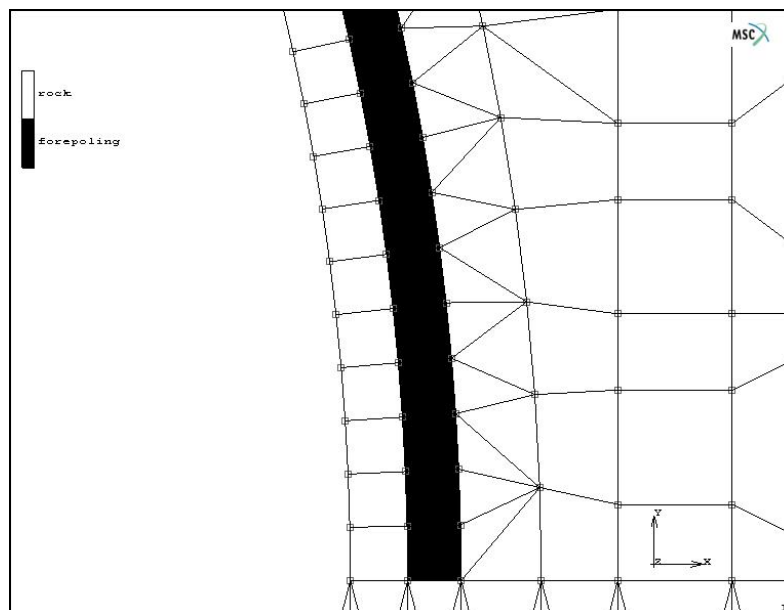
## 5.2 Ελαστικά Μοντέλα

### 5.2.1 Κύρια μοντέλα

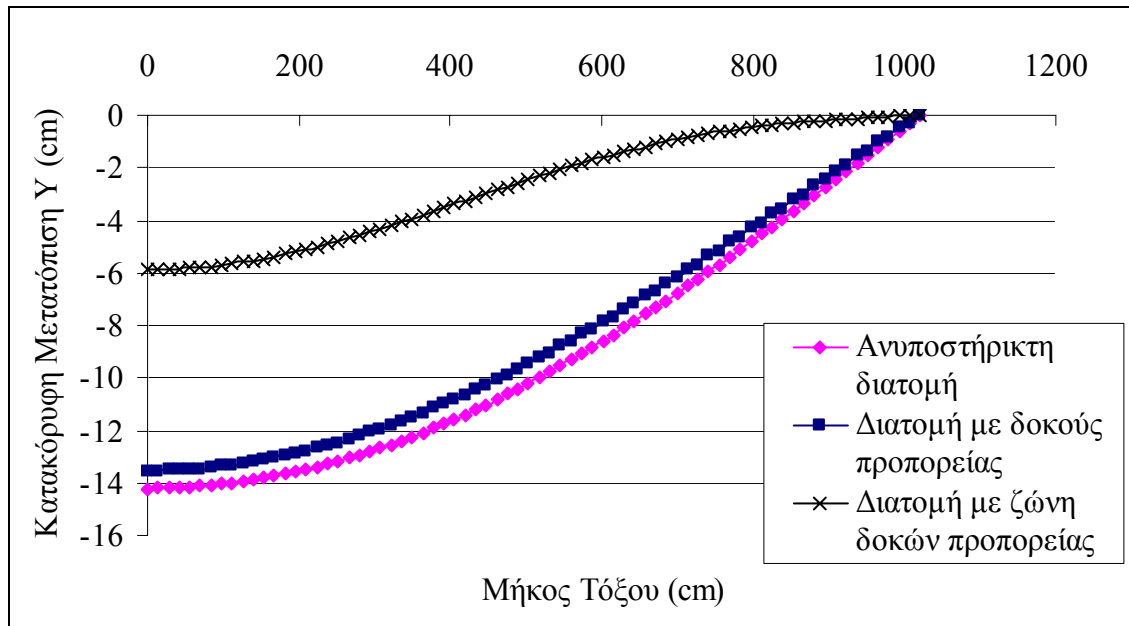
Τα κύρια ελαστικά μοντέλα που επιλύονται είναι η διατομή με δοκούς προπορείας (σχήμα 5.6), η διατομή με ζώνη δοκών προπορείας (σχήμα 5.7) και η ανυποστήρικτη διατομή που συνίσταται φυσικά μόνο από πέτρωμα. Τα στοιχεία των δοκών προπορείας είναι τετραγωνικά με μήκος πλευράς 14 cm.



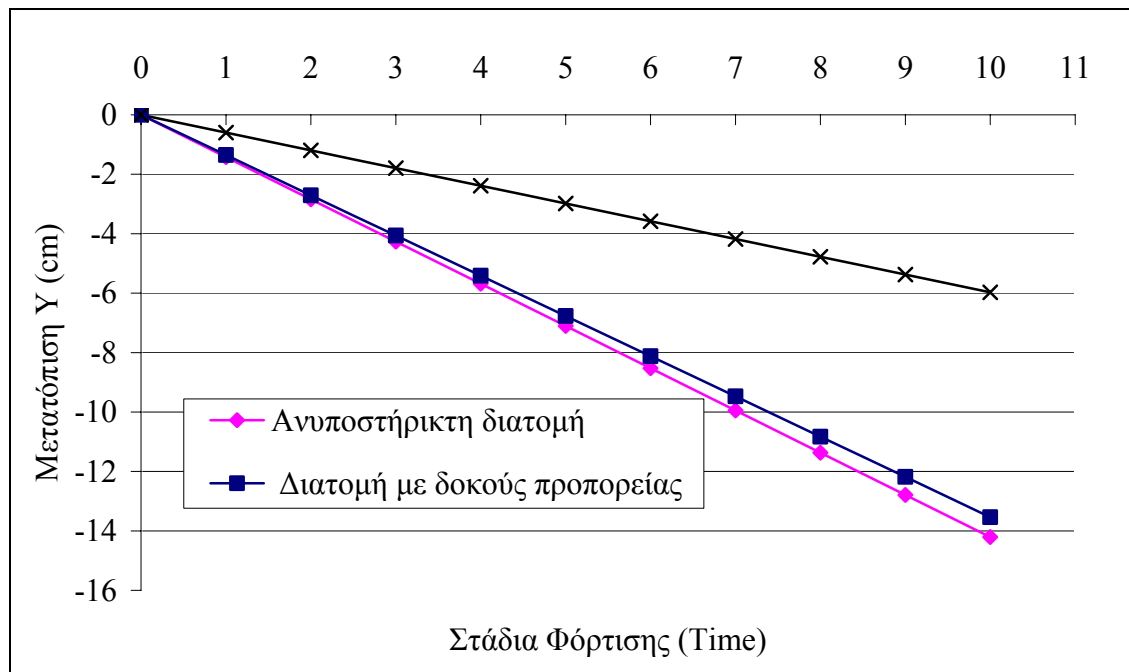
Σχήμα 5.6: Διατομή με δοκούς προπορείας



Σχήμα 5.7: Διατομή με ζώνη forepoling



Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας



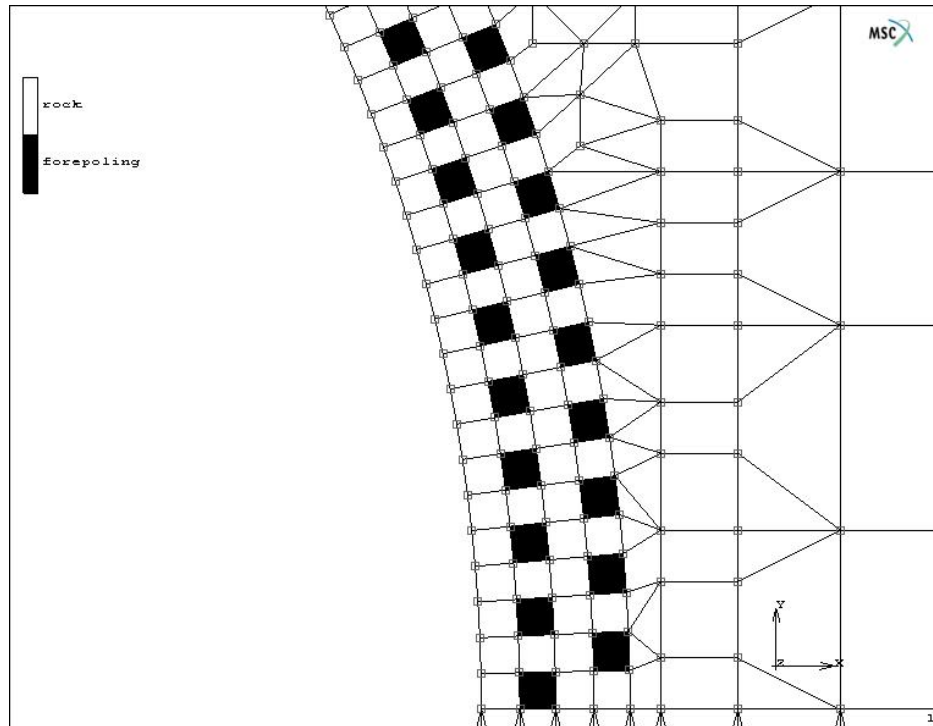
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας

Στο σχήμα 5.8, παρατηρείται ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στην περίμετρο της σήραγγας είναι πολύ μικρότερες για τη διατομή με ζώνη δοκών προπορείας σε σχέση με την ανυποστήρικτη διατομή και την διατομή με δοκούς προπορείας. Επίσης η καμπύλη της ζώνης παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από αυτές των άλλων δυο.



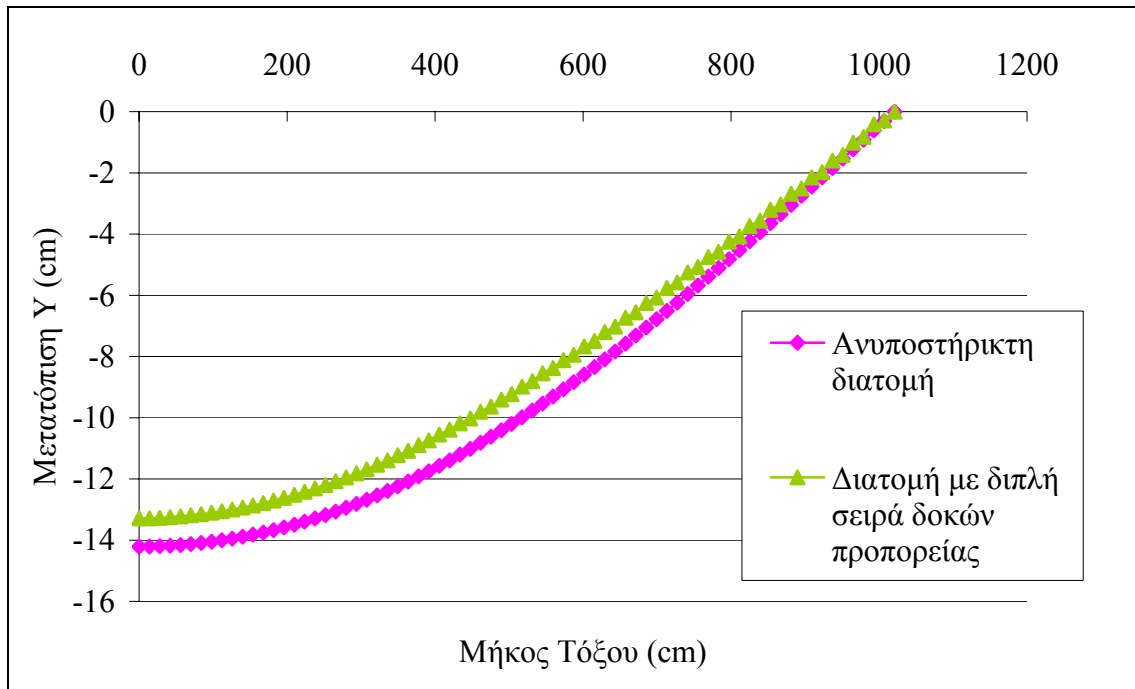
Στο σχήμα 5.9 παρατηρείται φαινόμενο ανάλογο με το προηγούμενο. Εδώ η συμπεριφορά των καμπύλων είναι και στις τρεις περιπτώσεις ίδια και γραμμική αφού το μοντέλο είναι ελαστικό.

### 5.2.2 Μοντέλο διατομής με διπλή σειρά δοκών προπορείας

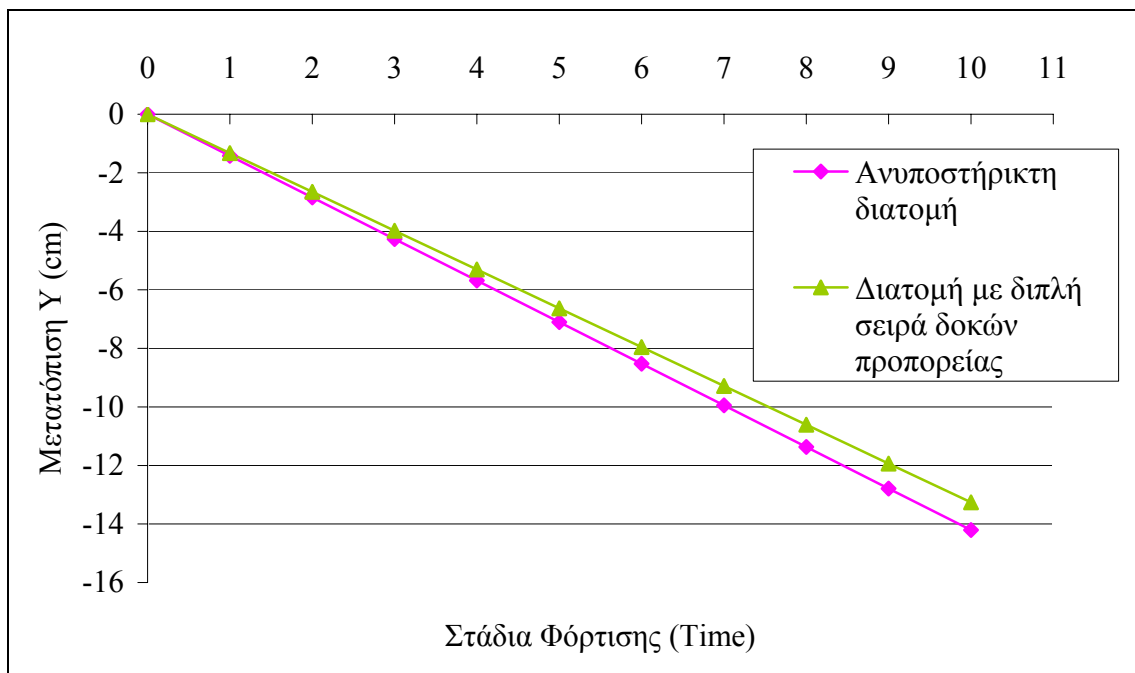


Σχήμα 5.10: Διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας

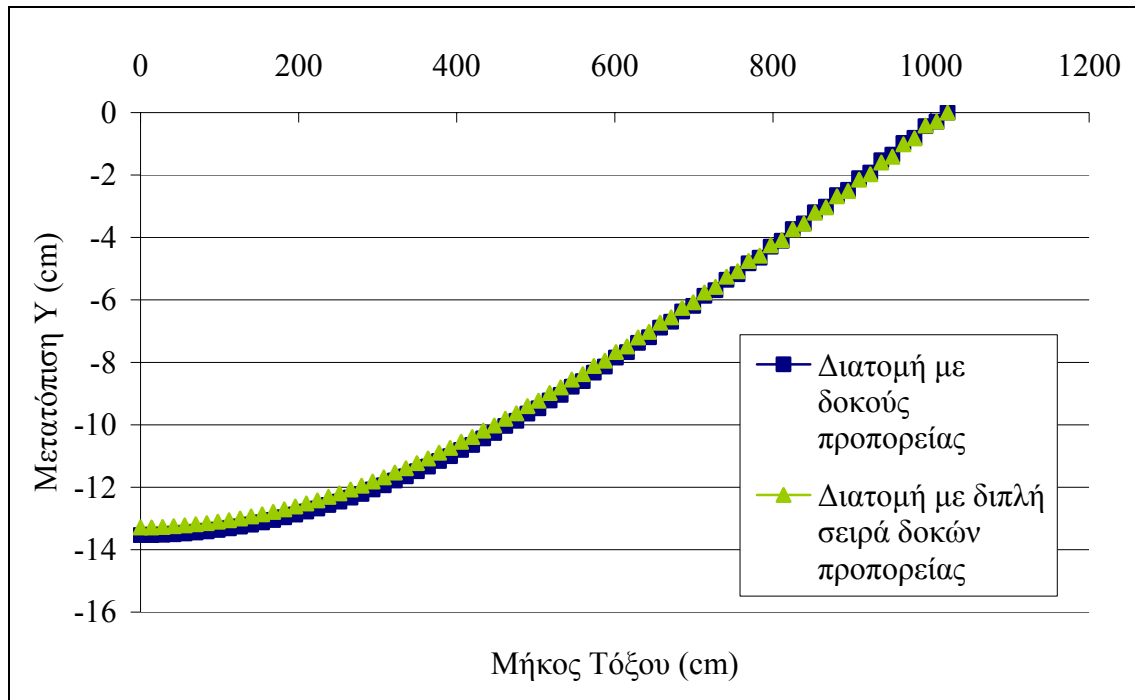
Το μοντέλο με διπλή σειρά δοκών προπορείας (σχήμα 5.10), επιλέχθηκε γιατί συνήθως μια τέτοια διάταξη χρησιμοποιείται σε δύσκολα σημεία της κατασκευής της σήραγγας (για παράδειγμα στην είσοδο και στην έξοδό της). Όπως φαίνεται από τα επόμενα τέσσερα διαγράμματα, τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς καλύτερα (όχι όμως και τα αναμενόμενα) από τη διατομή με μια σειρά δοκών προπορείας αφού παρατηρούνται λιγότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις, έστω και με ελάχιστη διαφορά.



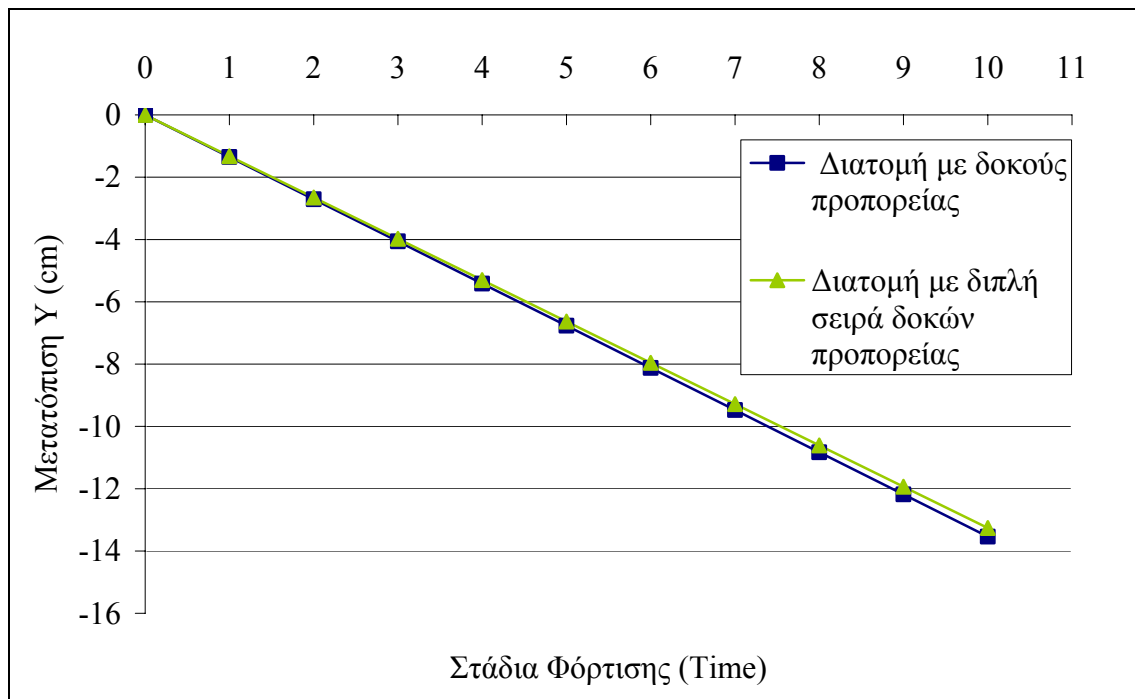
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας

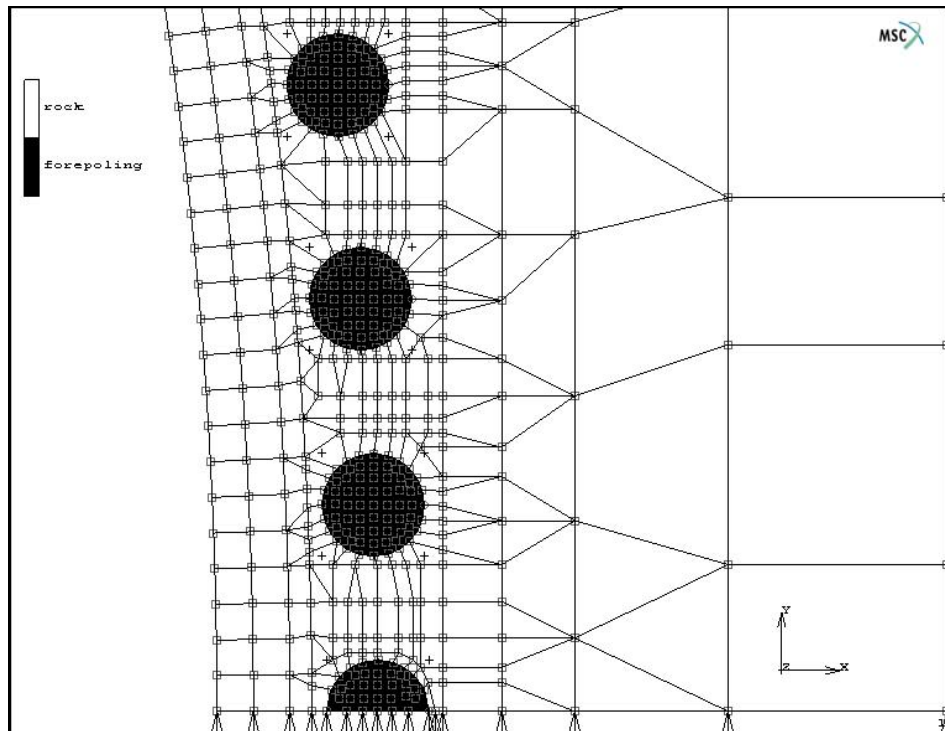


Σχήμα 5.13: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας



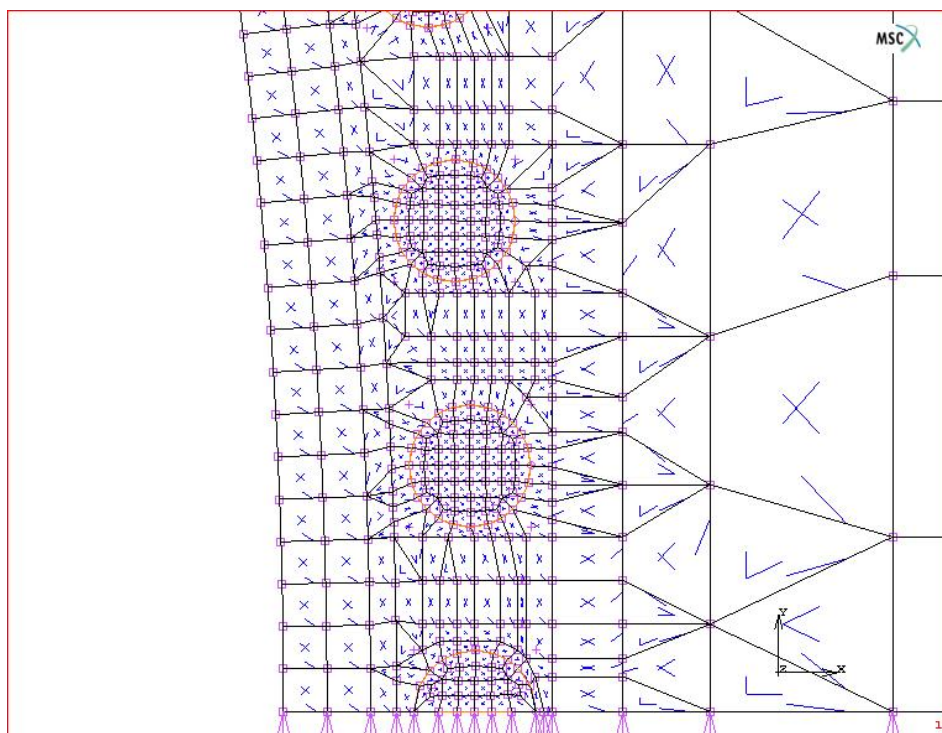
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με διπλή σειρά δοκών προπορείας

