



Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Διπλωματική Εργασία

“Αριθμητική προσομοίωση υποστήριξης σήραγγας με κοχλίες
σε ελαστικό και ελαστοπλαστικό μέσο”

Ιωάννης Δ. Κώνστας



Εξεταστική Επιτροπή:

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής

Εμμανουήλ Στειακάκης, Λέκτορας

Χανιά
Δεκέμβριος, 2011

Αφιερώνεται,
στον Τάκη για τις συμβουλές του,
στη Ρούλα για το ενδιαφέρον της,
στο Βασίλη για την υποστήριξη του.

Περίληψη

Ως γνωστόν οι σήραγγες είναι πολύ σημαντικά έργα υποδομών στην σύγχρονη κοινωνία. Τα τελευταία χρόνια ορύσσονται σήραγγες μεγάλων διατομών οι οποίες μπορούν να εξυπηρετούν ταυτόχρονα πολλαπλές χρήσεις. Ένα από τα τεχνικά θέματα ενδιαφέροντος κατά την όρυξη σηράγγων είναι η προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη της διατομής ούτως ώστε η σήραγγα να είναι ασφαλής για την τελική της χρήση. Ένας από τους τρόπους υποστήριξης είναι η υποστήριξη με κοχλίες που χρησιμοποιείται ευρέως σε έργα κατασκευής σηράγγων.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία παραμετρική διερεύνηση της υποστήριξης με κοχλίες σε ομογενές πέτρωμα χρησιμοποιώντας ελαστικά και ελαστοπλαστικά κριτήρια αστοχίας. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το λογιστικό πακέτο MSC Marc Mentat το οποίο μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η διερεύνηση έγινε με δισδιάστατα μοντέλα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση των κοχλιών στη φορτιζόμενη βραχομάζα.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί με επιτυχία χωρίς την βοήθεια και την υποστήριξη ορισμένων προσώπων 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 ενδιαφέροντος θέματος, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε όποτε τον χρειάστηκα, για τον χρόνο που διέθεσε για μένα και γενικά για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

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

Στον λέκτορα κύριο Στειακάκη Εμμανουήλ για τον 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 Μαυριγιανάκη Στέλιο για την διάθεσή του να με βοηθήσει σε κάποια δύσκολα σημεία της εργασίας και για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Στην Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Σταθογιάννη Φωτεινή για τον χρόνο που διέθεσε για την διόρθωση και εμφάνιση του κειμένου της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω την Μηχανικό Ορυκτών Πόρων Ευφροσύνη Τσισκάκη που ήμασταν συνοδοιπόροι σε όλη την διάρκεια των σπουδών μας, με στήριξη και μου έδινε κουράγιο να συνεχίζω.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες θέλω να δώσω στους γονείς μου για όλα αυτά τα χρόνια που με στηρίζουν, με παροτρύνουν να προσπαθώ περισσότερο και γιατί χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει να φτάσω μέχρι εδώ.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	3
Εισαγωγή.....	3
1.1 Ο ρόλος των σηράγγων.....	3
1.2 Αντικείμενο της εργασίας.....	4
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2	6
Μέθοδοι υποστήριξης σηράγγων	6
2.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Βραχόμαζας	7
2.1.1 Μέθοδος Κοχλίωσης.....	7
2.1.1.1 Κατηγορίες Κοχλιών	9
2.1.1.2 Πυκνότητα Κοχλίωσης	14
2.1.2 Μέθοδος Μικροπασσάλων.....	14
2.2 Μέθοδοι βελτίωσης βραχόμαζας.....	15
2.2.1 Ενεμάτωση με χαμηλή πίεση.....	15
2.2.2 Ενεμάτωση υψηλής πίεσης	16
2.2.3 Ψύξη εδαφών	17
2.2.4 Αποστράγγιση.....	19
2.3 Μέθοδοι Προσωρινής Υποστήριξης Σηράγγων	19
2.3.1 Προπασσάλωση Οροφής	19
2.3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	20
2.3.3 Χαλύβδινα πλαίσια.....	23
2.3.4 Περιφερειακή πρότμηση	24
2.3.5 Μέθοδος Pretunnel.....	25
Κεφάλαιο 3	26
Επίλυση Προβλημάτων Ευστάθειας Σηράγγων με Αριθμητικές Μεθόδους.....	26
3.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	27
3.1.1 Γενικά Στοιχεία της Μεθόδου	27
3.1.2 Φιλοσοφία της Μεθόδου.....	28
3.1.3 Διαδικασία της Μεθόδου.....	29
3.1.4 Διακριτοποίηση	30
3.1.5 Είδη και Αριθμός των Στοιχείων	31
3.1.6 Χαρακτηριστικά της Διαίρεσης του Πεδίου.....	33
3.1.7 Συναρτήσεις Μορφής.....	35

3.1.8 Φόρτιση των Υλικών και Συνοριακές Συνθήκες	35
3.1.9 Τύποι Συνοριακών Συνθηκών.....	36
3.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών.....	37
3.2.1 Γενικά Στοιχεία της Μεθόδου	37
3.2.2 Συνοριακές Συνθήκες της Μεθόδου.....	38
3.3 Ελαστική και Ελαστοπλαστική Συμπεριφορά Υλικών	38
Κεφάλαιο 4	41
Μοντέλα – Αποτελέσματα.....	41
4.1 Γεωμετρία των Μοντέλων.....	41
4.1.1 Γεωμετρία Μοντέλου χωρίς Υποστήριξη	41
4.1.2 Γεωμετρία Μοντέλου με Υποστήριξη Κοχλιών.....	45
4.2 Συνοριακές Συνθήκες.....	46
4.3 Παραμετρική Ανάλυση	47
4.4 Αποτέλεσματα.....	49
4.6 Σύγκριση – Αξιολόγηση	52
4.6.1 Συγκριτικά Διαγράμματα των Ελαστικών Μοντέλων.....	53
4.6.2 Συγκριτικά Διαγράμματα των Ελαστο-πλαστικών Μοντέλων.....	56
Κεφάλαιο 5	61
Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	61
Βιβλιογραφία.....	63
Ελληνική	63
Διεθνής.....	63
Διαδίκτυο.....	64

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ο ρόλος των σηράγγων

Η κατασκευή σηράγγων και υπογείων στοών εμφανίζεται στην αρχή της ιστορίας του ανθρώπου, όταν αυτός κατασκεύασε τα πρώτα εργαλεία και ξεκίνησε την εκσκαφή σπηλαίων για να τα κατοικήσει. Στην αρχαία Ελλάδα οι σήραγγες χρησιμοποιούνταν ως στοές μεταλλείων, υπόγεια λατομεία, κοιμητήρια νεκρών ενώ η πιο διαδεδομένη χρήση τους ήταν η ύδρευση. Ωστόσο παραμένει ένα από τα πιο δύσκολα γεωτεχνικά έργα λόγω της πολυπλοκότητας και της επικινδυνότητας που εμπεριέχει.

Στις σημερινές πόλεις οι υπόγειες σήραγγες χρησιμοποιούνται ευρέως, λόγω της περιορισμένης χρήσης γης που υπάρχει, για κατασκευή υδρευτικών, αποχετευτικών, συγκοινωνιακών έργων και σε μη αστικές περιοχές για κατασκευή συγκοινωνιακών έργων. Ακόμα, σήραγγες χρησιμοποιούνται σε έργα αποστράγγισης για τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας πρανών και σε υδραυλικά έργα όπως υδραγωγεία ή έργα ταμίευσης, με σήραγγες εκτροπής και υπερχείλισης φραγμάτων.