### 5.2.3 Μοντέλο διατομής με κυκλικά στοιχεία δοκών προπορείας

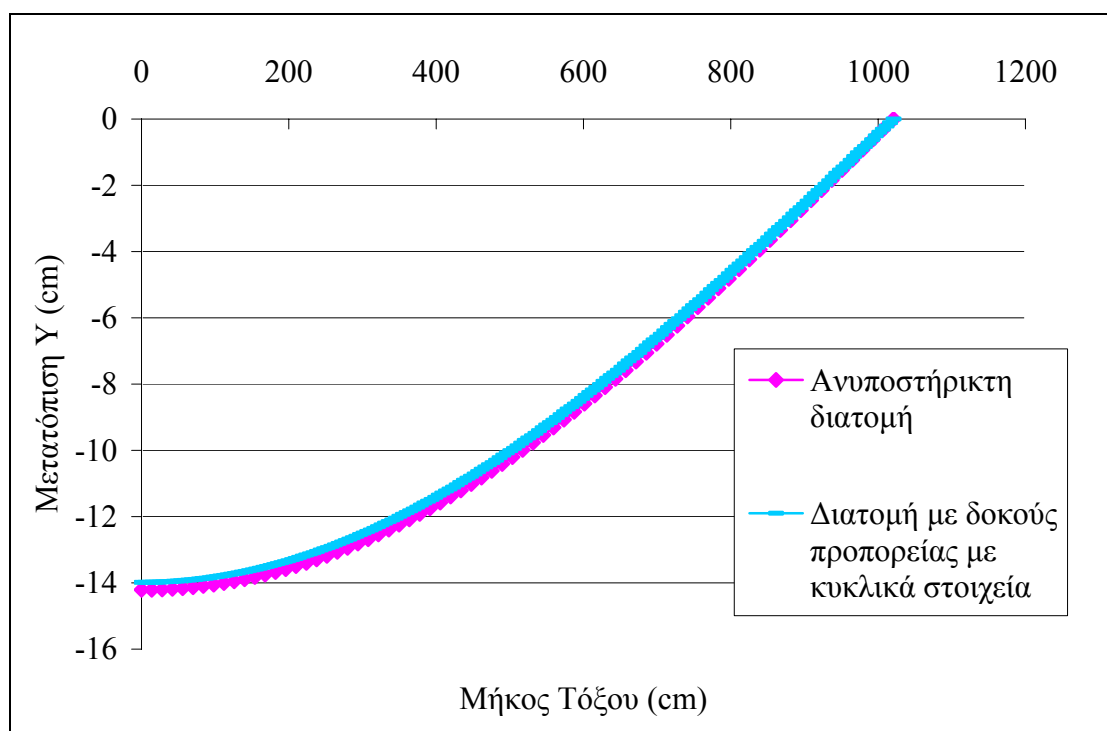


Σχήμα 5.15: Διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία

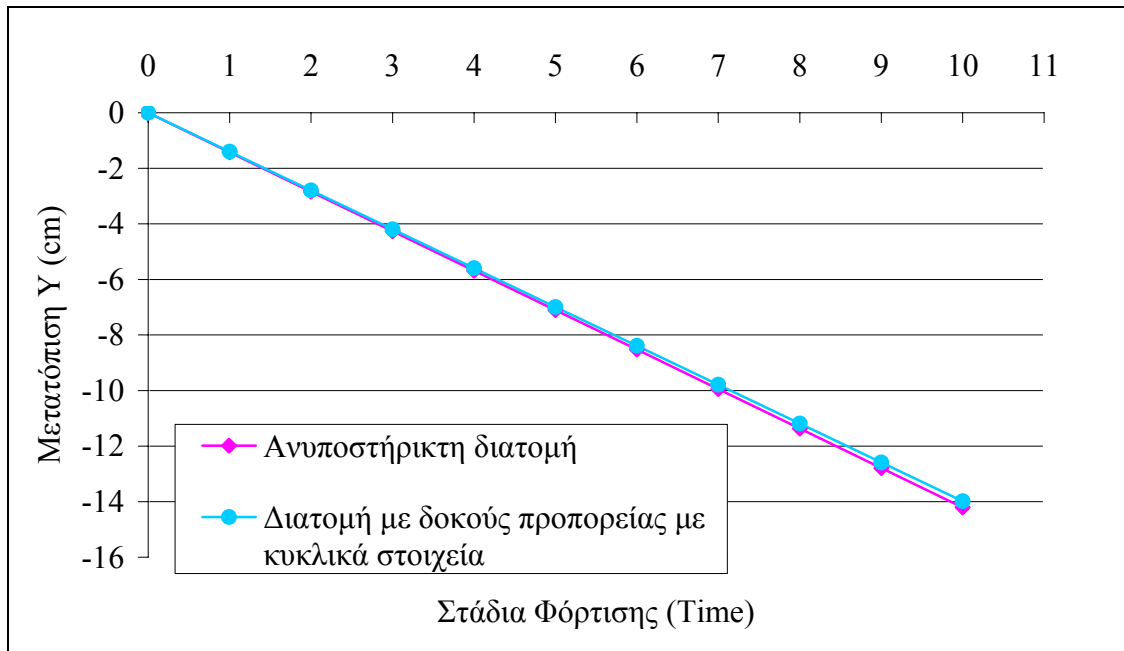
Το μοντέλο με κυκλικά στοιχεία δοκών προπορείας, κατασκευάστηκε γιατί προσεγγίζει πολύ καλύτερα την πραγματικότητα αφού οι δοκοί προπορείας έχουν κυκλική διατομή. Το μοντέλο αυτό δίνει αποτελέσματα με ελάχιστη απόκλιση από αυτά του μοντέλου με τα τετραγωνικά στοιχεία δοκών προπορείας όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα. Αυτό εξηγείται κατά κάποιο τρόπο από το γεγονός ότι το εμβαδόν που καταλαμβάνουν τα κυκλικά στοιχεία στο μοντέλο είναι κατά τι μικρότερο από αυτό των τετραγωνικών (αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 5.21). Δυο μειονεκτήματα του μοντέλου αυτού είναι ότι τα στοιχεία του είναι σχεδόν 8 φορές περισσότερα από αυτά του μοντέλου με τα τετραγωνικά στοιχεία δοκών προπορείας (πίνακας 3.2) οπότε και η επίλυσή του πιο χρονοβόρα αλλά και ότι η διακριτοποίηση του μοντέλου αυτού είναι πολύ δύσκολη (σχήμα 5.16).



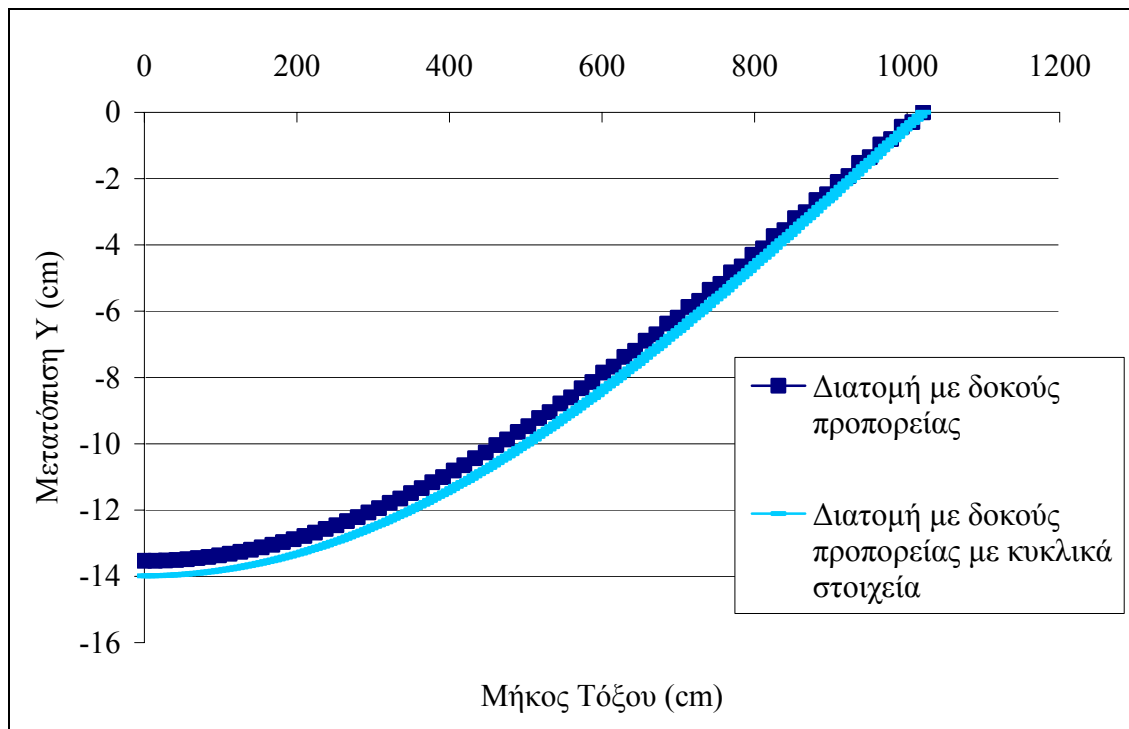
Σχήμα 5.16: Διακριτοποίηση διατομής με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία



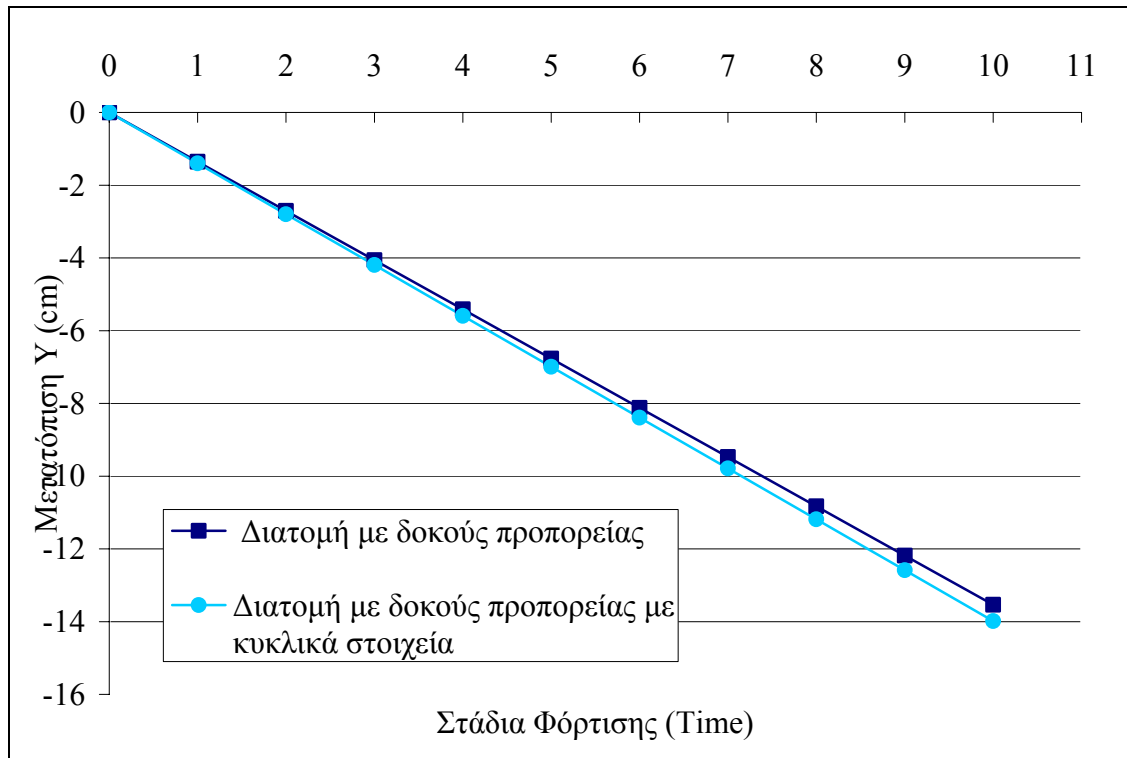
Σχήμα 5.17: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία



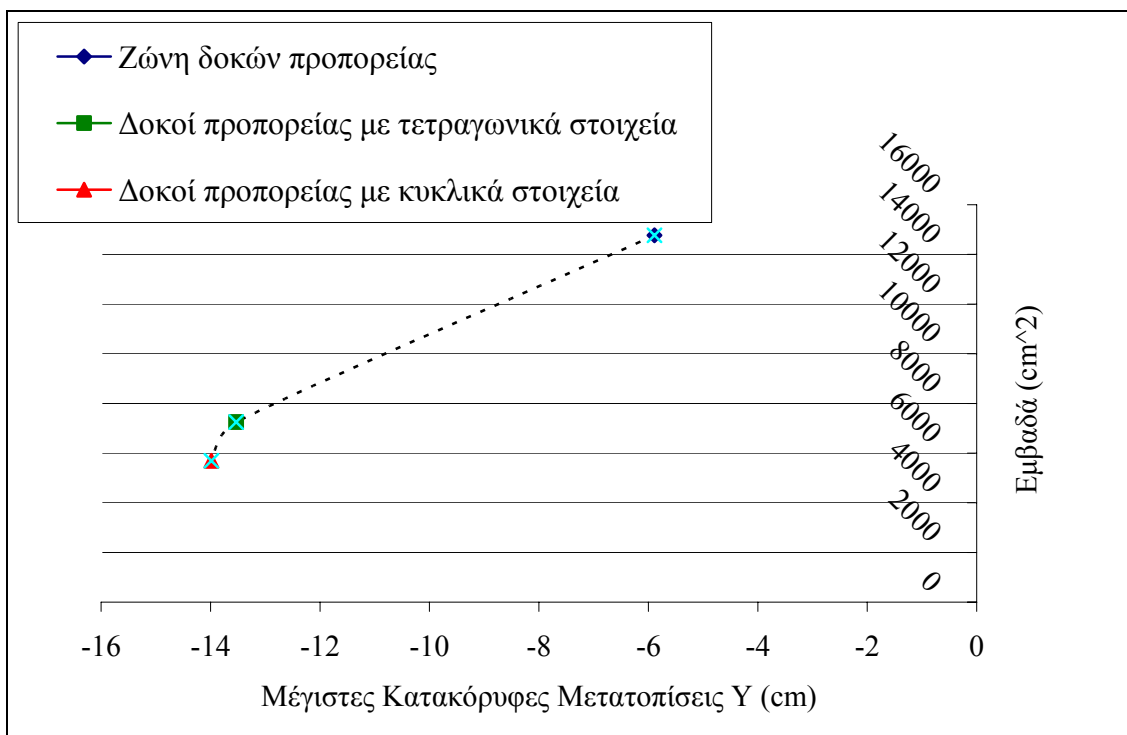
Σχήμα 5.18: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κυκλικά στοιχεία

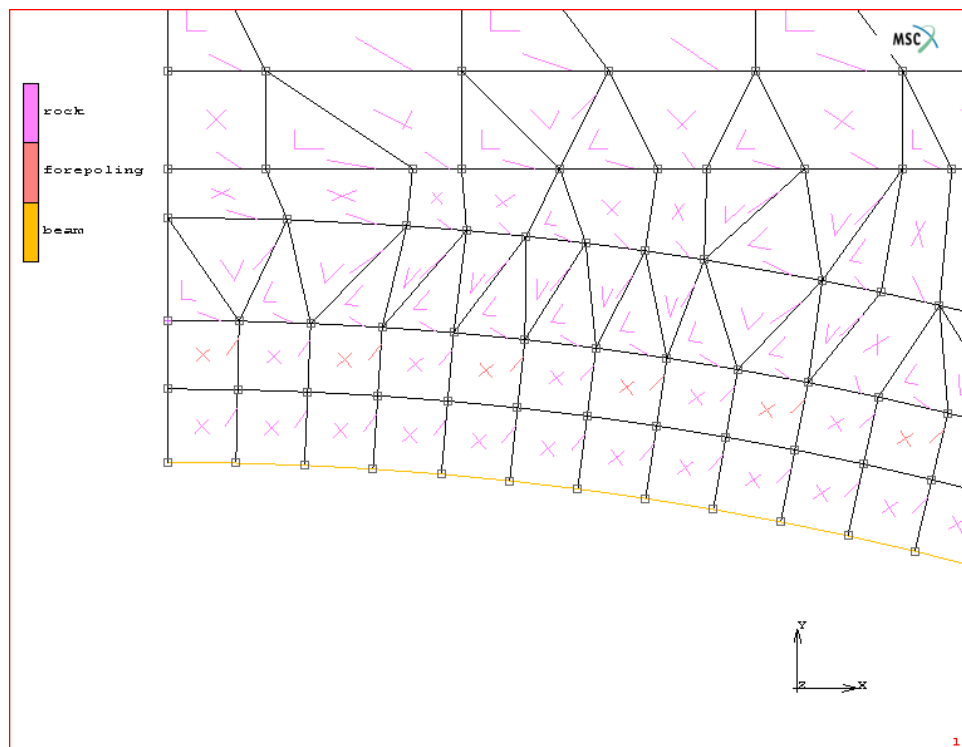


Σχήμα 5.21: Διάγραμμα εμβαδών των στοιχείων δοκών προπορείας συναρτήσει των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων

### 5.2.4 Μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο

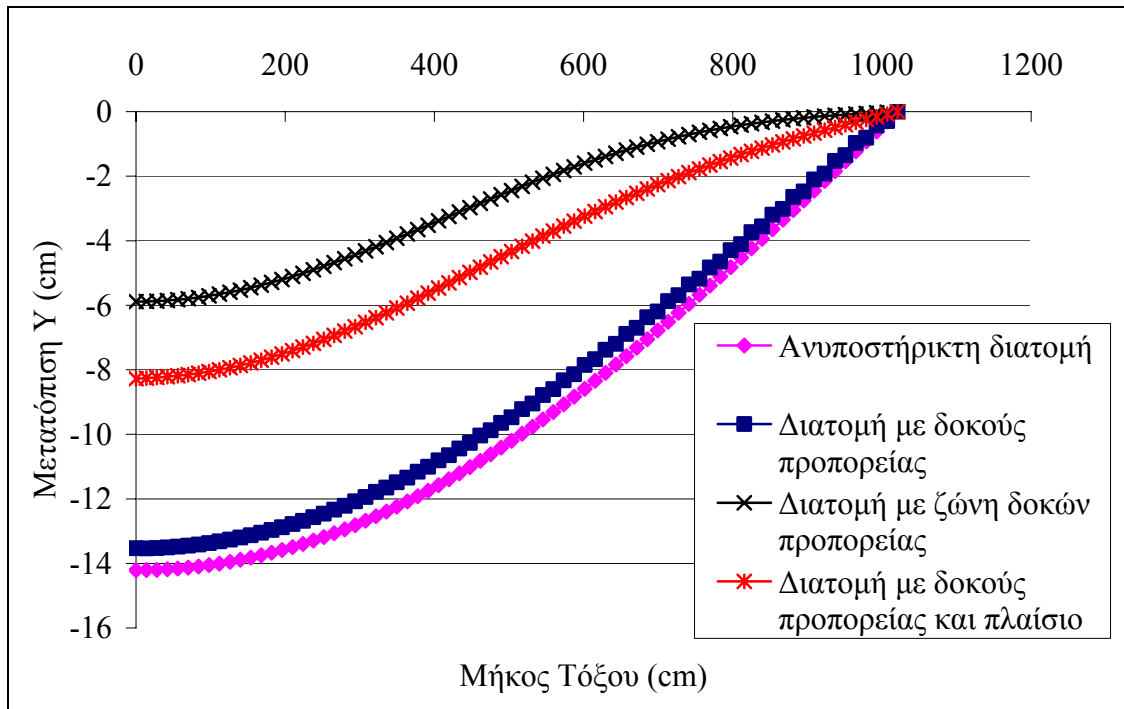
Τα αποτελέσματα από τα προηγούμενα μοντέλα, οδηγούν στο συμπέρασμα πως στη διατομή με δοκούς προπορείας οι δοκοί προπορείας, δρουν σαν πρόβολοι. Είναι δηλαδή πακτωμένοι στη μια πλευρά και ελεύθεροι στην άλλη. Έτσι το σύστημα της προπασσάλωσης, δεν αποδίδει τα αναμενόμενα. Χρειάζεται λοιπόν ένα μέσο το οποίο θα συγκρατεί την ελεύθερη πλευρά των δοκών προπορείας ούτως ώστε το σύστημα αυτό να έχει συμπεριφορά αμφιέριστης δοκού. Αυτό το μέσο δεν είναι άλλο από ένα χαλύβδινο πλαίσιο. Στην πραγματικότητα, το πλαίσιο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των δοκών προπορείας. Συνήθως τοποθετείται ανά 1 έως 1.5 m προχώρησης εκσκαφής.

Το χαλύβδινο πλαίσιο έχει ύψος 18 cm, εμβαδόν διατομής  $65,25 \text{ cm}^2$ , μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και λόγο Poisson 0,30. Το χαλύβδινο πλαίσιο προσομοιώθηκε με γραμμικά (μονοδιάστατα) στοιχεία ράβδου (beam elements) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.22.