Η πρόοδος της τεχνολογίας, η ανάπτυξη του μεταλλευτικού εξοπλισμού και οι νέες τεχνικές υποστήριξης έχουν συμβάλλει στο να είναι δυνατό να κατασκευαστούν σήραγγες σε οποιοδήποτε έδαφος και περιοχή ακόμη και κάτω από την θάλασσα. Ενδεικτικά, η μεγαλύτερη υποθαλάσσια σήραγγα του κόσμου βρίσκεται κάτω από το Στενό της Μάγχης, ανάμεσα στη Γαλλία και την Αγγλία. Πρόκειται για ένα εκπληκτικό τεχνολογικό επίτευγμα με το μήκος της σήραγγας να ξεπερνά τα 50 χιλιόμετρα και από αυτά τα 38 να βρίσκονται κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί παραμετρικά η εντατική κατάσταση σε μια σήραγγα η οποία έχει υποστηριχτεί με κοχλίες, περιμετρικά της οροφής. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μια από τις πιο συχνά εφαρμοζόμενες αριθμητικές μεθόδους σε γεωτεχνικά προβλήματα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί το υπό μελέτη γεωτεχνικό πρόβλημα σαν ένα συνεχές μέσο με σταθερές ή διαφοροποιημένες ιδιότητες, που παριστάνεται με κάποιας μορφής γεωμετρία και υπόκειται σε συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες. Το μέσο αυτό διακριτοποιείται σε μεγάλο αριθμό μικρότερων στοιχείων τα οποία έχουν συγκεκριμένη γεωμετρική μορφή. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι το κάθε στοιχείο που σχηματίζεται κατά τη διακριτοποίηση, έχει συγκεκριμένη συμπεριφορά στις εξωτερικές συνθήκες που δρουν σε αυτό.

Η επίλυση του προβλήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε με την χρήση του λογισμικού παχέτου MSC MARC Mentat το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτό το λογισμικό, δημιουργήθηκαν μοντέλα για να προσομοιώσουν την εντατική κατάσταση στην διατομή σήραγγας με υποστήριξη με κοχλίες. Αρχικά δημιουργήθηκαν δισδιάστατα ελαστικά μοντέλα με ίδια γεωμετρία και διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας για το πέτρωμα για διατομή με υποστήριξη και για ανυποστήριχτη διατομή. Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν ελαστοπλαστικά μοντέλα με το κριτήριο Mohr - Coulomb για να προσομοιώσει πιο ρεαλιστικά η συμπεριφορά του πετρώματος και των κοχλιών. Τέλος, έγιναν οι κατάλληλες συγκρίσεις για διαπιστωθεί η χρησιμότητα της υποστήριξης με κοχλίες.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται και αναλύονται οι μέθοδοι υποστήριξης σηράγγων καθώς και οι υποκατηγορίες που τις αποτελούν, και τονίζονται τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε κατηγορία.

Στο Κεφάλαιο 3, παραθέτονται οι αριθμητικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα κατασκευής σηράγγων και υπογείων στοών, οι συνοριακές συνθήκες, και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε.

Στο *Κεφάλαιο 4*, παρουσιάζονται αναλυτικά τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν από την επεξεργασία του προβλήματος μέσα από το λογισμικό πακέτο MSC.Marc και συγχρίνονται τα αποτελέσματα τους.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 5*, εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή την εργασία και γίνονται κάποιες προτάσεις για την βελτίωσή της αλλά και για την περαιτέρω διερεύνηση της.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι υποστήριξης σηράγγων

Η αρχική υποστήριξη στις σήραγγες εξυπηρετεί στη σταθεροποίηση και στη διατήρηση της σήραγγας μετά την εκσκαφή της και συμβάλλει στην ασφάλεια του προσωπικού, των εργασιών και του εξοπλισμού.

Συνήθως οι εργασίες για την υποστήριξη γίνονται ταυτόχρονα με την εκσκαφή της σήραγγας. Στην περίπτωση που η εκσκαφή γίνεται με την μέθοδο της διάτρησης και ανατίναξης, η υποστήριξη εγκαθίσταται μόλις ανατιναχθεί και απομακρυνθεί το προηγούμενο τμήμα του πετρώματος και πριν διατρηθεί και ανατιναχθεί το επόμενο τμήμα του πετρώματος. Στην περίπτωση της εξόρυξης με ολομέτωπη κοπή η υποστήριξη εγκαθίσταται καθώς το μηχάνημα προχωράει. Οι διεργασίες εκσκαφής και αρχικής υποστήριξης καθώς έχουν πολύ κοντινή σχέση, θα πρέπει να είναι εναρμονισμένες και σωστά σχεδιασμένες ώστε να είναι επαναλαμβανόμενες για να υπάρχει ένας συνεχής κύκλος εργασιών εκσκαφής και υποστήριξης (USAGE, 1998).