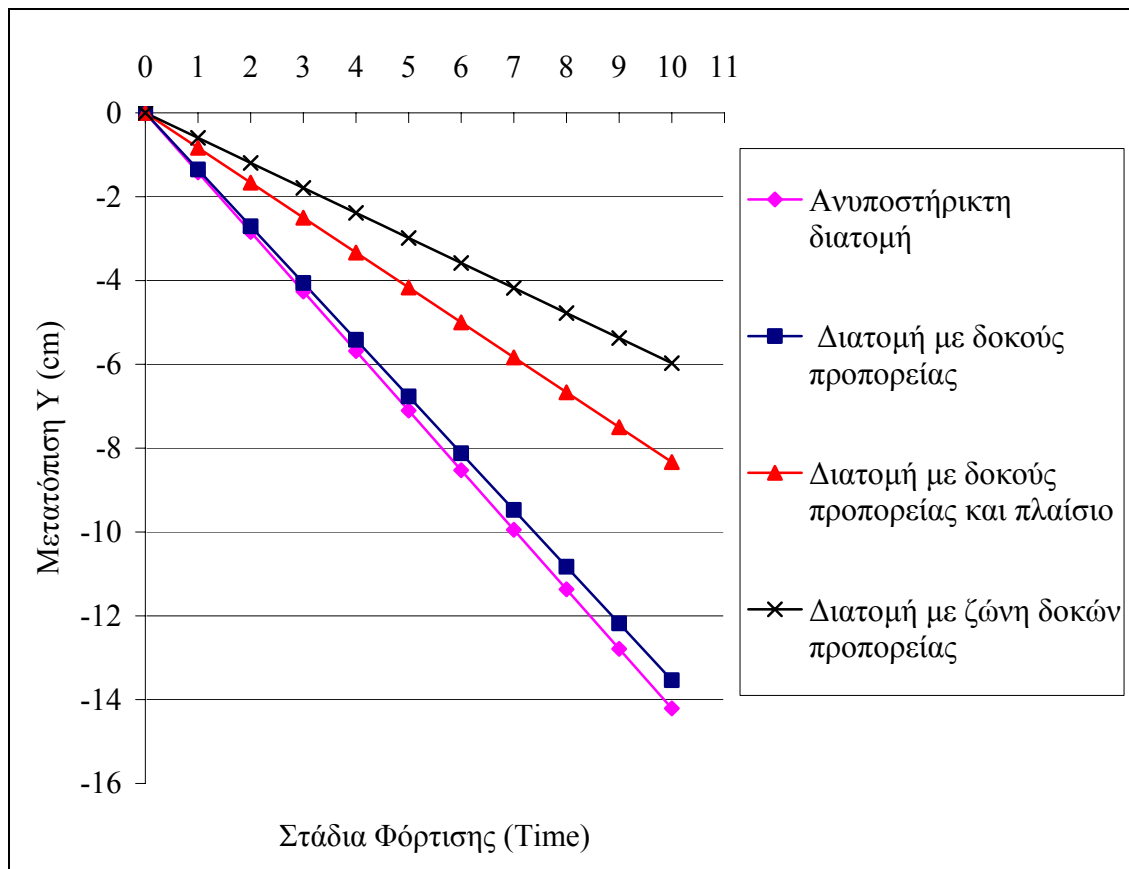


Σχήμα 5.22: Πλαίσιο προσομοιωμένο με γραμμικά στοιχεία (beam elements)

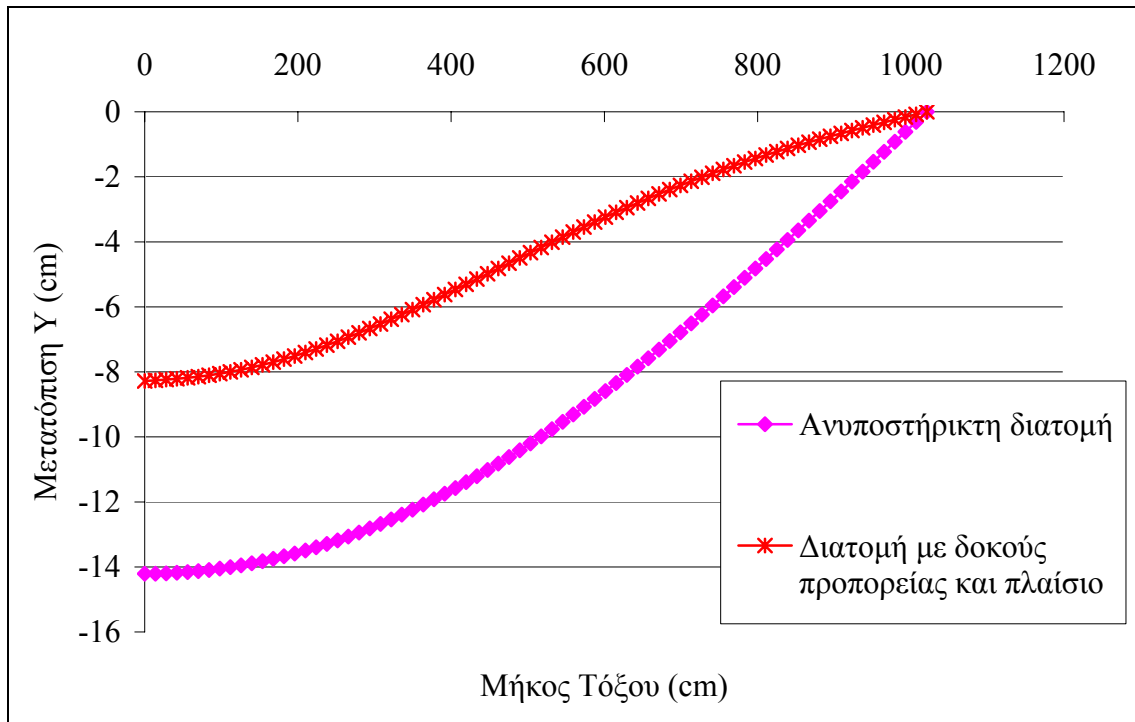




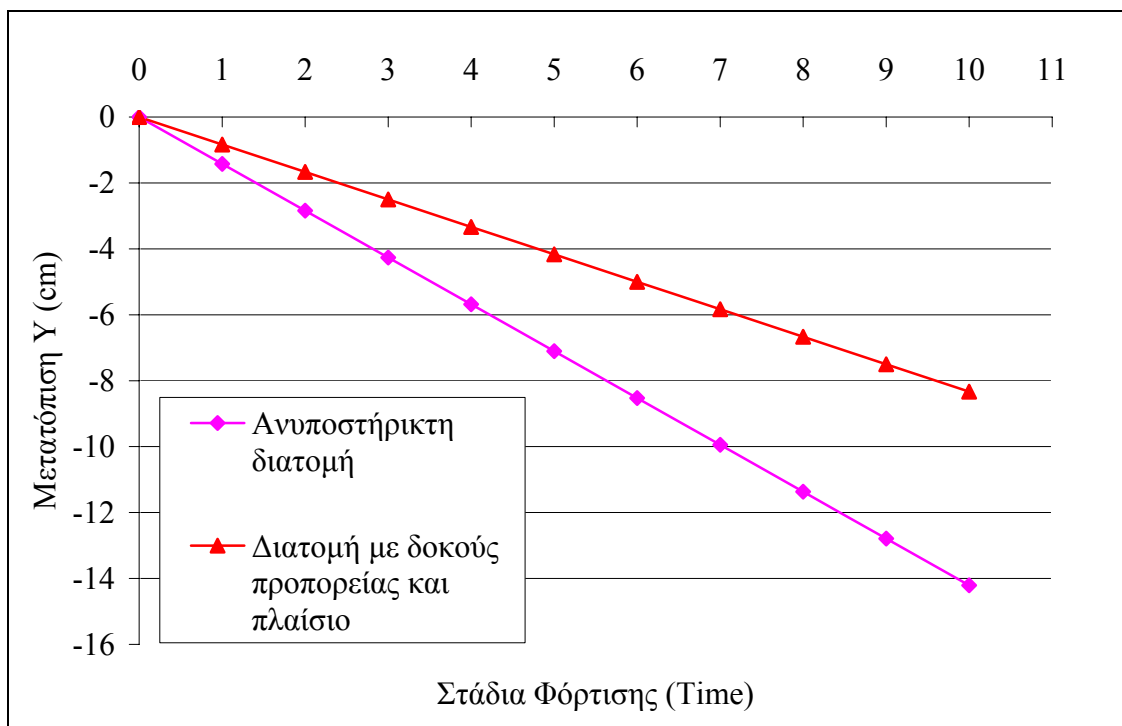
Σχήμα 5.23: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



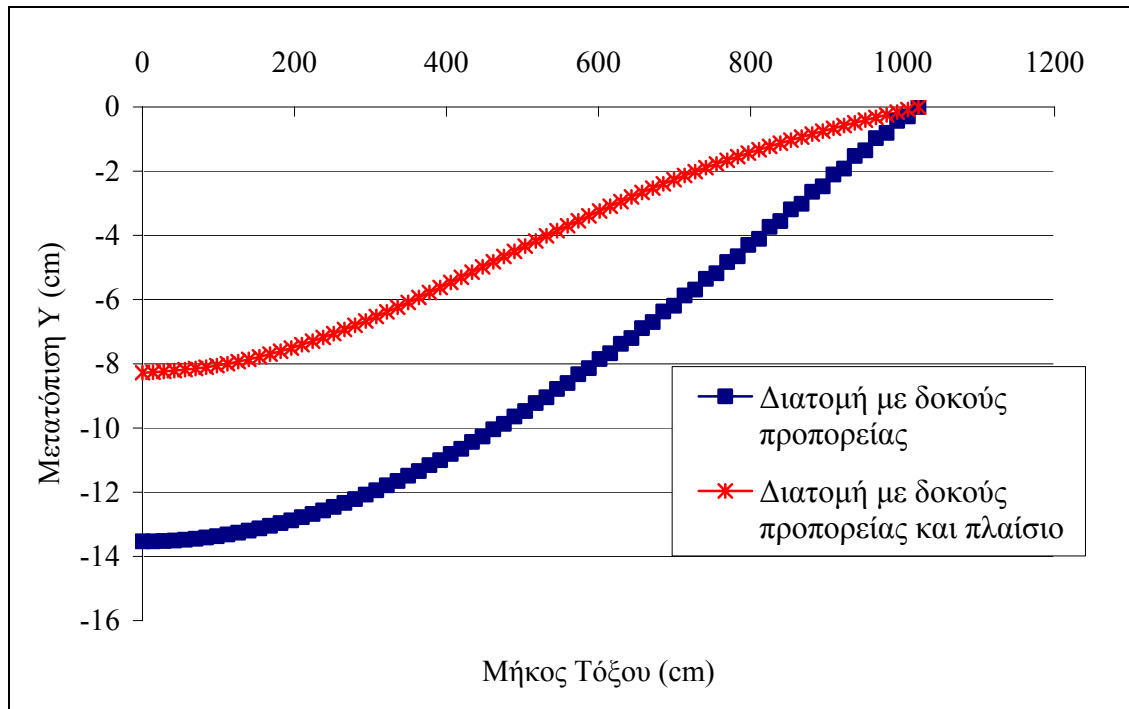
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



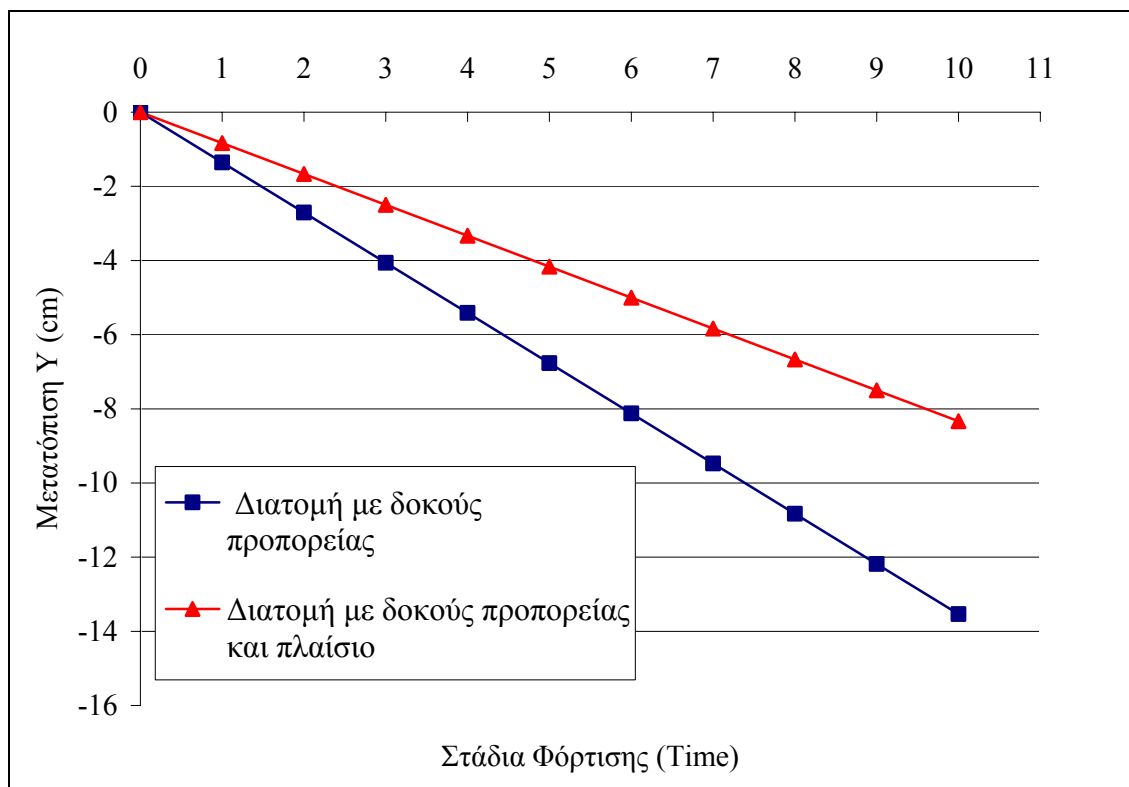
Σχήμα 5.25: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



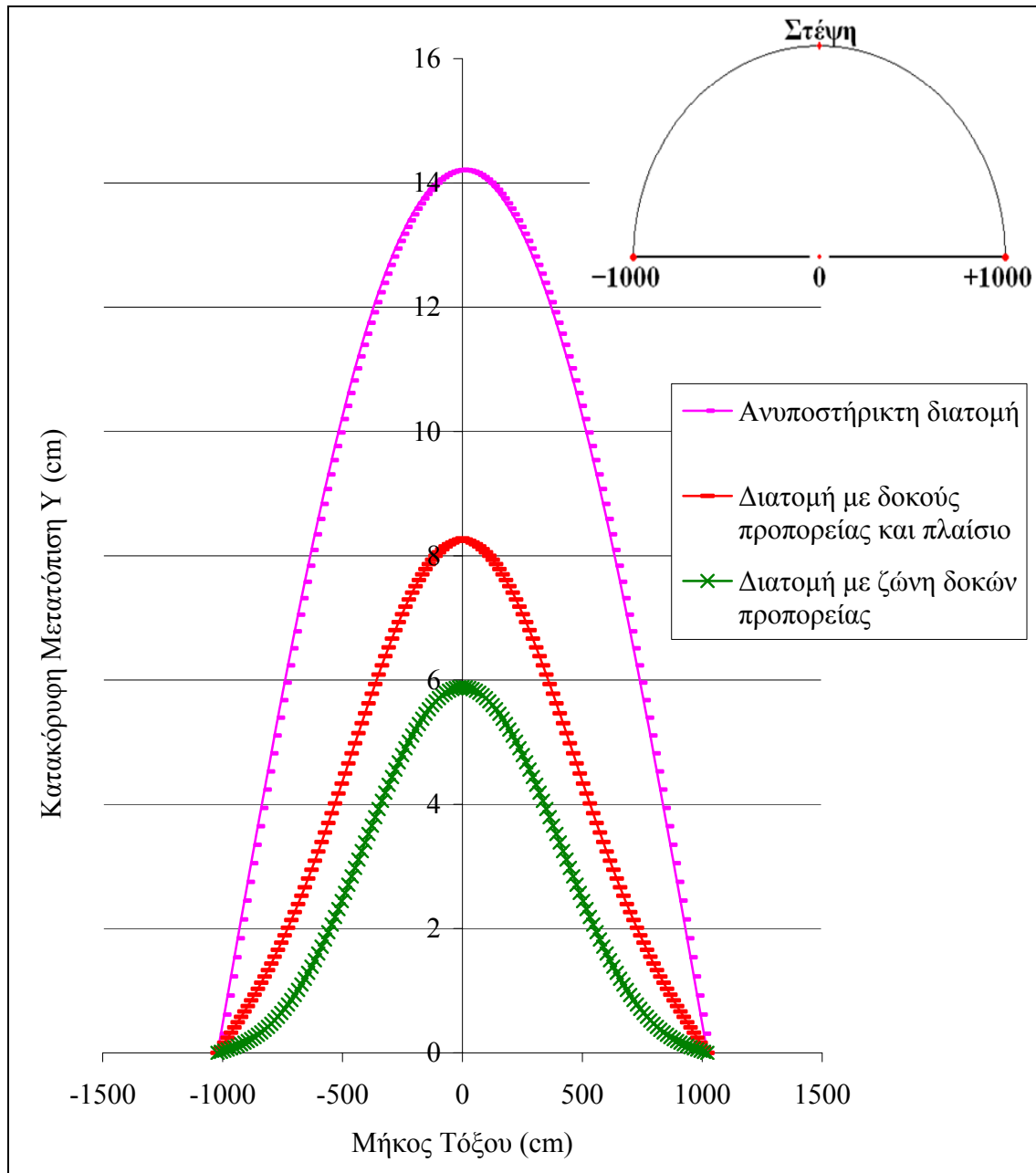
Σχήμα 5.26: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



Σχήμα 5.27: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



Σχήμα 5.28: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



**Σχήμα 5.29:** Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην συνολική περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο

Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.23 έως 5.28, η διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο, παρουσιάζει αρκετά καλύτερη συμπεριφορά από τη διατομή με δοκούς προπορείας και φυσικά από την ανυποστήρικτη διατομή. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις, μειώνονται σχεδόν 40%.

Το σχήμα 5.29 κατασκευάστηκε σύμφωνα με το σχήμα 5.23. Δεδομένης της γεωμετρίας των μοντέλων, εφόσον είναι γνωστές τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων από την στέψη της σήραγγας (0 cm) μέχρι τη δεξιά παρειά της (+ 1000 cm), είναι οι ίδιες και για την περιοχή από την στέψη της σήραγγας (0 cm) μέχρι την αριστερή παρειά της σήραγγας (- 1000 cm). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε θετικές από αρνητικές για λόγους ευκολίας (γενικά στη Μηχανική οι αρνητικές τιμές δηλώνουν θλίψη ενώ στην Μηχανική Πετρωμάτων, θλίψη δηλώνουν οι θετικές τιμές. Τα αποτελέσματα από το λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων πάντως υπακούουν στη θεώρηση της Μηχανικής).

Στον άξονα X, όπως προαναφέρθηκε, τα 0 cm δηλώνουν τη στέψη της σήραγγας ενώ τα 1000 cm, προκύπτουν από την περιμετρική απόσταση της παρειάς από τη στέψη (δηλαδή  $\frac{\pi}{2}R$  για το τεταρτοκύκλιο, όπου R η ακτίνα της σήραγγας). Έτσι ισχύει +1000 για την αριστερή παρειά της σήραγγας και -1000 για την δεξιά παρειά της σήραγγας.

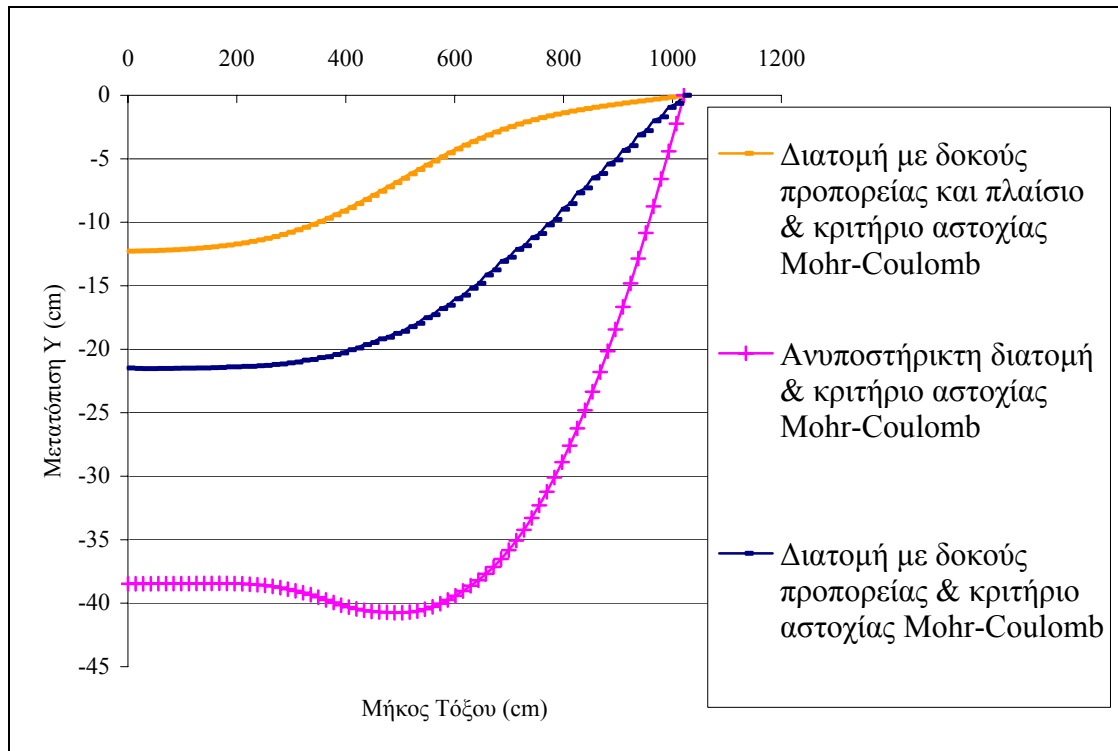
Το σχήμα 5.29 δείχνει ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες στη στέψη για την ανυποστήρικτη διατομή, ακολουθούν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις για τη διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο και μετά για τη διατομή με τη ζώνη δοκών προπορείας.

### 5.3 Ελαστοπλαστικά Μοντέλα

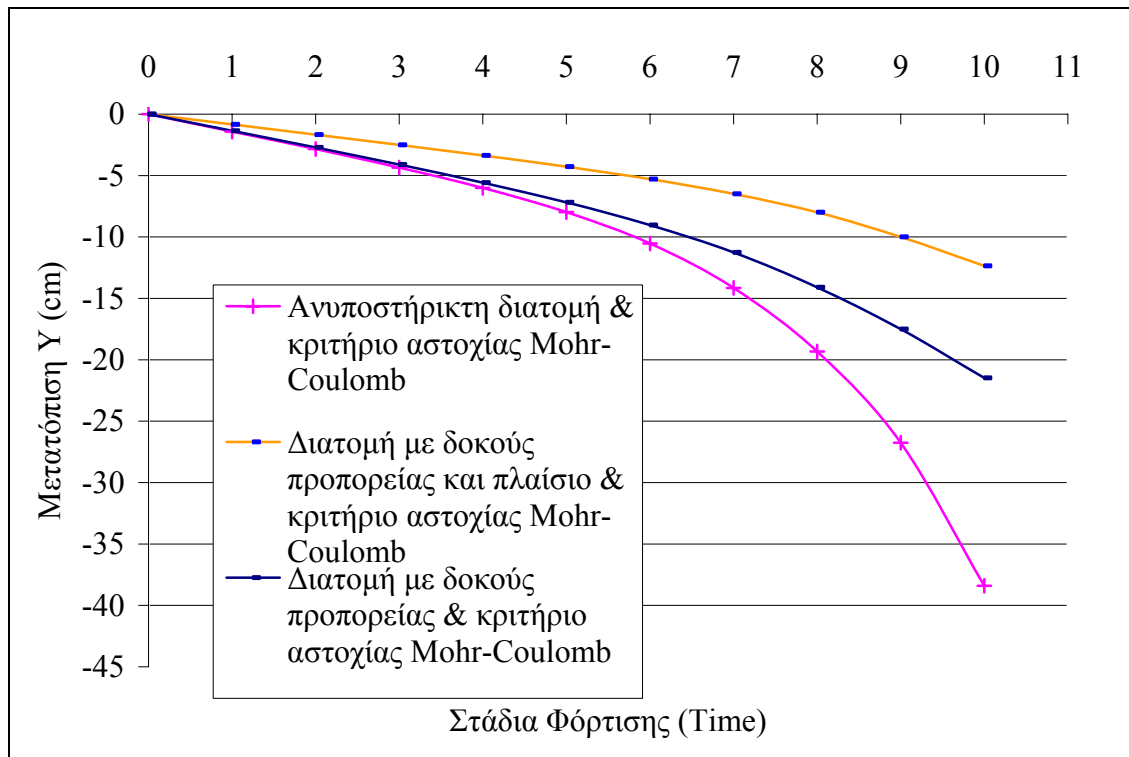
Τα ελαστοπλαστικά μοντέλα κατασκευάστηκαν για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των μοντέλων έξω από την ελαστική περιοχή, στην πλαστική περιοχή. Για αυτό, στο κριτήριο αστοχίας - το οποίο είναι το γραμμικό Mohr – Coulomb - επιλέχθηκε πολύ μικρό σημείο διαρροής (yield stress) ίσο με 0,3 MPa.

Ως ελαστοπλαστικό υλικό, προσομοιώθηκε το πέτρωμα ενώ η υποστήριξη προσομοιώθηκε ως ελαστικό υλικό.

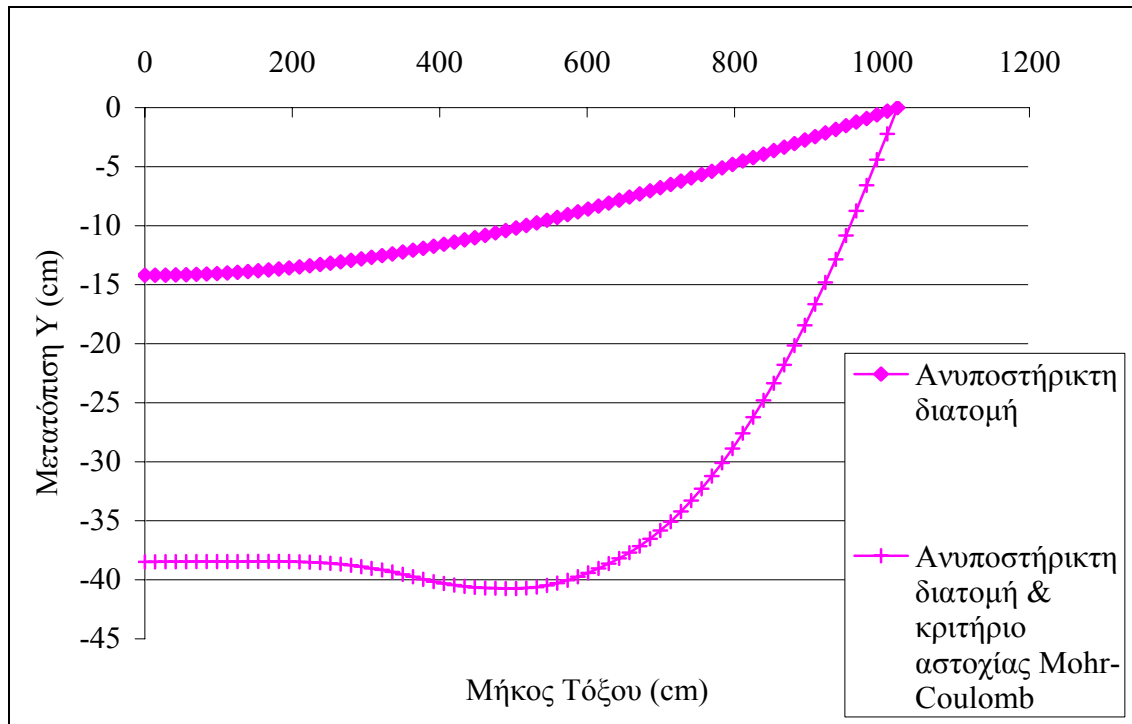
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, φαίνεται η αστοχία του πετρώματος. Παρατηρείται όμως ότι πρώτα αστοχεί το μοντέλο με τη ανυποστήρικτη διατομή, μετά αυτό με τις δοκούς προπορείας και μετά αυτό με τις δοκούς προπορείας και το πλαίσιο. Παρατίθενται επίσης διαγράμματα σύγκρισης με και χωρίς κριτήριο αστοχίας.



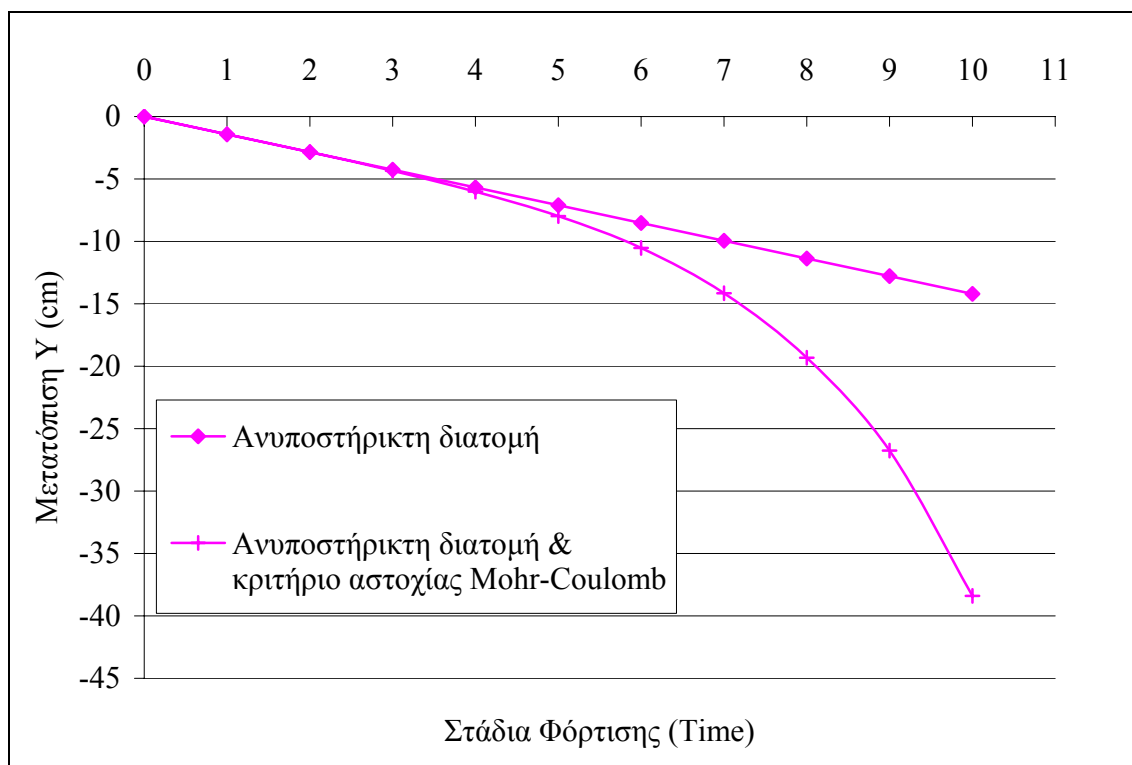
Σχήμα 5.30: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο. Μοντέλα με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb



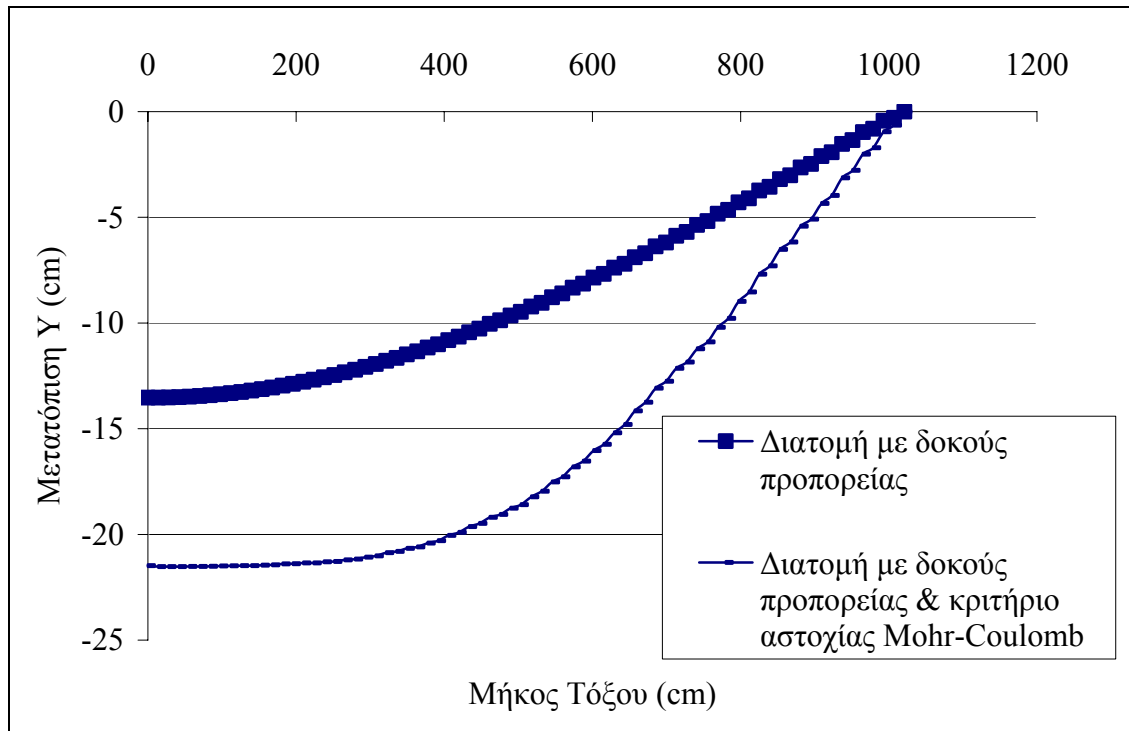
Σχήμα 5.31: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο. Μοντέλα με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb



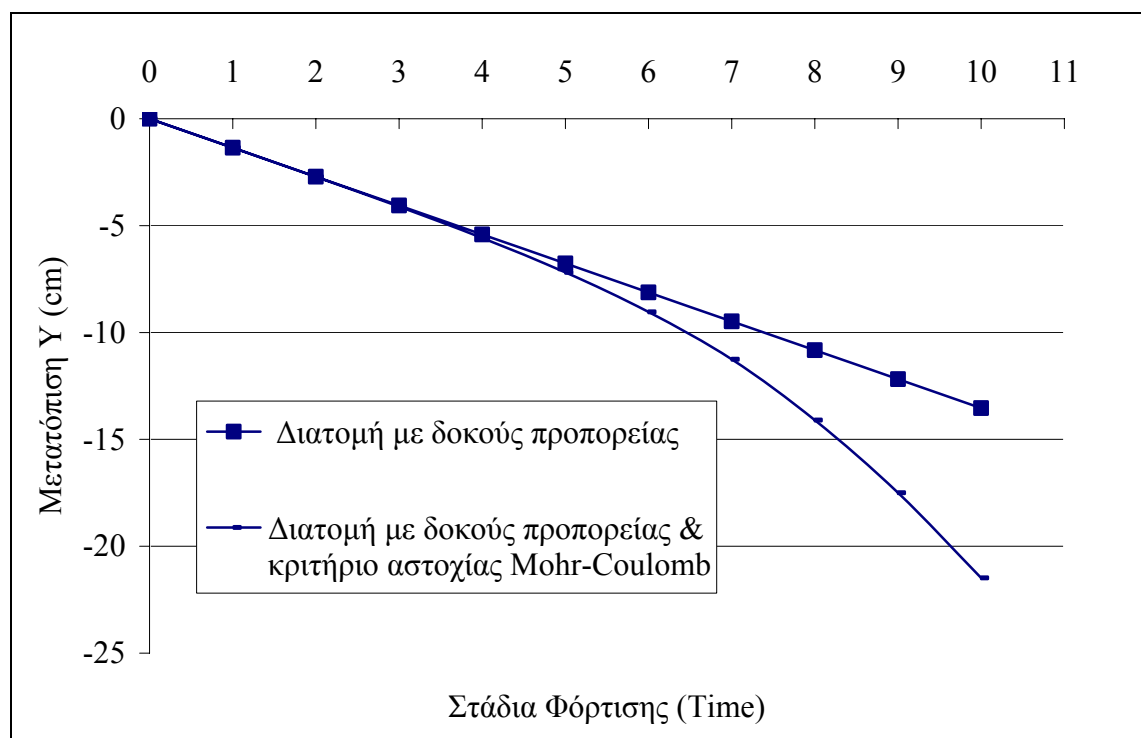
Σχήμα 5.32: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για ανυποστήρικτη διατομή με κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb



Σχήμα 5.33: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για ανυποστήρικτη διατομή με κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb

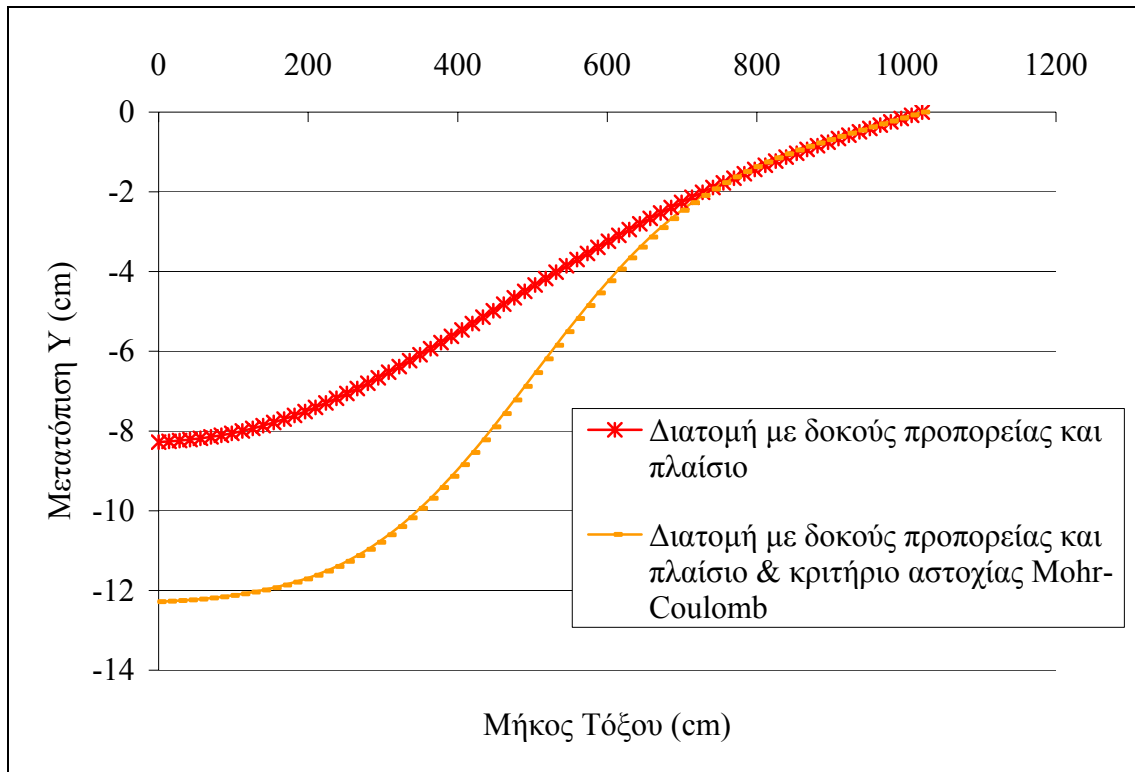


Σχήμα 5.34: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

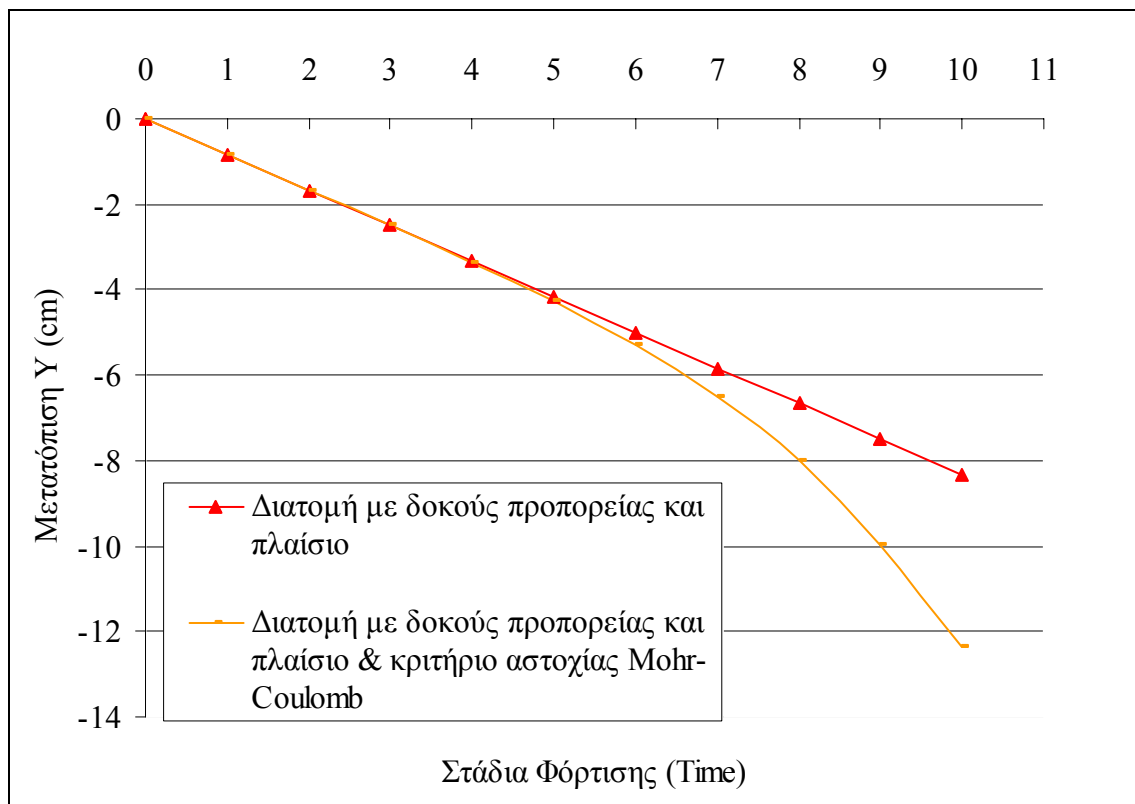


Σχήμα 5.35: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας με κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb





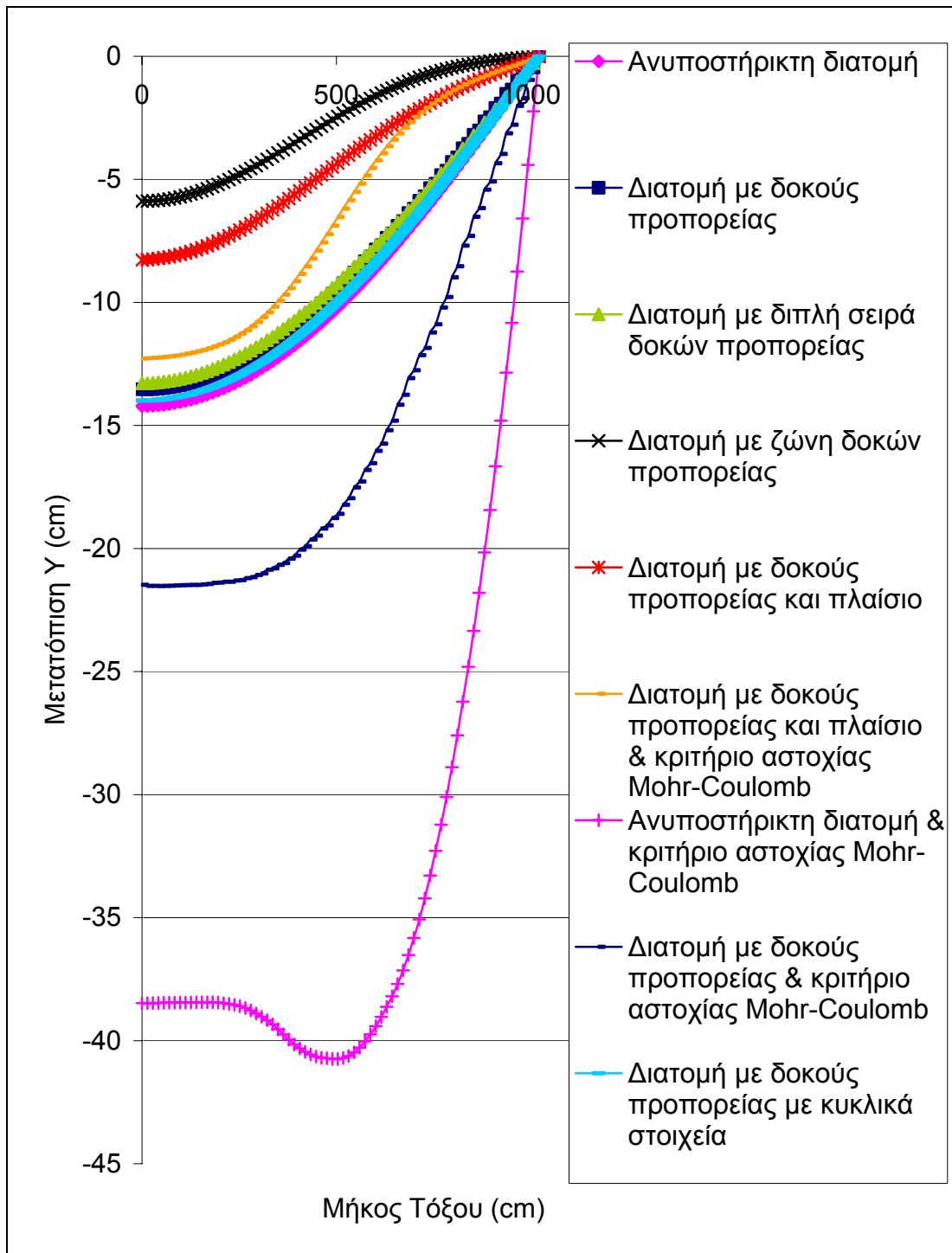
Σχήμα 5.36: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο με κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb



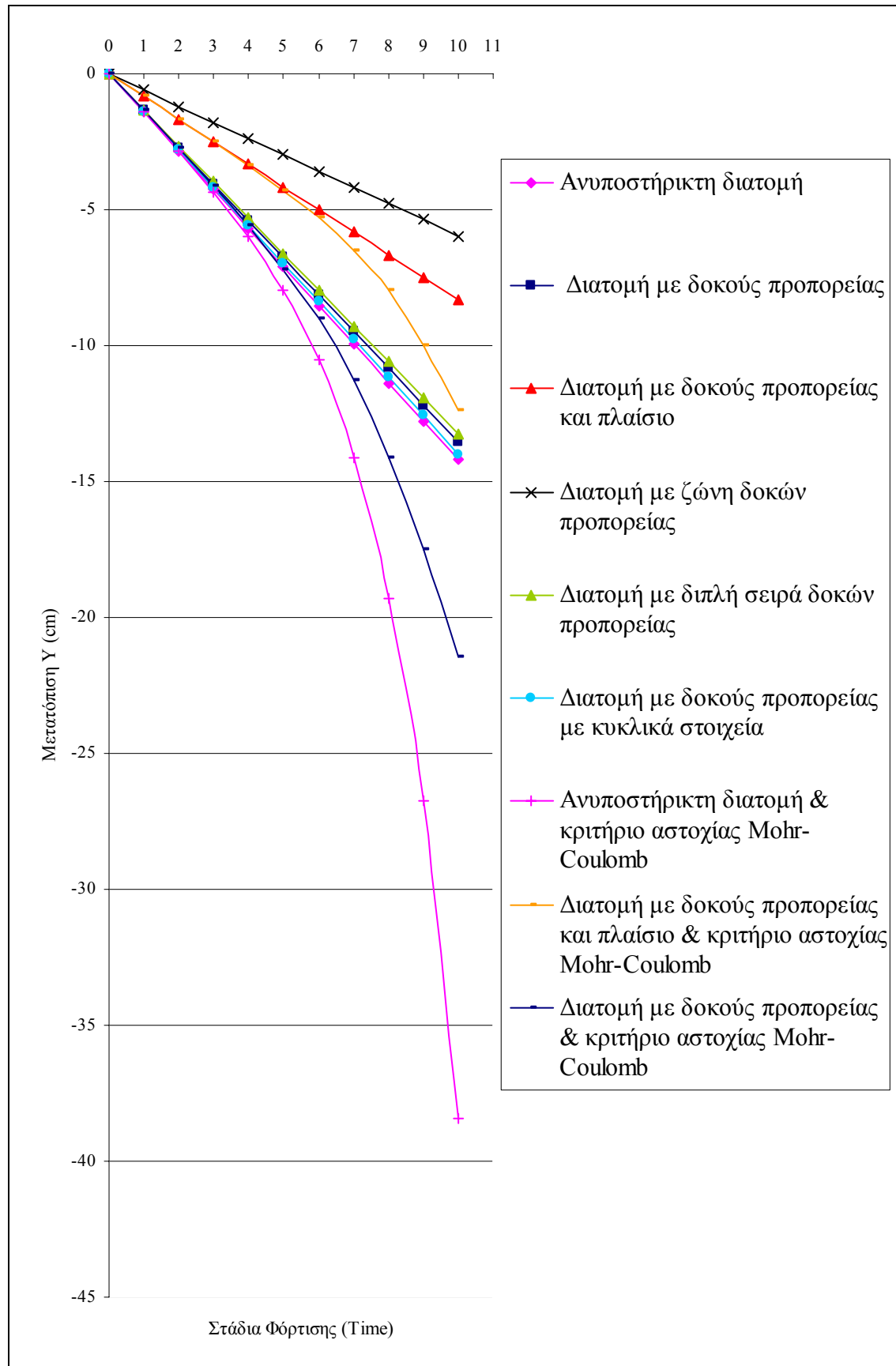
Σχήμα 5.37: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με forepoling και πλαίσιο και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο με κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb

### 5.4 Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται συγκεντρωτικά, όλα τα προηγούμενα διαγράμματα (εκτός από το 5.29), για την καλύτερη παρατήρησή τους από οπτική άποψη.



Σχήμα 5.38: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας



Σχήμα 5.39: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου

## Κεφάλαιο 6

### Τρισδιάστατα Μοντέλα

#### 6.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Για την πληρέστερη παραμετρική διερεύνηση του θέματος, κατασκευάστηκαν τρισδιάστατα μοντέλα, των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, είναι ίδια με των δισδιάστατων με τη διαφορά ότι υπάρχει η τρίτη διάσταση η οποία είναι το βάθος.