Οι συνηθέστερες μέθοδοι για αρχική υποστήριξη στις σήραγγες είναι:

- α) *οι μέθοδοι ενίσχυσης της βραχομάξας* όπως κοχλίωση, τοποθέτηση μεταλλικών πλαισίων και ατσάλινων πλεγμάτων, η τοποθέτηση μικροπασσάλων,
- β) *οι μέθοδοι βελτίωσης της βραχομάξας* όπως η ενεμάτωση υψηλής πίεσης, η ενεμάτωση χαμηλής πίεσης, η ψύξη του εδάφους, η αποστράγγιση του εδάφους και
- γ) *οι μέθοδοι προσωρινής υποστήριξης σηράγγων* όπως η προπασσάλωση οροφής, η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η εγκατάσταση μεταλλικών πλαισίων, η περιφερειακή πρότυπη και η μέθοδος pretunnel.

2.1 Μέθοδοι Ενίσχυσης Βραχόμαζας

Η λειτουργία της ενίσχυσης της βραχόμαζας είναι να την ‘βοηθάει’ να αυτουποστηρίζεται και να ενεργοποιεί τη φυσική αντοχή του πετρώματος. Έτσι, οι μέθοδοι ενίσχυσης της βραχόμαζας αντιτίθενται με τις μεθόδους προσωρινής υποστήριξης, στις οποίες η υποστήριξη που εφαρμόζεται αντιστοιχεί στο πλήρες φορτίο του πετρώματος. Οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της βραχόμαζας είναι η κοχλίωση (bolting) και οι μικροπάσσαλοι (micropiles). Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν το σχηματισμό, τοποθετούνται μέσα στη μάζα του πετρώματος και γίνονται μέρος του, εν αντιθέσει με τις μεθόδους προσωρινής υποστήριξης οπού οι μετακινήσεις του πετρώματος περιορίζονται και προσφέρεται εξωτερική υποστήριξη στη βραχόμαζα (USACE, 1997).

2.1.1 Μέθοδος Κοχλίωσης

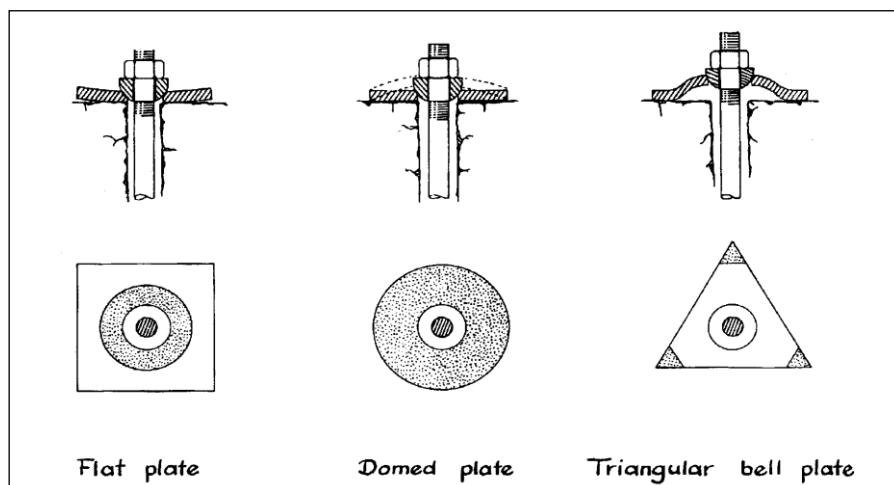
Στην οροφή ενός υπογείου ανοίγματος σχηματίζονται εφελκυστικές ζώνες, όπως προκύπτει από τα μοντέλα της εντατικής κατάστασής του. Σε περιπτώσεις δε που η οροφή αποτελείται από στρωματογεννή πετρώματα, τότε το κάθε στρώμα λειτουργεί ως αμφιέρειστη δοκός η οποία κάμπτεται σύμφωνα με τις ελαστικές της σταθερές και κατά συνέπεια είναι δυνατόν να αποχωριστεί από τα άλλα στρώματα. Υπερβολική αύξηση του βέλους κάμψης είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αστοχία της δοκού. Έτσι, οι κοχλίες που εγκαθίστανται ώστε να είναι αγκυρωμένοι σε συνεκτικό πέτρωμα, είναι δυνατόν να ελαττώσουν ή και να απαλείψουν τα φαινόμενα αυτά με μηχανισμό παρόμοιο με αυτόν που λειτουργεί κατά την υποστήριξη με πλαίσια ή άλλα συστήματα μεταφοράς φορτίων (Αγιουτάντης, 2002).