Έτσι, το ύψος του μοντέλου είναι 52 μέτρα, το πλάτος του 26 μέτρα, το βάθος του 24 μέτρα, η ακτίνα της σήραγγας που εξορύσσεται είναι 6,5 μέτρα, ενώ το τμήμα του πετρώματος που έχει εξορυχθεί, είναι 4 μέτρα (σχήμα 6.1). Η διακριτοποίηση του μοντέλου φαίνεται στα σχήματα 6.2 και 6.3.

Το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος είναι 150 MPa ενώ των δοκών προπορείας είναι 210 GPa. Ο λόγος Poisson για το πέτρωμα είναι 0,25 ενώ για τις δοκούς προπορείας είναι 0,30.

Όπως και στα δισδιάστατα μοντέλα, η φόρτιση επιβάλλεται σε αυτά σε δέκα στάδια.

Οι συνοριακές συνθήκες που τέθηκαν (σχήμα 6.4) είναι:

- Επιβολή φόρτισης άνω επιφάνειας (edge load) με  $\sigma_v = 1,248 \text{ MPa}$
- Επιβολή πλευρικής φόρτισης (edge load) στην δεξιά πλευρά του μοντέλου, ίσης με  $\sigma_h = 0,416 \text{ MPa}$
- Κύλιση στον άξονα X ( $d_Y = 0$ )
- Κύλιση στον άξονα Y ( $d_X = 0$ )
- Πάκτωση στον άξονα Z ( $d_Z = 0$ ) στους κόμβους της επιφάνειας του μοντέλου στον άξονα - Z (το πίσω μέρος του μοντέλου είναι στον άξονα -Z)

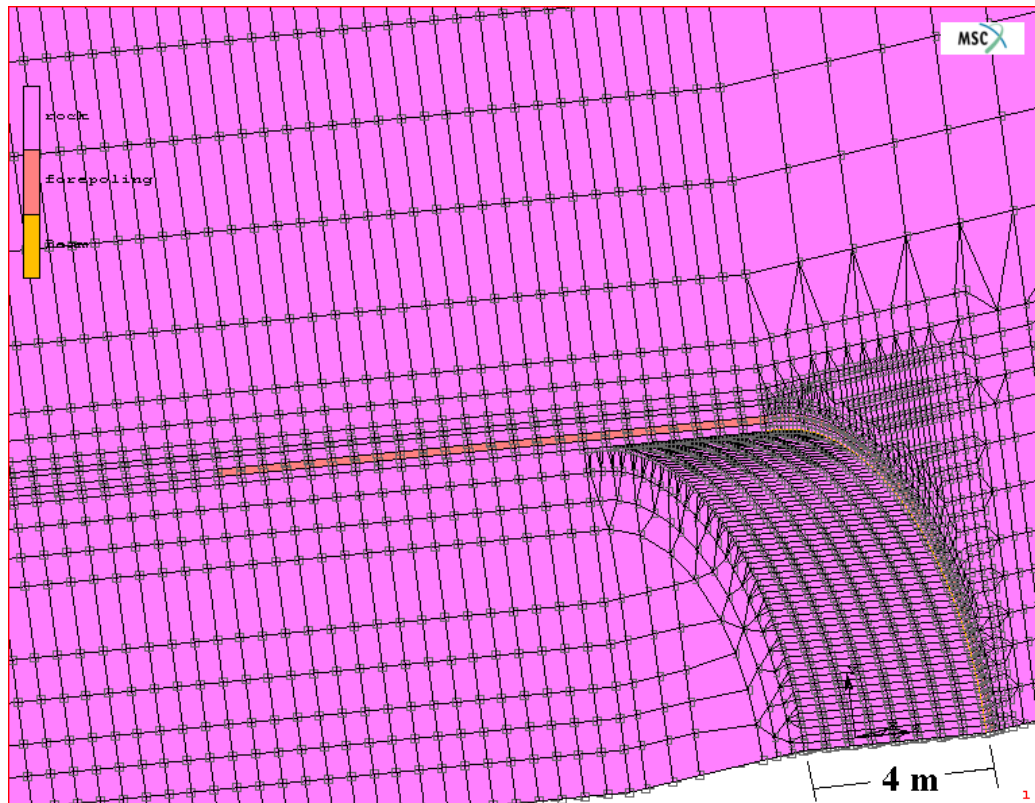
Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα μοντέλα ορίστηκε ένας κόμβος ελέγχου (control node). Ο κόμβος αυτός είναι ακριβώς στο ίδιο σημείο με αυτόν στα δισδιάστατα μοντέλα. Από τον κόμβο αυτό εξάγονται τα αποτελέσματα για να κατασκευαστούν διαγράμματα που δίνουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις στον κόμβο για κάθε στάδιο φόρτισης. Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται διαγράμματα history plot. Ένας άλλος τύπος διαγραμμάτων, που κατασκευάζονται είναι διαγράμματα που

δίνουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις στην περίμετρο της σήραγγας, ξεκινώντας από τη στέψη της. Τα διαγράμματα αυτά ονομάζονται διαγράμματα node path.

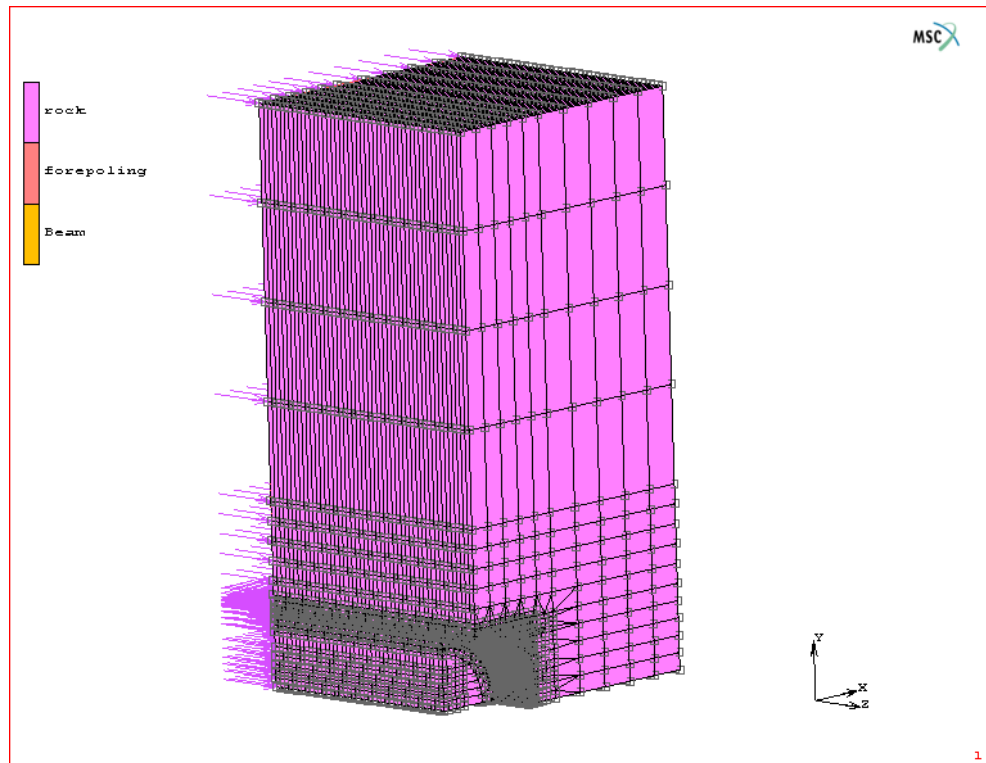
Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιηθήκαν στα μοντέλα.

**Πίνακας 6.1: Αριθμός στοιχείων για κάθε τρισδιάστατο μοντέλο**

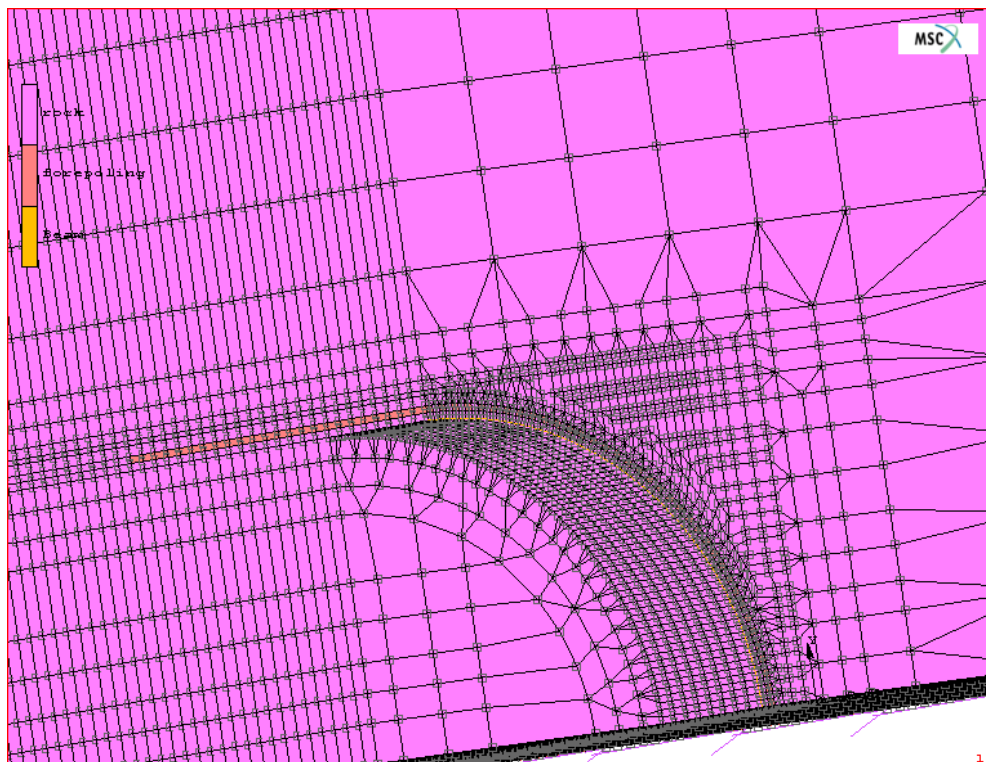
Μοντέλο 3D	Πέτρωμα	Forepoling	Πλαίσιο	Σύνολο
Ανυποστήρικτη διατομή	42568	-	-	42568
Διατομή με δοκούς προπορείας	41680	888	-	42568
Διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο	41680	888	73	42641



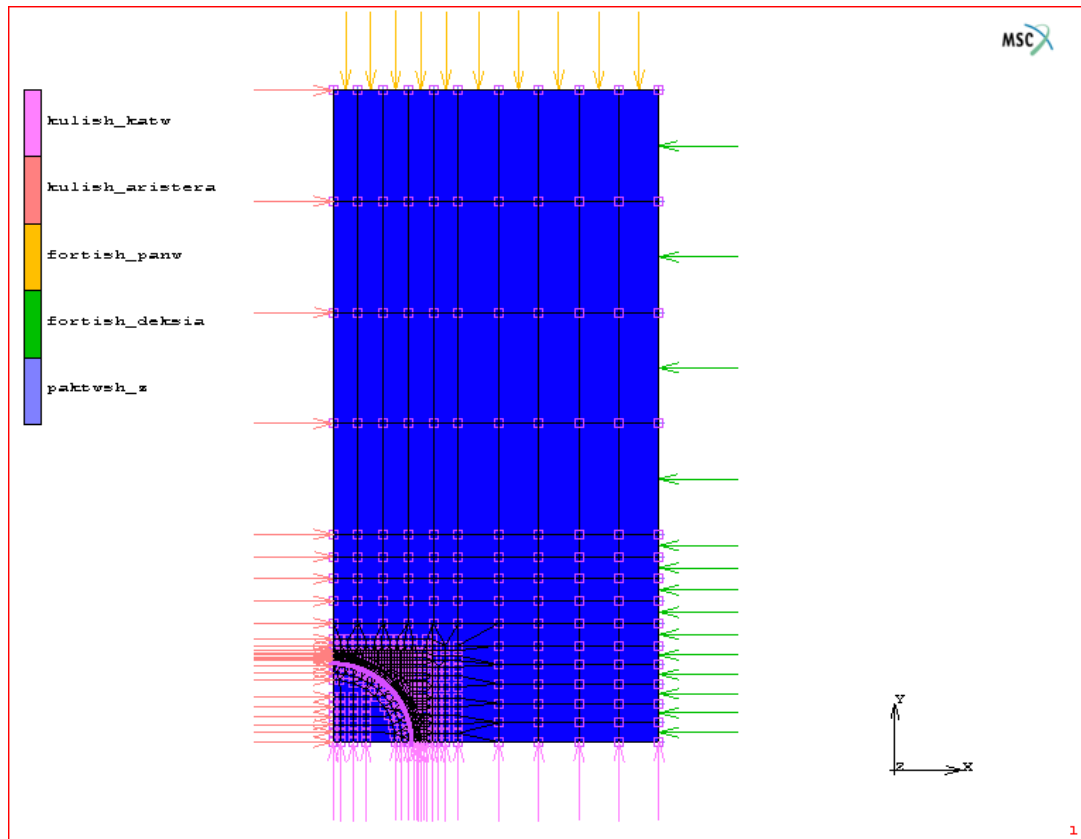
**Σχήμα 6.1: Τμήμα εξορυγμένου πετρώματος**



Σχήμα 6.2: Συνολική διακριτοποίηση



Σχήμα 6.3: Τμήμα διακριτοποίησης

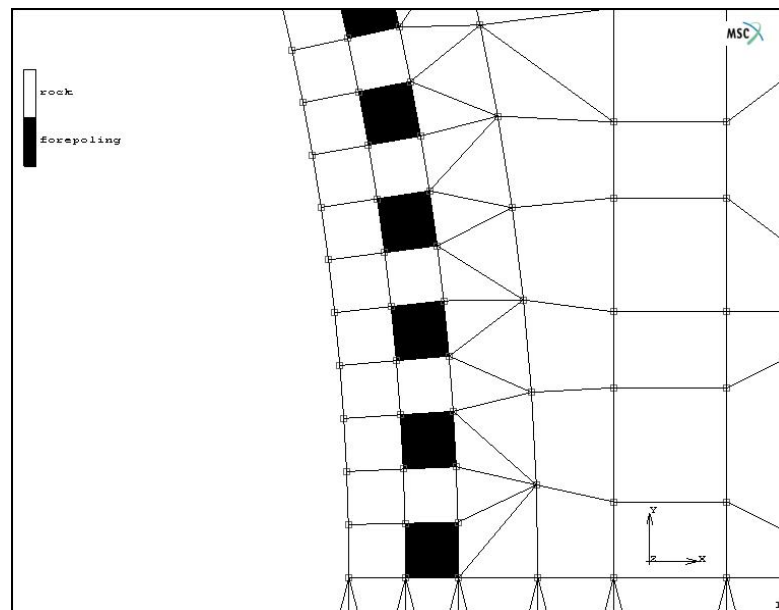


Σχήμα 6.4: Συνοριακές συνθήκες τρισδιάστατου μοντέλου

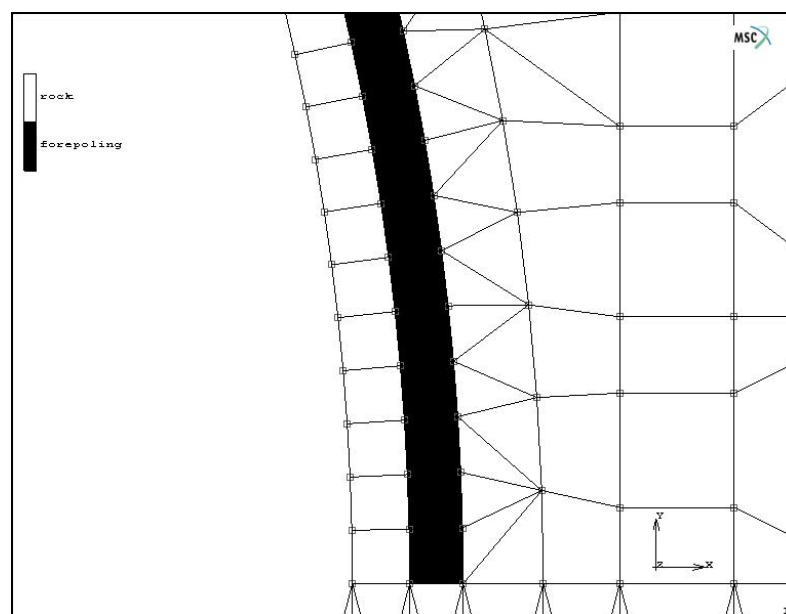
## 6.2 Ελαστικά Μοντέλα

### 6.2.1 Κύρια μοντέλα

Τα κύρια ελαστικά μοντέλα που επιλύονται είναι η διατομή με δοκούς προπορείας (σχήμα 6.5), η διατομή με ζώνη δοκών προπορείας (σχήμα 6.6) και η ανυποστήρικτη διατομή που συνίσταται φυσικά μόνο από πέτρωμα. Τα στοιχεία των δοκών προπορείας είναι τρισδιάστατα τετραγωνικής διατομής με μήκος πλευράς 14 cm και βάθος 50 cm. Η κάθε δοκός προπορείας όμως είναι 1200 cm ή 12 m.

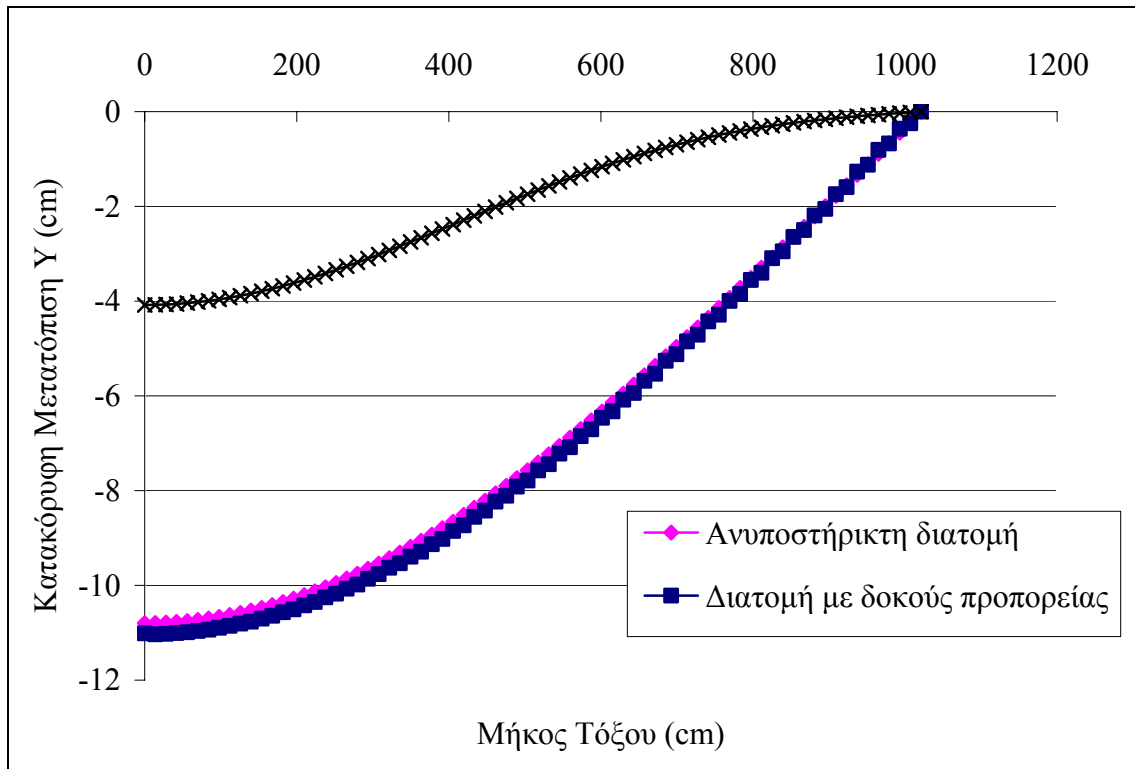


Σχήμα 6.5: Διατομή με δοκούς προπορείας

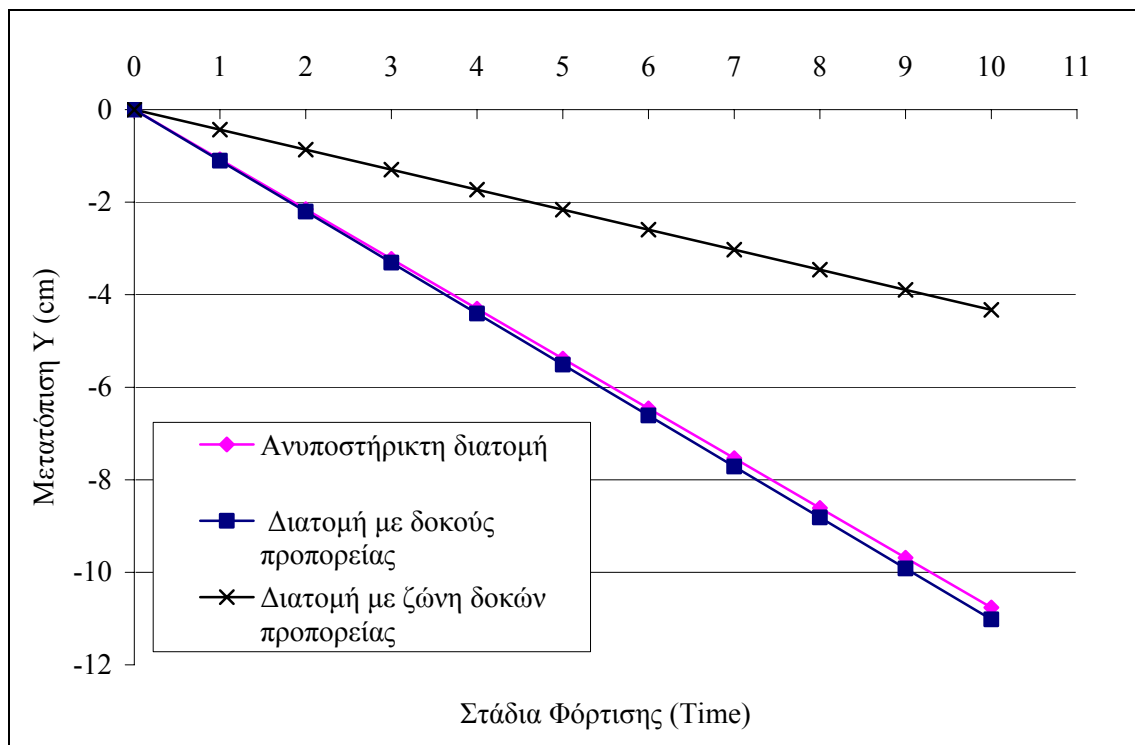


Σχήμα 6.6: Διατομή με ζώνη δοκών προπορείας





Σχήμα 6.7 : Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας



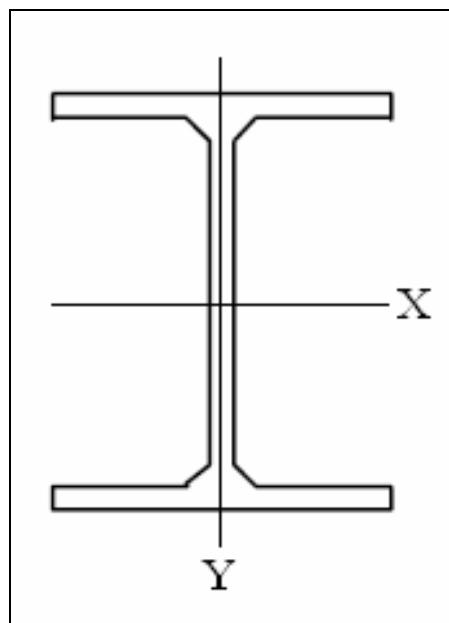
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας

Στο σχήμα 6.7, παρατηρείται ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στην περίμετρο της σήραγγας είναι πολύ μικρότερες για τη διατομή με ζώνη δοκών προπορείας σε σχέση με την ανυποστήρικτη διατομή και την διατομή με δοκούς προπορείας. Επίσης η καμπύλη της ζώνης παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από αυτές των άλλων δυο.

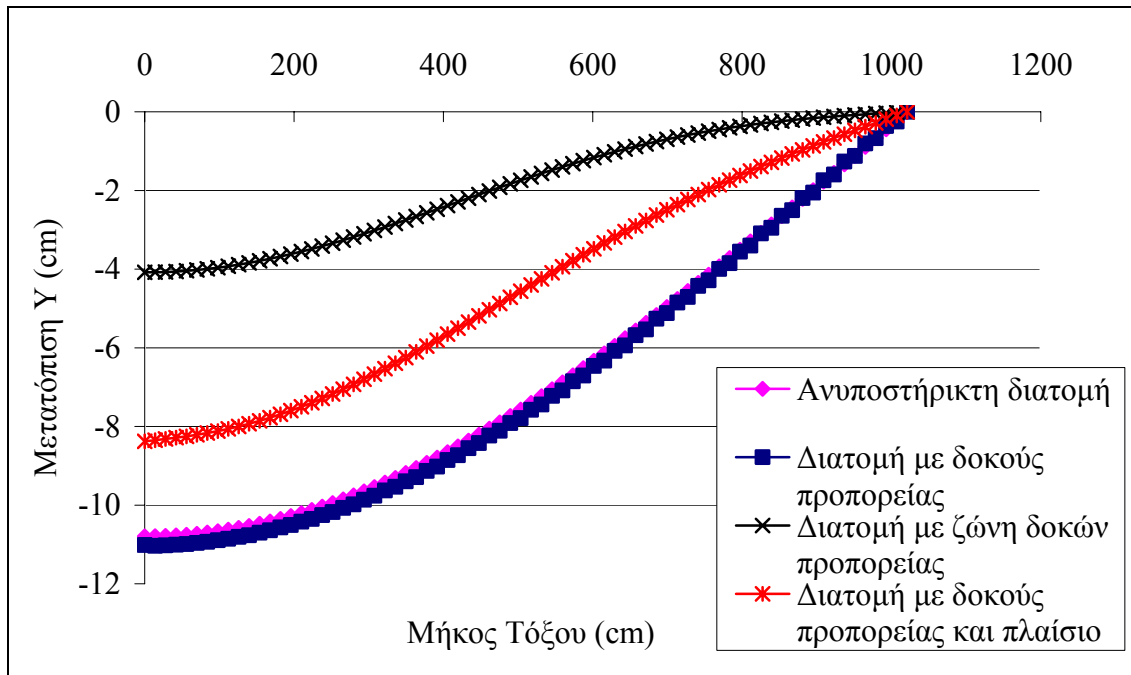
Παρατηρείται ακόμη ότι πρακτικά το μοντέλο της ανυποστήρικτης διατομής δίνει τα ίδια αποτελέσματα με αυτό του μοντέλου της διατομής με τις δοκούς προπορείας. Έτσι απαιτείται η κατασκευή μοντέλου διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο. Ανάλογο φαινόμενο με το προηγούμενο παρατηρείται και στο σχήμα 6.8. Εδώ η συμπεριφορά των καμπύλων είναι και στις τρεις περιπτώσεις ίδια και γραμμική αφού το μοντέλο είναι ελαστικό.

### 6.2.2 Μοντέλο δοκών προπορείας με χαλύβδινο πλαίσιο

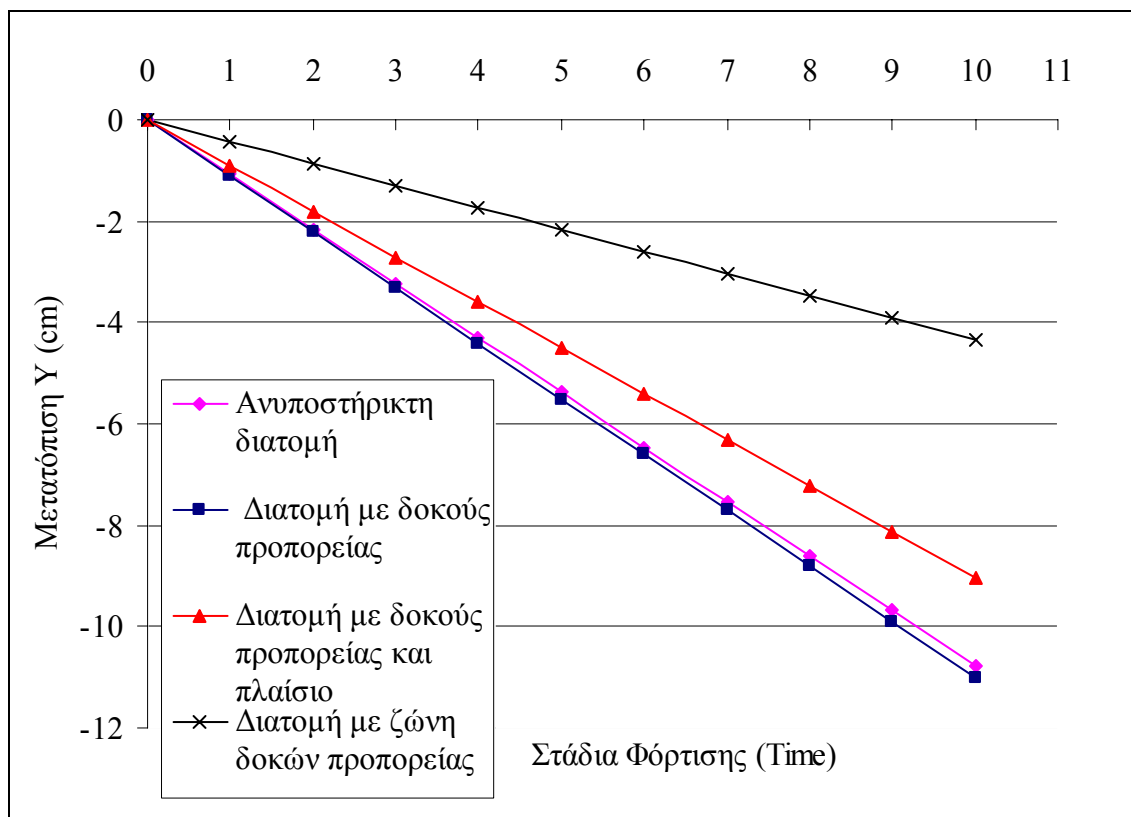
Το χαλύβδινο πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου HEB 180. έχει ύψος 18 cm, εμβαδόν διατομής  $65,25 \text{ cm}^2$ , μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και λόγο Poisson 0,30. Το χαλύβδινο πλαίσιο προσομοιώθηκε με γραμμικά (μονοδιάστατα) στοιχεία beam elements. Για την προσομοίωση χρειάστηκε να δοθούν οι ροπές αδράνειας  $I_X$  και  $I_Y$  του πλαισίου στον τοπικό άξονα X και στον τοπικό άξονα Y αντίστοιχα της διατομής του (σχήμα 6.9). Για τις ροπές αδράνειας ισχύει  $I_X = 3831.1 \text{ cm}^4$  και  $I_Y = 1362.8 \text{ cm}^4$ .



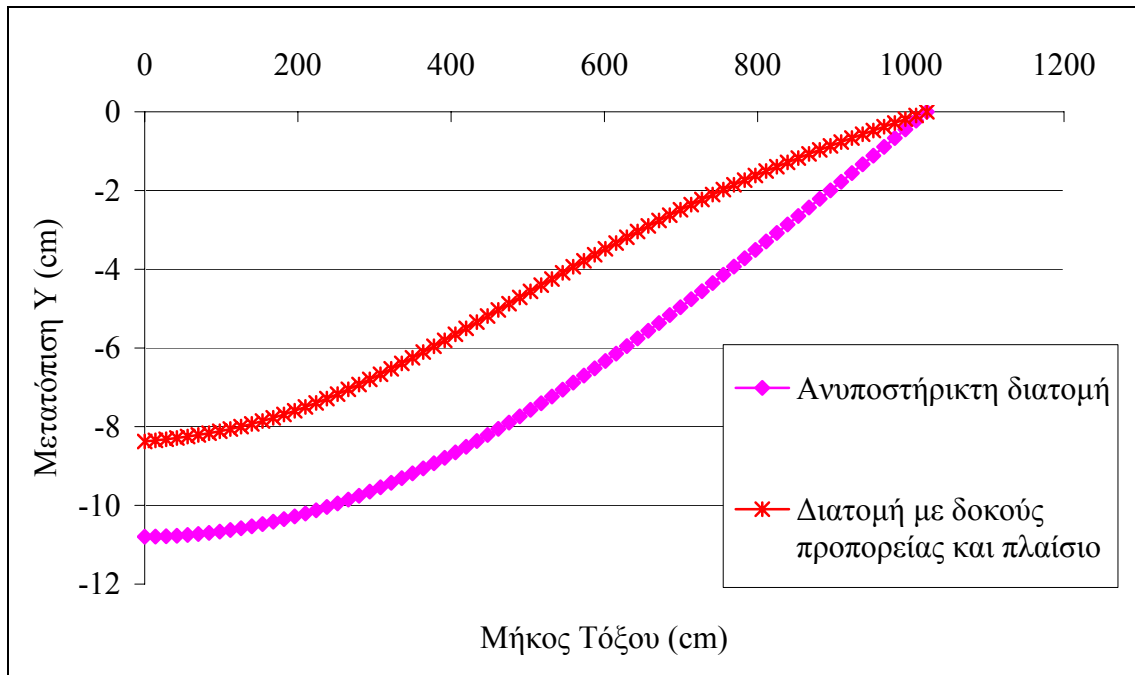
Σχήμα 6.9: Τοπικοί άξονες διατομής πλαισίου (Csébfalvi, 2005)



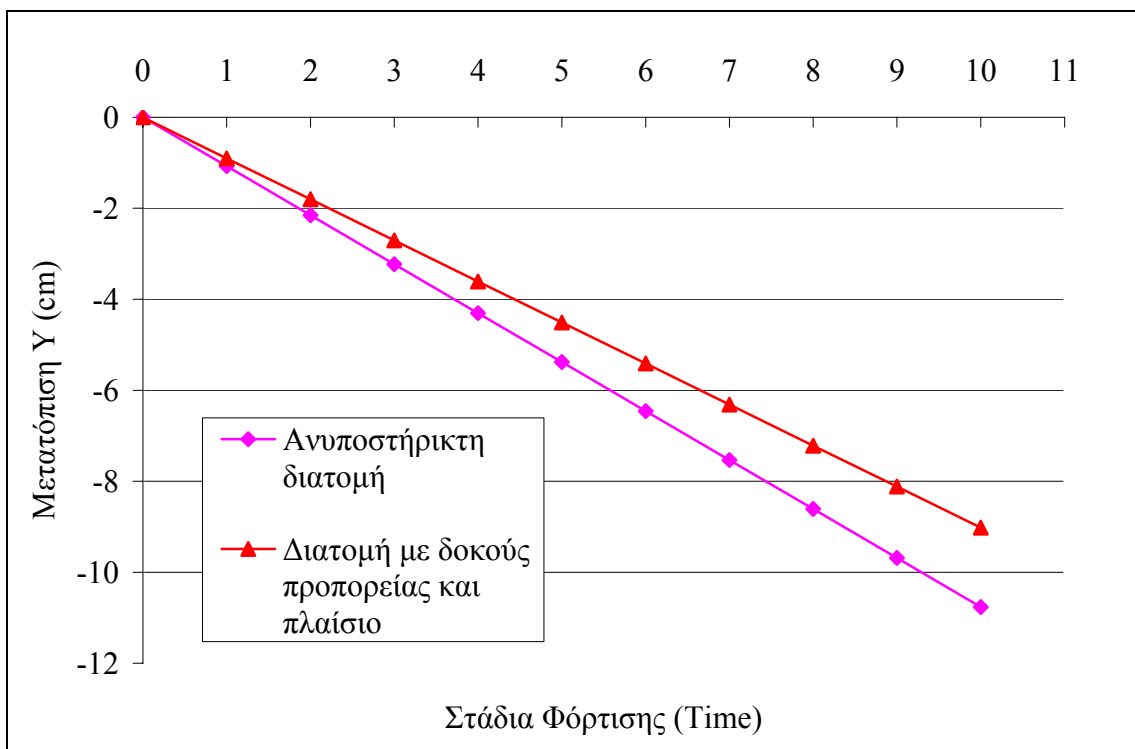
Σχήμα 6.10: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



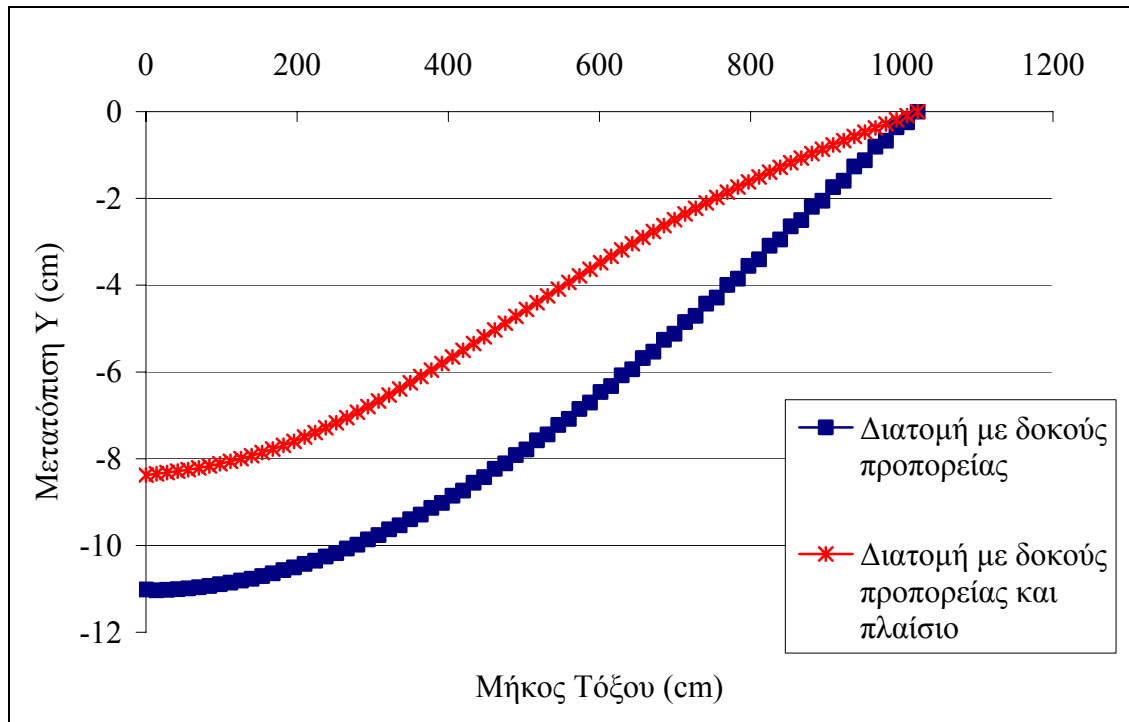
Σχήμα 6.11: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή, διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



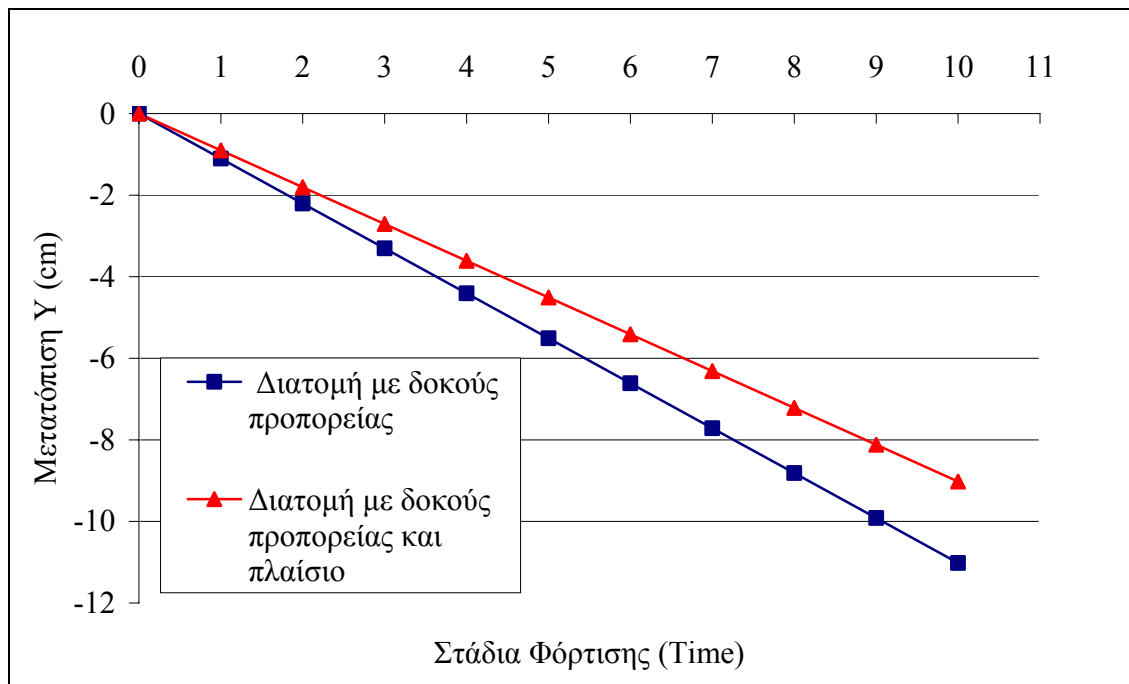
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



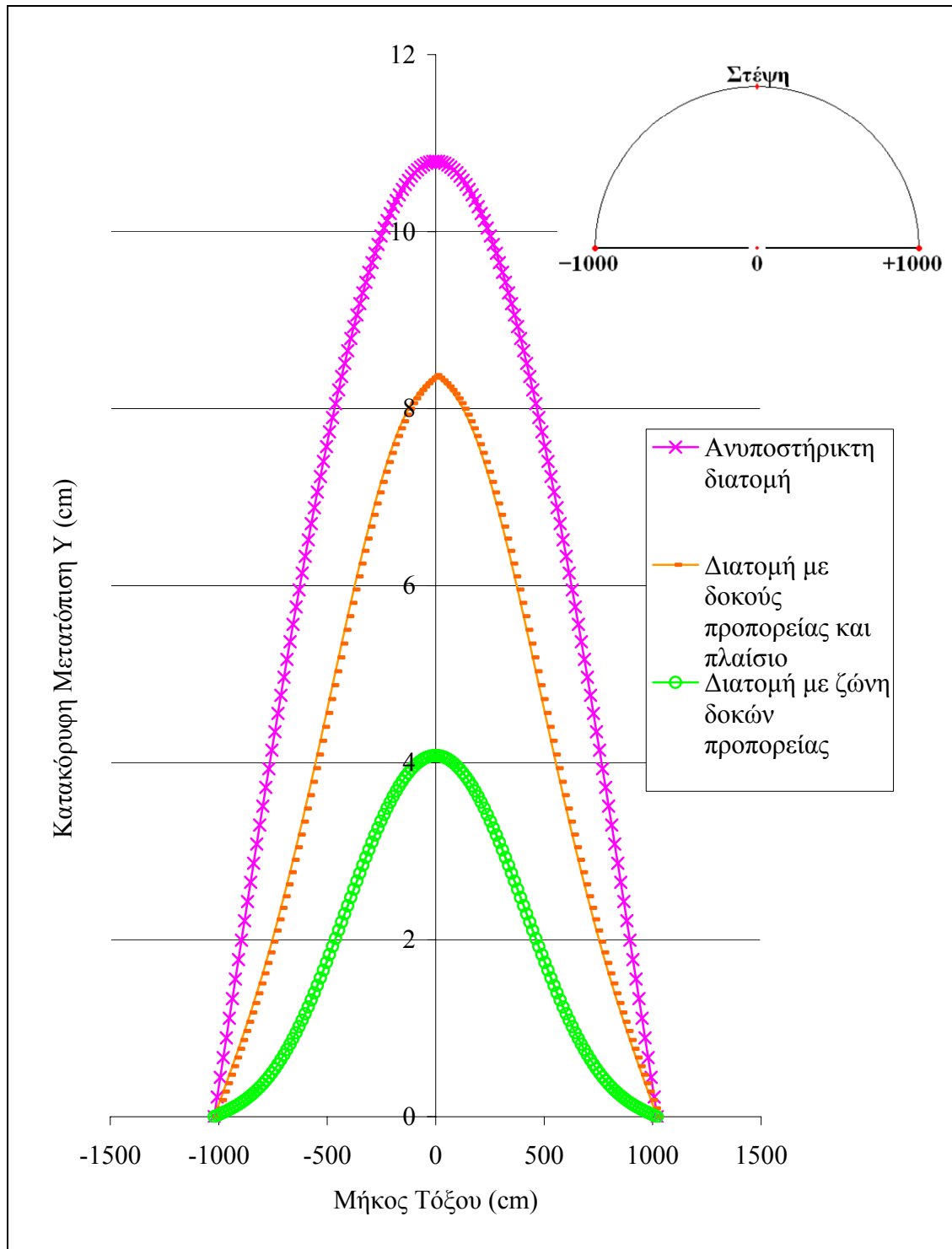
Σχήμα 6.13: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για ανυποστήρικτη διατομή και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με forepoling και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



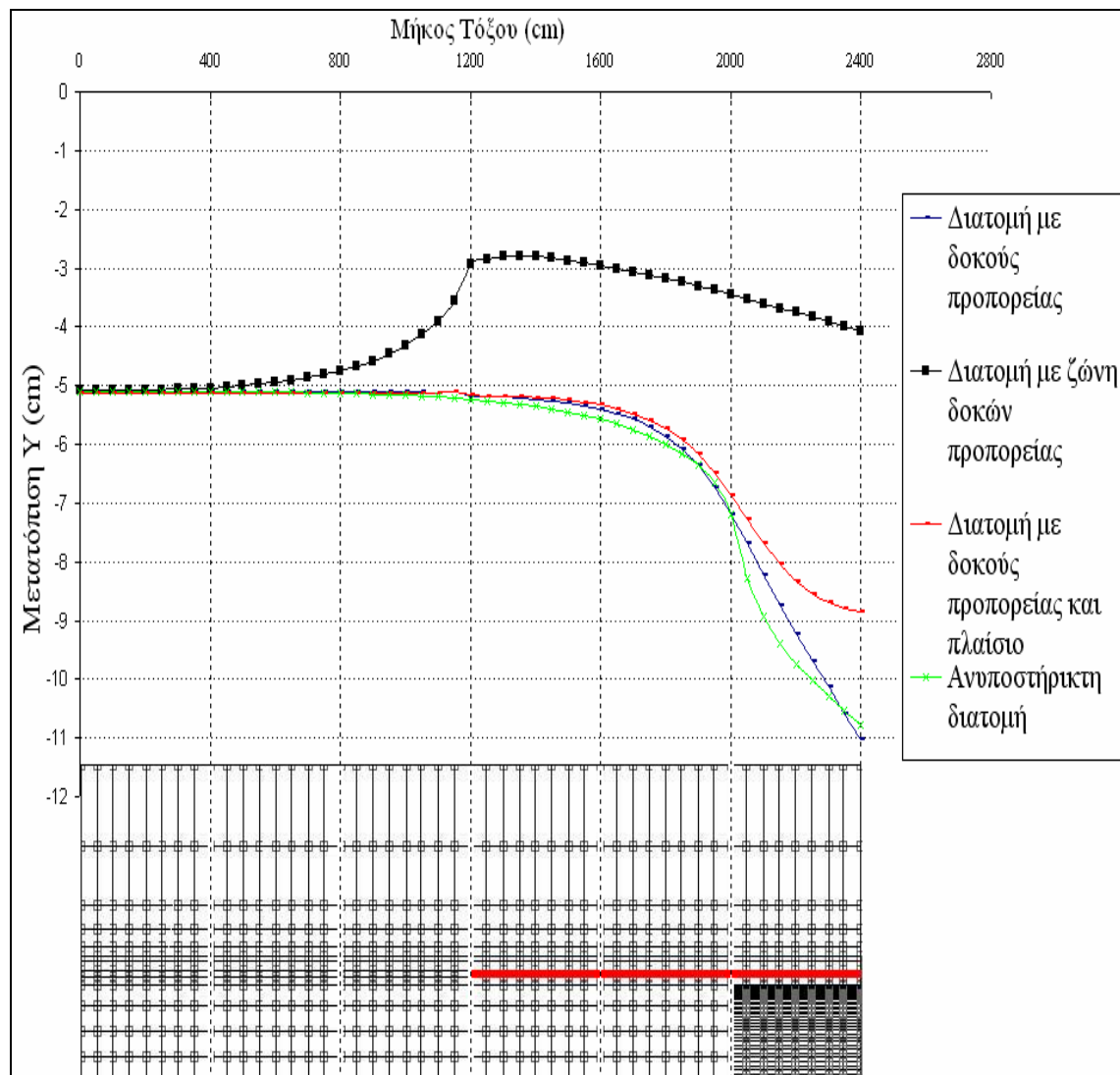
Σχήμα 6.15: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου για διατομή με δοκούς προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο



Σχήμα 6.16: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην συνολική περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 6.10 έως 6.15, η διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο, παρουσιάζει αρκετά καλύτερη συμπεριφορά από τη διατομή με δοκούς προπορείας και την ανυποστήρικτη διατομή. Επίσης το τρισδιάστατο μοντέλο, φαίνεται να αντανακλά καλύτερα την πραγματικότητα αφού όπως φαίνεται και στο

σχήμα 6.16 (του οποίου η κατασκευή είναι όμοια με αυτή του σχήματος 5.29 και περιγράφεται στη σελ. 64) οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μειώνονται κατά περίπου 20% με την εφαρμογή του συστήματος υποστήριξης των δοκών προπορείας με χαλύβδινο πλαίσιο ενώ στο δισδιάστατο μοντέλο οι αντίστοιχες μετατοπίσεις, μειώνονται σχεδόν 40%.

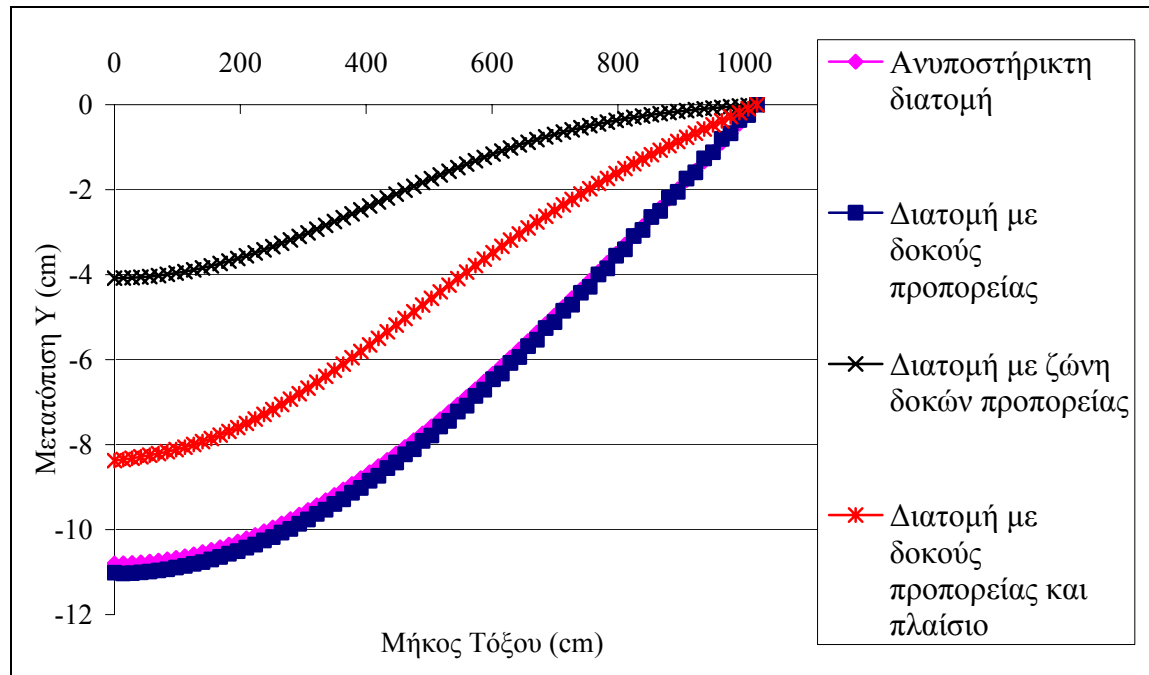


**Σχήμα 6.17:** Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος της σήραγγας για ανευποστήρικτη διατομή, για διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και για διατομή με δοκούς προπορείας και πλαίσιο

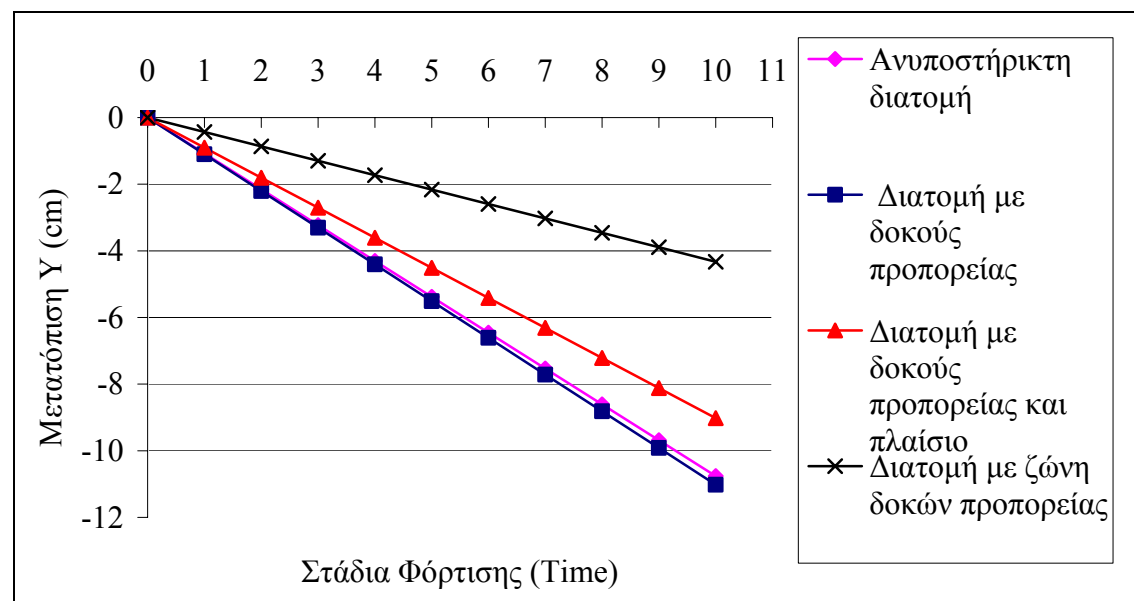
Στο σχήμα 6.17 φαίνεται η μηκοτομή της σήραγγας. Με κόκκινο χρώμα αναπαρίστανται οι δοκοί προπορείας οι οποίοι έχουν μήκος 12 m και μένουν και άλλα 12 m μέχρι το τέλος του μοντέλου στον άξονα (-Z). Στη σήραγγα όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, έχουν ορυχθεί κατά 4 m. Παρατηρείται ότι το πλαίσιο δρα καταλυτικά στη λειτουργία του συστήματος προπασσάλωσης οροφής.

### 6.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται συγκεντρωτικά, όλα τα προηγούμενα διαγράμματα (εκτός των 6.16 και 6.17), για την καλύτερη παρατήρησή τους από οπτική άποψη.



Σχήμα 6.18: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας



Σχήμα 6.19: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου

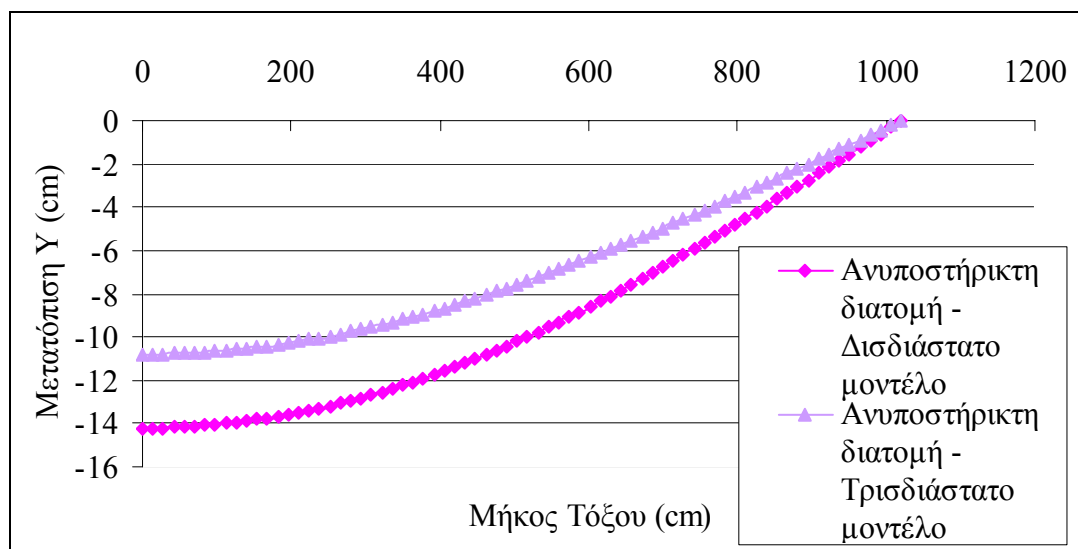


## Κεφάλαιο 7

### Σύγκριση Δισδιάστατων – Τρισδιάστατων Μοντέλων

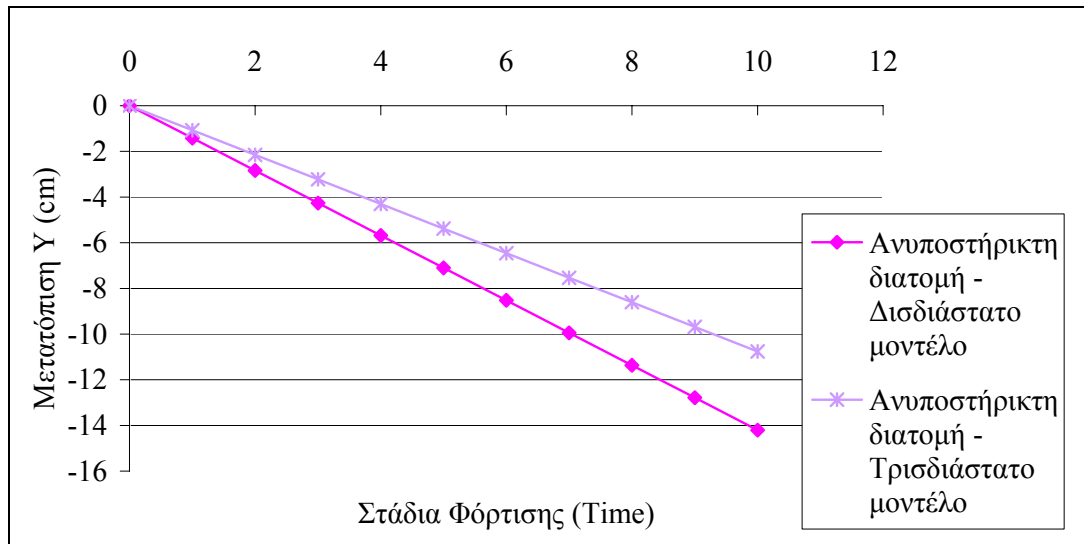
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από την ανάλυση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων. Η σύγκριση γίνεται μέσω διαγραμμάτων για μοντέλα των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι πανομοιότυπα εκτός από ένα την τρίτη διάσταση. Έτσι θα γίνει σύγκριση για τα μοντέλα με ανυποστήρικτη διατομή, για τα μοντέλα διατομής με δοκούς προπορείας, για τα μοντέλα διατομής με ζώνη δοκών προπορείας και για τα μοντέλα διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο.

#### 7.1 Μοντέλο ανυποστήρικτης διατομής



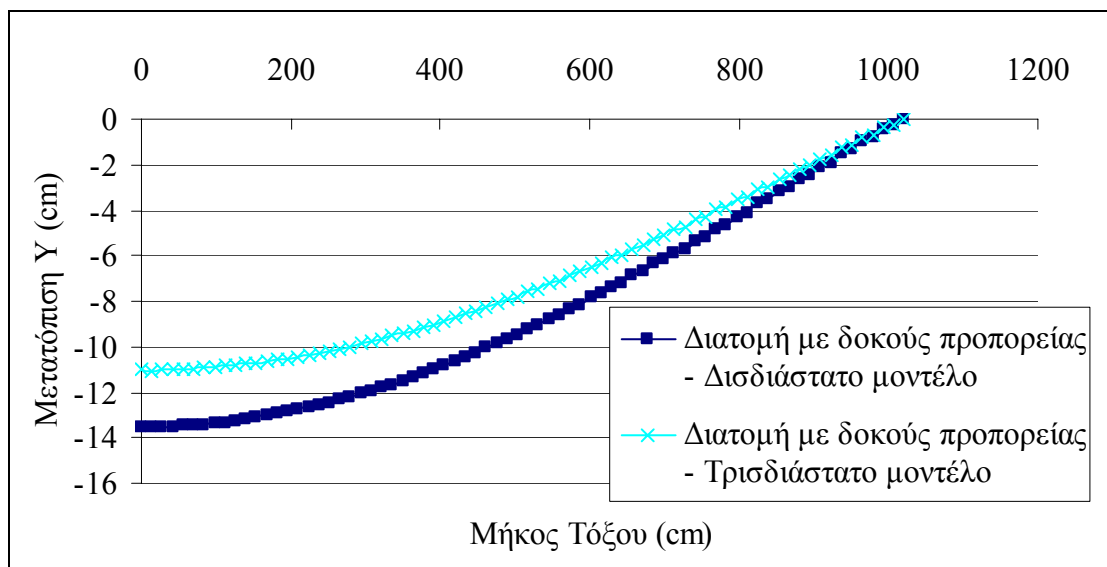
**Σχήμα 7.1:** Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

Στα μοντέλα της ανυποστήρικτης διατομής, παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο δισδιάστατο μοντέλο από το τρισδιάστατο (σχήματα 7.1 και 7.2).



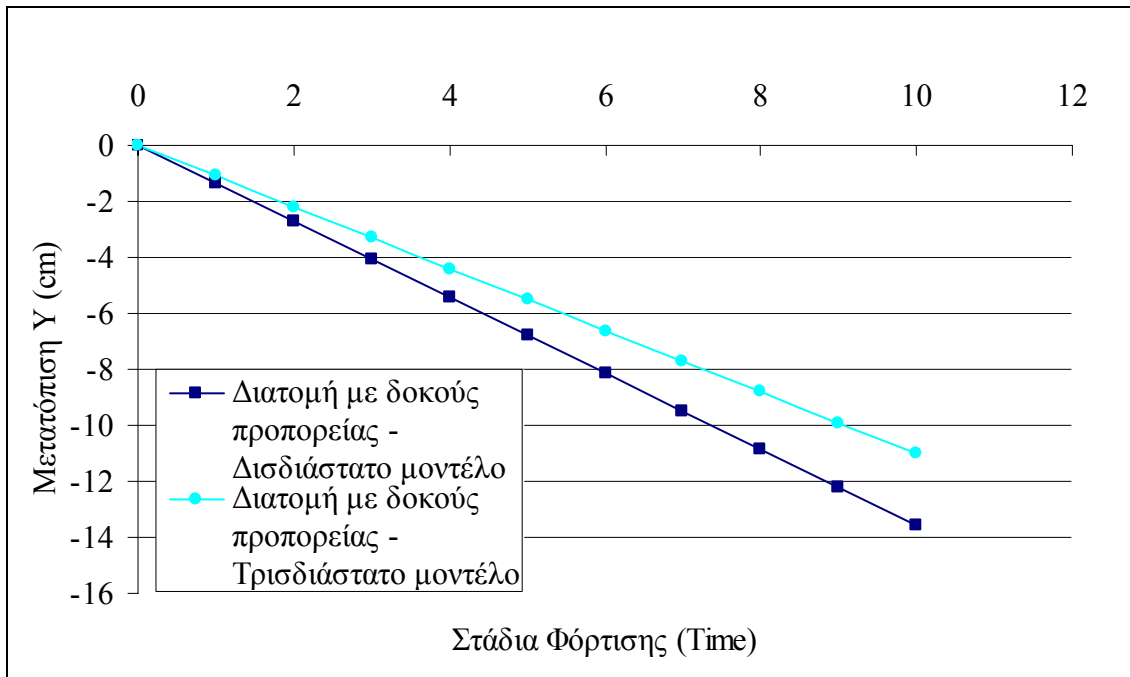
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για ανυποστήρικτη διατομή σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

## 7.2 Μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας



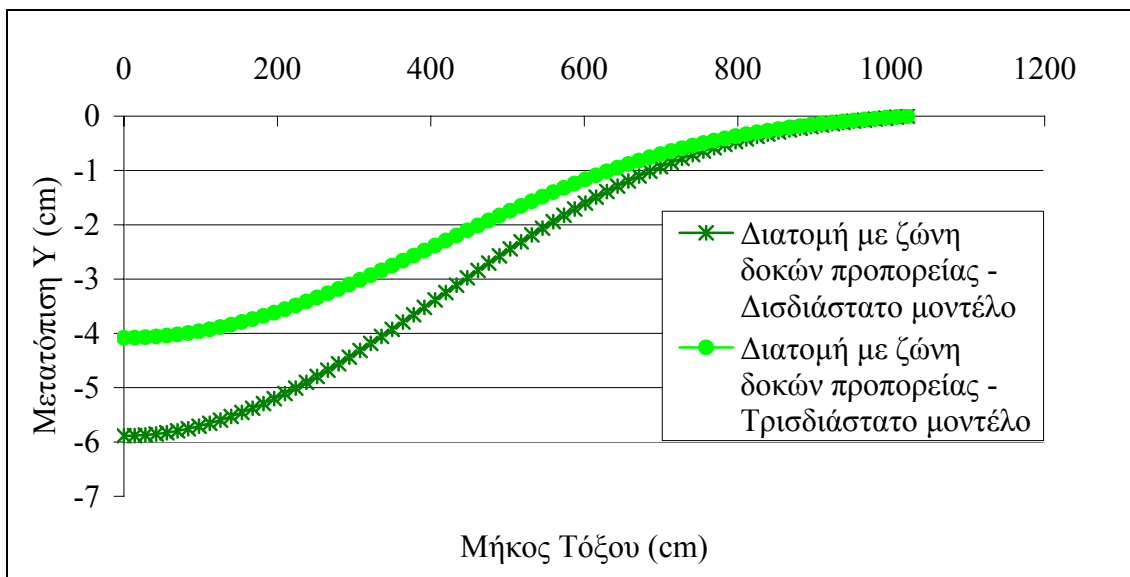
Σχήμα 7.3: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

Όπως και στα μοντέλα της ανυποστήρικτης διατομής, έτσι και στα μοντέλα της διατομής με δοκούς προπορείας, παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο δισδιάστατο μοντέλο από το τρισδιάστατο (σχήματα 7.3 και 7.4).



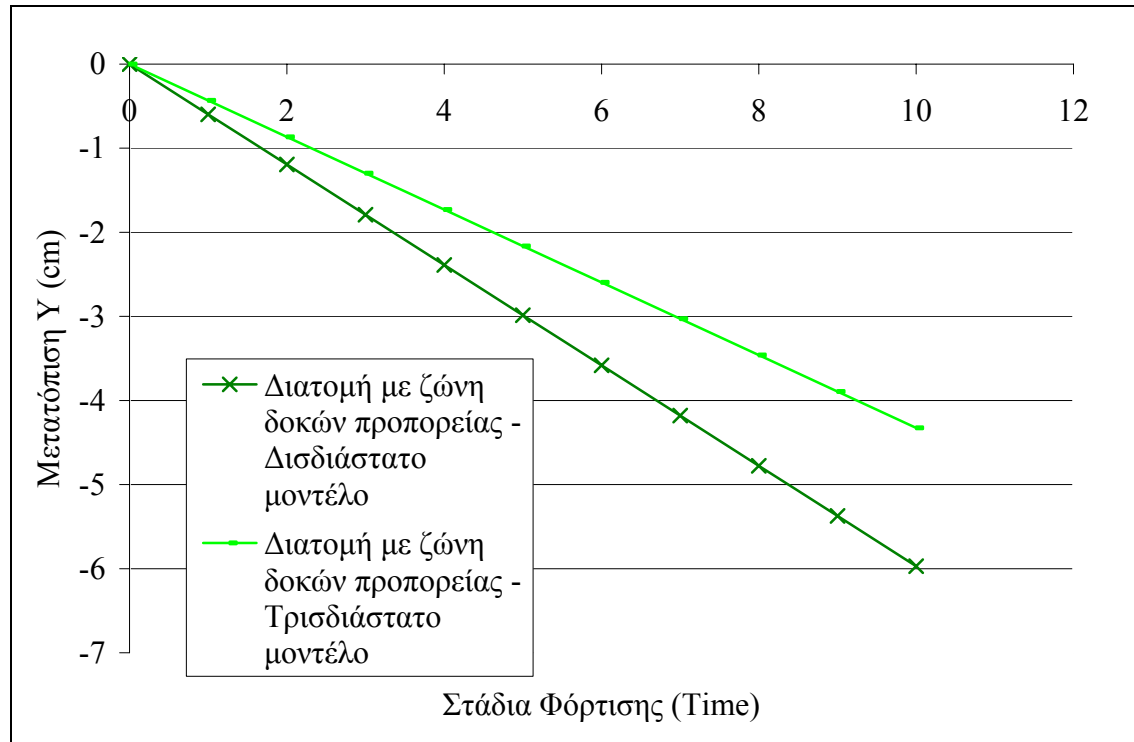
Σχήμα 7.4: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

### 7.3 Μοντέλο διατομής με ζώνη δοκών προπορείας



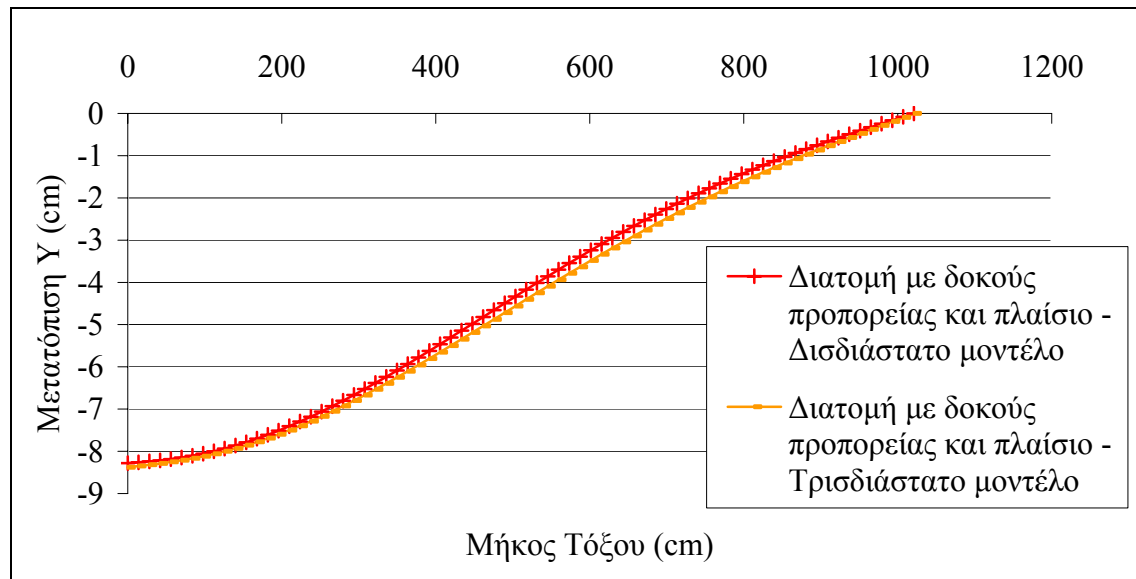
Σχήμα 7.5: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

Ομοίως με τα μοντέλα της ανυποστήρικτης διατομής και με τα μοντέλα της διατομής με δοκούς προπορείας, έτσι και στα μοντέλα της διατομής με ζώνη δοκών προπορείας παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις στο δισδιάστατο μοντέλο από το τρισδιάστατο (σχήματα 7.5 και 7.6).

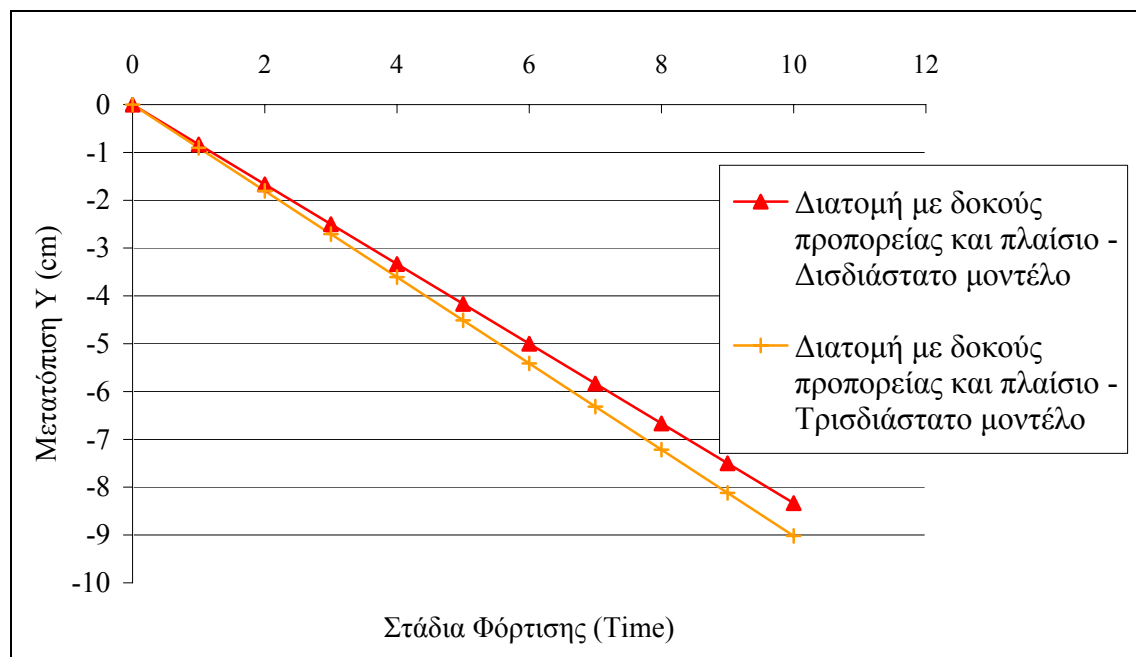


**Σχήμα 7.6:** Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

## 7.4 Μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο



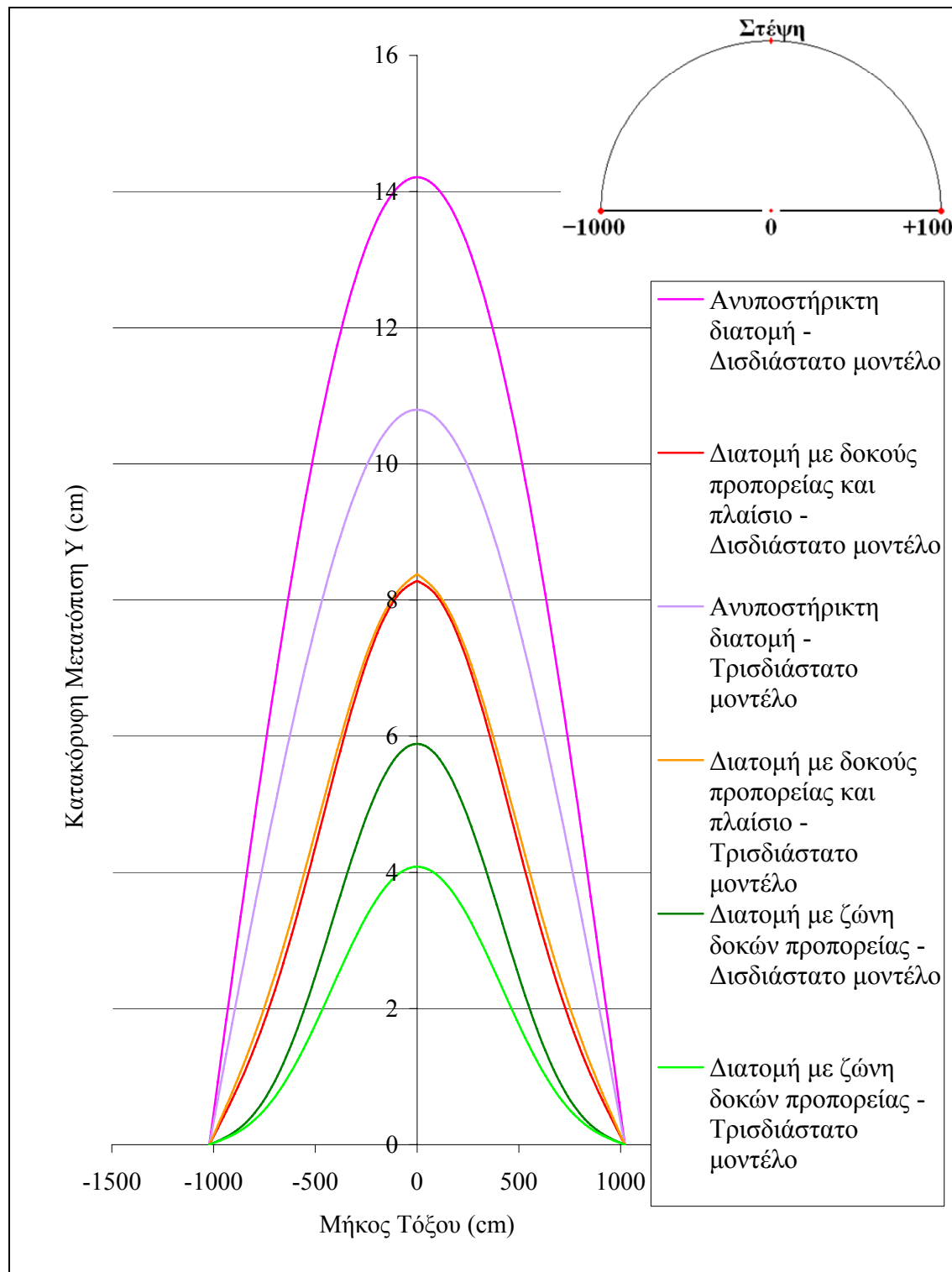
Σχήμα 7.7: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στον κόμβο ελέγχου της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

Εν αντιθέσει με τα προηγούμενα μοντέλα, στο μοντέλο διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι σχεδόν ίδιες με ελάχιστη απόκλιση μεταξύ των τιμών τους. Αυτό φαίνεται πολύ καθαρά στο σχήμα 7.7.

## 7.5 Χαρακτηριστικά διαγράμματα



Σχήμα 7.9: Συνολικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης στην περίμετρο της σήραγγας για διατομή με δοκούς προπορείας, για διατομή με ζώνη δοκών προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο

Το σχήμα 7.9 (του οποίου η κατασκευή είναι όμοια με αυτή του σχήματος 5.29 και περιγράφεται στη σελ. 64) δείχνει ότι ενώ στα μοντέλα της ανυποστήρικτης διατομής και στα μοντέλα της διατομής με ζώνη δοκών προπορείας παρατηρούνται μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις στο δισδιάστατο μοντέλο από ότι στο τρισδιάστατο μοντέλο, στα μοντέλα διατομής με δοκούς προπορείας και χαλύβδινο πλαίσιο, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι σχεδόν ίδιες με απειροελάχιστη απόκλιση μεταξύ των τιμών τους.

## Κεφάλαιο 8

### Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής ενώ δόθηκε ιδιαίτερο βάρος στην μέθοδο προπασσάλωσης οροφής με χαλύβδινες δοκούς προπορείας.

Η μέθοδος αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα αφού χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε γεωμετρία διατομής σήραγγας, σε μεγάλη ποικιλία εδαφών και είναι πρακτικά ανεξάρτητη της ποιότητας της βραχώμαζας. Παρατηρείται μείωση των καθιζήσεων στην επιφάνεια, μόνιμη μείωση των μετατοπίσεων γύρω από την εκσκαφή αλλά και αύξηση της σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής και των παρειών της σήραγγας.

Η μέθοδος προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας είναι πολύ ευέλικτη αφού επιτρέπει την χρησιμοποίηση και άλλων μέτρων υποστήριξης σε συνδυασμό με αυτή.

Ακόμα η μέθοδος αυτή είναι απλή και ασφαλής αφού οι εργασίες γίνονται υπό την προστασία ομπρέλας γύρω από το άνοιγμα αλλά και γρήγορη αφού μειώνονται οι φάσεις εκσκαφής άρα οι ρυθμοί προχώρησης της ανά ημέρα αυξάνονται.

Από τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μέθοδος είναι ιδανική για την εφαρμογή της σε φτωχά από μηχανικής άποψης εδάφη και πετρώματα καθώς και σε αστικές περιοχές όπου δεν επιθυμούνται επιφανειακές καθιζήσεις.

Όσον αφορά την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρατηρείται ότι τα τρισδιάστατα μοντέλα αν και ήταν πολύ χρονοβόρα η επίλυσή τους, έδωσαν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα από τα αντίστοιχα δισδιάστατα. Για παράδειγμα ενώ τα τρισδιάστατα μοντέλα με δοκούς προπορείας και πλαίσιο δίνουν 20% λιγότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις στη στέψη σε σχέση με την ανυποστήρικτη διατομή, τα αντίστοιχα δισδιάστατα δίνουν 40% λιγότερες κατακόρυφες μετατοπίσεις στη στέψη, νούμερο που είναι μάλλον υπερβολικό για μια σήραγγα τόσο μεγάλης διατομής με ένα μόνο πλαίσιο.

Όσον αφορά όμως τη σύγκριση για το μοντέλο με τις δοκούς προπορείας και το χαλύβδινο πλαίσιο, το δισδιάστατο με το τρισδιάστατο μοντέλο εξάγουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα. Επειδή το μοντέλο που προσομοιώνει κυρίως τη διαδικασία της προπασσάλωσης είναι το μοντέλο αυτό, στην περίπτωση αυτή μπορεί να



χρησιμοποιηθεί το δισδιάστατο μοντέλο, το οποίο δεν απαιτεί μεγάλους χρόνους αναμονής μέχρι να επιλυθεί.

Ακόμα παρατηρείται ότι το σύστημα των δοκών προπορείας δεν λειτουργεί καθόλου χωρίς την στήριξή του σε κάποιο πλαίσιο. Όταν υπάρχουν μόνο οι δοκοί προπορείας, το σύστημα συμπεριφέρεται σαν πρόβολος. Δηλαδή υπάρχει πάκτωση στη μια πλευρά και ελεύθερο άκρο στην άλλη. Για αυτό το λόγο δεν λειτουργεί το σύστημα των δοκών προπορείας. Δεν μεταφέρουν καθόλου φορτία. Αυτή η στιγμή στην πράξη είναι όταν τοποθετούνται οι δοκοί και μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα όπου δεν στηρίζονται πουθενά μέχρι την εγκατάσταση του πλαισίου. Το χρονικό σημείο αυτό είναι πολύ κρίσιμο αφού παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις στην στέγη και πρέπει να γίνεται γρήγορη τοποθέτηση του πλαισίου.

Αντίθετα, όταν τοποθετείται το πλαίσιο, οι δοκοί προπορείας λειτουργούν σαν αμφιέριστη δοκός αφού στηρίζονται στο χαλύβδινο πλαίσιο. Έτσι το σύστημα της προπασσάλωσης λειτουργεί φυσιολογικά υποστηρίζοντας το μέτωπο εκσκαφής.

Οι δοκοί προπορείας μεταφέρουν μεγάλα φορτία στα πλαίσια της άμεσης υποστήριξης. Αυτό συμβαίνει γιατί τα πλαίσια δρουν ως αντίδραση των δοκών στη στήριξη. Έτσι όσο πιο άκαμπτη είναι η κάθε δοκός προπορείας, είναι λογικό να μεταφέρεται μεγαλύτερο φορτίο στο πλαίσιο.

Ακόμα ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από την παραμετρική ανάλυση, είναι όσον αφορά τα μοντέλα με κριτήριο αστοχίας. Παρατηρείται ότι το δισδιάστατο μοντέλο με τις δοκούς προπορείας και το χαλύβδινο πλαίσιο, έχει καλή συμπεριφορά όταν αστοχεί το υλικό, δίνοντας 50% μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε σχέση με το να μην αστοχεί ενώ αντίστοιχα η ανυποστήρικτη διατομή δίνει σχεδόν 300% ,μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

Τέλος εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η προσομοίωση των δοκών προπορείας με τη λεγόμενη ενισχυμένη ζώνη σε διατομή, μια ζώνη δηλαδή όπου τα χαρακτηριστικά της κατά την διατομή όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή είναι αυξημένα, δεν είναι σωστή αφού οι δοκοί προπορείας λειτουργούν κατά το μήκος. Επίσης η προσομοίωση με ενισχυμένη ζώνη λειτουργεί σαν τόξο (δηλαδή σαν ένα μεγάλο πλαίσιο), αναλαμβάνοντας φορτία προκαλώντας μείωση των φορτίων στα πλαίσια, ενώ στην πραγματικότητα, οι δοκοί προπορείας αυξάνουν σημαντικά τα φορτία των πλαισίων.

Οι προτάσεις που μπορούν να τεθούν για την βελτίωση της παρούσας εργασίας αλλά και για την περαιτέρω διερεύνησή της, είναι να δημιουργηθούν κάποια τρισδιάστατα μοντέλα στα οποία οι δοκοί προπορείας να έχουν κάποια κλίση (πέντε έως δέκα μοίρες) όπως άλλωστε συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Αυτό πιθανώς να χρειάζεται κάποια ειδικά σχεδιαστικά λογισμικά πακέτα.

Ακόμα θα μπορούσε να γίνει εγκατάσταση και άλλων πλαισίων στο τρισδιάστατο μοντέλο με βήμα προχώρησης μεταξύ ενός και ενάμιση μέτρου όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Αυτό θα συντελούσε σε καλύτερη ευστάθεια της σήραγγας.

Επίσης στα στοιχεία των δοκών προπορείας αντί να χρησιμοποιηθούν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του χάλυβα, να διερευνηθούν και να χρησιμοποιηθούν τα αντίστοιχα μεγέθη για σύμμεικτη δοκό.

Τέλος να διερευνηθεί ο τρόπος καλύτερης επίλυσης όσον αφορά το τρισδιάστατο ελαστοπλαστικό μοντέλο αφού δεν έγινε δυνατό να “τρέξει” λόγω του τεράστιου όγκου των δεδομένων.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις Ίων .
2. Δουβής, Π. (2002). Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας σήραγγας που εξορύσσεται με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής. Διπλωματική εργασία ,Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων , Πολυτεχνείο Κρήτης.
3. Εξαδάκτυλος, Γ. και Μ. Σταυροπούλου (2004). Σχεδιασμός και Μηχανική των Σηράγγων και των Υπογείων Έργων, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Χανιά.
4. Καββαδάς, Μ. (2000). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου.
5. Σοφιανός, Α.Ι. (2000). Σημειώσεις μαθήματος, Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου.
6. Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ (2005). Χαλύβδινοι δοκοί προπορείας βαρέως τύπου, Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές.

### Διεθνής

1. Asano T., M. Ishihara, Y. Kiyota, H. Kurosawa and S. Ebisu (2003). An observational excavation control method for adjacent mountain tunnels. Tunneling and Underground Space Technology, Volume 18, Issues 2 - 3, April – June 2003, pages 291 – 301.
2. Atlas Copco (2005), Rock & Soil Reinforcement, third edition.
3. Aydan O., T. Kyoka, Y. Ichikawa and T. Kawamoto (1988). Three-dimensional simulation of an advancing tunnel supported with forepoles, shotcrete, steel ribs and rockbolts. Numerical Methods in Geomechanics (Innsbruck 1988), Swoboda (ed.), Balkema, Rotterdam

4. Coulter S. and C. Derek Martin Ground (2004). Deformations Above a Large Shallow Tunnel Excavated Using Jet Grouting. Proc. ISRM Symposium EUROCK 2004 and 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquy. Edited by W. Schubert, pp. 155-160. VGE, Essen.
5. Csébfalvi A. and G. Csébfalvi (2005). Effect of Semi-Rigid Connection in Optimal Design of Frame Structures. 6th world congresses of Structural and Multidisciplinary optimization. Rio de Janeiro 30 May – 03 June, Brazil.
6. Harris J.S. (1995). Ground freezing in practice, Thomas Telford Service Ltd, London.
7. Haruyama K. and S. Teramoto (2004). Construction of large cross-section double-tier Metropolitan Inter-city Highway (Ken-O-Do) Ome Tunnel by NATM. Tunneling and Underground Space Technology, Volume 20, Issue 2, 1 March 2005, pages 111 – 119.
8. Hayward Baker publication (1996). Minipile.
9. Kamata H. and H. Mashimo (2003). Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. Tunneling and Underground Space Technology, Volume 18, Issues 2 - 3, April – June 2003, pages 205 – 212.
10. Kimura H., T. Itoh, M. Iwata and K. Fujimoto (2004). Application of new urban tunnelling method in Baikoh tunnel excavation. Tunneling and Underground Space Technology, Volume 20, Issue 2, March 2005, pages 151 – 158.
11. Peila D. and C Oggeri (2006). Various excavation & Auxiliary methods in tunneling. ITA/AITES – Training course, Tunnel engineering, Seoul
12. ROTEX OY (2002). Forepoling in tunnels.
13. Tan W.L and P.G. Ranjith, (2003). Numerical Analysis of Pipe Roof Reinforcement in Soft Ground Tunnelling, American Society of Civil Engineers, 16<sup>th</sup> Engineering Mechanics Conference July 16 – 18 July 2003 University of Washington, Seattle.
14. US Army Corps of Engineers (USACE), (1997). Tunnels and shafts in Rock.

## Διαδίκτυο

1. <http://www.rockreinforcement.com>
2. <http://www.jet-grouting.com/> Jet grouting technology overview

## Παράρτημα

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται, διάφορα χαρακτηριστικά πλαισίων για διαφορετικές γεωμετρίες τους.

Table 1. Catalogue values of beam section types									
Section type	h [cm]	b [cm]	t <sub>w</sub> [cm]	t <sub>f</sub> [cm]	A [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>t</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>o</sub> [cm <sup>6</sup> ]
IPE 80	8	4.6	0.4	0.5	7.64	0.7	80.1	8.5	119
IPE 100	10	5.5	0.4	0.6	10.32	1.2	171	15.9	354
IPE 120	12	6.4	0.4	0.6	13.21	1.7	317.8	27.7	894
IPE 140	14	7.3	0.5	0.7	16.43	2.5	541.2	44.9	1989
IPE 160	16	8.2	0.5	0.7	20.09	3.6	869.3	68.3	3977
IPE 180	18	9.1	0.5	0.8	23.95	4.8	1317	100.9	7459
IPE 200	20	10	0.6	0.9	28.48	7	1943.2	142.4	13053
IPE 220	22	11	0.6	0.9	33.37	9.1	2771.8	204.9	22762
IPE 240	24	12	0.6	1	39.12	12.9	3891.6	283.6	37575
IPE 270	27	13.5	0.7	1	45.95	15.9	5789.8	419.9	70849
IPE 300	30	15	0.7	1.1	53.81	20.1	8356.1	603.8	126333
IPE 330	33	16	0.8	1.1	62.61	28.1	11770	788.1	199877
IPE 360	36	17	0.8	1.3	72.73	37.3	16270	1043.5	314645
IPE 400	40	18	0.9	1.3	84.46	51.1	23130	1317.8	492147
IPE 450	45	19	0.9	1.5	98.82	66.9	33740	1675.9	794245
IPE 500	50	20	1	1.6	115.52	89.3	48200	2141.7	1254253
IPE 550	55	21	1.1	1.7	134.42	123.2	67120	2667.6	1893154
IPE 600	60	22	1.2	1.9	155.98	165.4	92080	3387.3	2858585

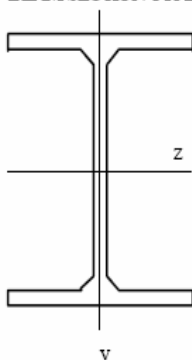
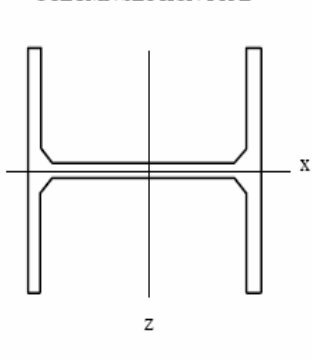
BEAM SECTION TYPE	COLUMN SECTION TYPE
	

Table 2. Catalogue values of column section types

Section type	h [cm]	b [cm]	t <sub>w</sub> [cm]	t <sub>f</sub> [cm]	A [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>t</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>x</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ]
HE 120 A	11.4	12	0.5	0.8	25.34	6	606.2	230.9	6486
HE 120 AA	10.9	12	0.4	0.5	18.55	2.8	413.4	158.8	4253
HE 120 B	12	12	0.6	1.1	34.01	13.8	864.4	317.5	9431
HE 120 M	14	12.6	1.3	2.1	66.41	91.7	2017.6	702.8	24880
HE 140 A	13.3	14	0.5	0.9	31.42	8.1	1033.1	389.3	15086
HE 140 AA	12.8	14	0.4	0.6	23.02	3.5	719.5	274.8	10226
HE 140 B	14	14	0.7	1.2	42.96	20.1	1509.2	549.7	22514
HE 140 M	16	14.6	1.3	2.2	80.56	120	3291.4	1144.3	54482
HE 160 A	15.2	16	0.6	0.9	38.77	12.2	1673	615.6	31469
HE 160 AA	14.8	16	0.4	0.7	30.36	6.3	1282.9	478.7	23794
HE 160 B	16	16	0.8	1.3	54.25	31.2	2492	889.2	48038
HE 160 M	18	16.6	1.4	2.3	97.05	162.4	5098.3	1758.8	108380
HE 180 A	17.1	18	0.6	1	45.25	14.8	2510.3	924.6	60289
HE 180 AA	16.7	18	0.5	0.8	36.53	8.3	1966.9	730	46427
HE 180 B	18	18	0.9	1.4	65.25	42.2	3831.1	1362.8	93887
HE 180 M	20	18.6	1.5	2.4	113.25	203.3	7483.1	2580.1	199805
HE 200 A	19	20	0.6	1	53.83	21	3692.2	1335.5	108176
HE 200 AA	18.6	20	0.5	0.8	44.13	12.7	2944.3	1068.5	84635
HE 200 B	20	20	0.9	1.5	78.08	59.3	5696.2	2003.4	171413
HE 200 M	22	20.6	1.5	2.5	131.28	259.4	10640	3651.2	347093
HE 220 A	21	22	0.7	1.1	64.34	28.5	5409.7	1954.6	193506
HE 220 AA	20.5	22	0.6	0.9	51.46	15.9	4170.2	1510.5	145809
HE 220 B	22	22	1	1.6	91.04	76.6	8091	2843.3	295813
HE 220 M	24	22.6	1.6	2.6	149.44	315.3	14600	5012.1	573830
HE 240 A	23	24	0.8	1.2	76.84	41.6	7763.2	2768.8	328962
HE 240 AA	22.4	24	0.6	0.9	60.38	23	5835.2	2077	240028
HE 240 B	24	24	1	1.7	105.99	102.7	11260	3922.7	487675
HE 240 M	27	24.8	1.8	3.2	199.59	627.9	24290	8152.6	1154493
HE 260 A	25	26	0.8	1.3	86.82	52.4	10450	3667.6	517183
HE 260 AA	24.4	26	0.6	1	68.97	30.3	7980.6	2788	383288
HE 260 B	26	26	1	1.8	118.44	123.8	14920	5134.5	754853
HE 260 M	29	26.8	1.8	3.3	219.64	719	31310	10450	1732251
HE 280 A	27	28	0.8	1.3	97.26	62.1	13670	4762.6	786419
HE 280 AA	26.4	28	0.7	1	78.02	36.2	10560	3664.2	591005
HE 280 B	28	28	1.1	1.8	131.36	143.7	19270	6594.5	1131686
HE 280 M	31	28.8	1.9	3.3	240.16	807.3	39550	13160	2524384