Ένας κλασσικός 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).

Η εγκατάσταση του κοχλία απαιτεί να ορυχθεί στο πέτρωμα διάτρημα συγκεκριμένης διαμέτρου και συγκεκριμένου μήκους, ανεξαρτήτου του είδους του κοχλία που θα εισαχθεί. Η διάμετρος του διατρήματος μπορεί να ποικίλει, εκτός από την περίπτωση των κοχλίων split set και είναι σύνηθες να υπάρχει απόκλιση της διαμέτρου της τάξεως του 10% - 20% εξαιτίας των μετακινήσεων και των δονήσεων λόγω διάτρησης και εναλλαγής των πετρωμάτων.

Μετά την όρυξη του διατρήματος ακολουθεί ο καθαρισμός του. Κατόπιν εισάγεται ο κοχλίας καθώς και το ένεμα (ρητίνη ή τσιμέντο) εάν αυτό απαιτείται και τελευταία τοποθετούνται το περικόχλιο και η πλάκα εφαρμογής τάσεων (Σχήμα 2.2). Η πλάκα εφαρμογής τάσεων δημιουργεί την αντίδραση του κοχλία στο πέτρωμα και επιβάλλει τις αντίστοιχες τάσεις σε αυτό. Το τελευταίο στάδιο της εγκατάστασης του κοχλία είναι η τάνυσή του. Στις σήραγγες, η τάνυση των κοχλιών 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 (Atlas Copco, 2005).

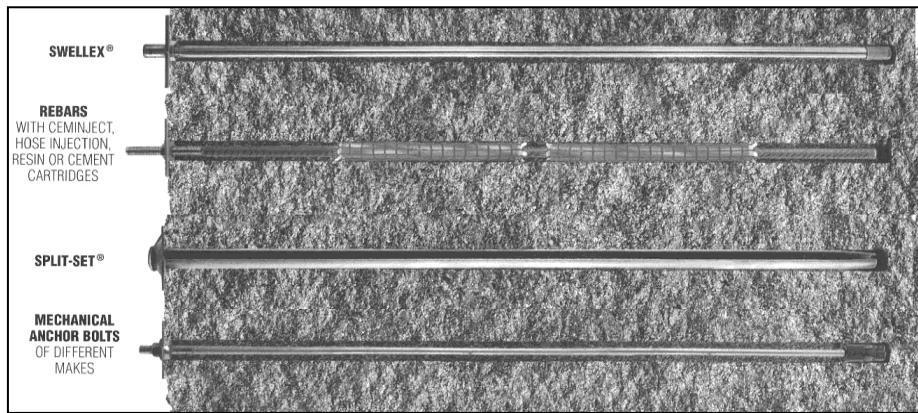
Σημαντικό μέρος της κοχλίωσης είναι ο έλεγχος των κοχλιών καθώς αν δεν έχουν εγκατασταθεί σωστά, δεν θα αποδώσουν την αναμενόμενη λειτουργία. Πιθανοί λόγοι λανθασμένων εγκαταστάσεων είναι: λάθος επιλογή συστήματος αγκύρωσης, λάθος τοποθεσία, διάμετρος ή μήκος του διατρήματος, ανεπαρκής τοποθέτηση ενέματος, ανεπαρκές σφράγισμα διατρήματος, διάβρωση του μετάλλου του κοχλία, μη επαρκής σύνδεση περικόχλιου και πλάκας στερέωσης, ακατάληλο μίγμα ενέματος, κ.α (USACE, 1997).



Σχήμα 2.2: Σχήματα πλακών αγκύρωσης (USACE, 1997)

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.

Η διαφορά ανάμεσα στους προεντεταμένους και μη προεντεταμένους κοχλίες εντοπίζεται στην δυνατότητα εφαρμογής ενεργητικής ή παθητικής υποστήριξης. Κάποιοι χαρακτηριστικοί τύποι κοχλιών φαίνονται στο Σχήμα 2.8 (Hoek and Brown, 1980).



Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστικοί τύποι κοχλιών (Atlas Copco, 2006)

Κάποιοι τύποι κοχλιών είναι οι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης με μεταλλική σφήνα, οι κοχλίες αναπτυσσόμενου κελύφους, οι προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη, οι προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο, οι μη προεντεταμένοι διαχωριζόμενοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (split set) και οι μη προντεταμένοι σωληνοειδείς κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (swellex).

2.1.1.1 Κατηγορίες Κοχλιών

Πιο αναλυτικά υπάρχουν οι εξής κατηγορίες κοχλιών:

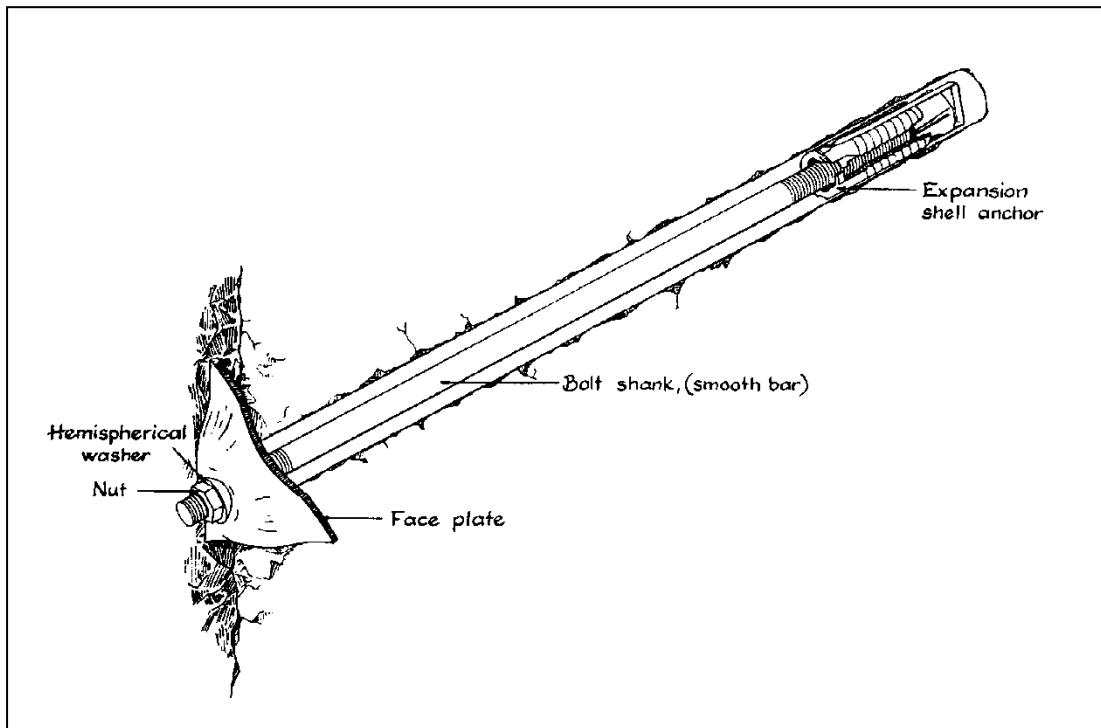
Προεντεταμένοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης με μεταλλική σφήνα

Στους κοχλίες αυτούς, η σφήνα διαστέλλει το άκρο του κοχλία κατά την εισαγωγή του στο διάτρημα με συνέπεια να αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής ανάμεσα στον κοχλία και στα τοιχώματα. Τα πλεονεκτήματα τους είναι, το χαμηλό κόστος, η απλή διαδικασία τοποθέτησης και η δυνατότητα ολίσθησης του κοχλία. Αντίθετα, τα μειονεκτήματα τους είναι, η μικρή επιφάνεια επαφής με το πέτρωμα, η απαιτούμενη ακρίβεια ως προς τη διάμετρο του διατρήματος και το ενδεχόμενο άμεσης ολίσθησης ή αστοχίας αν το σημείο αγκύρωσης δεν είναι κατάλληλο.

Προεντεταμένοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης αναπτυσσόμενου κελύφους

Στην περίπτωση αυτή το κέλυφος αναπτύσσεται κατά την είσοδο του κοχλία και έχουμε συνδυασμό των κοχλιών με κατανεμημένη αγκύρωση από τσιμέντο.

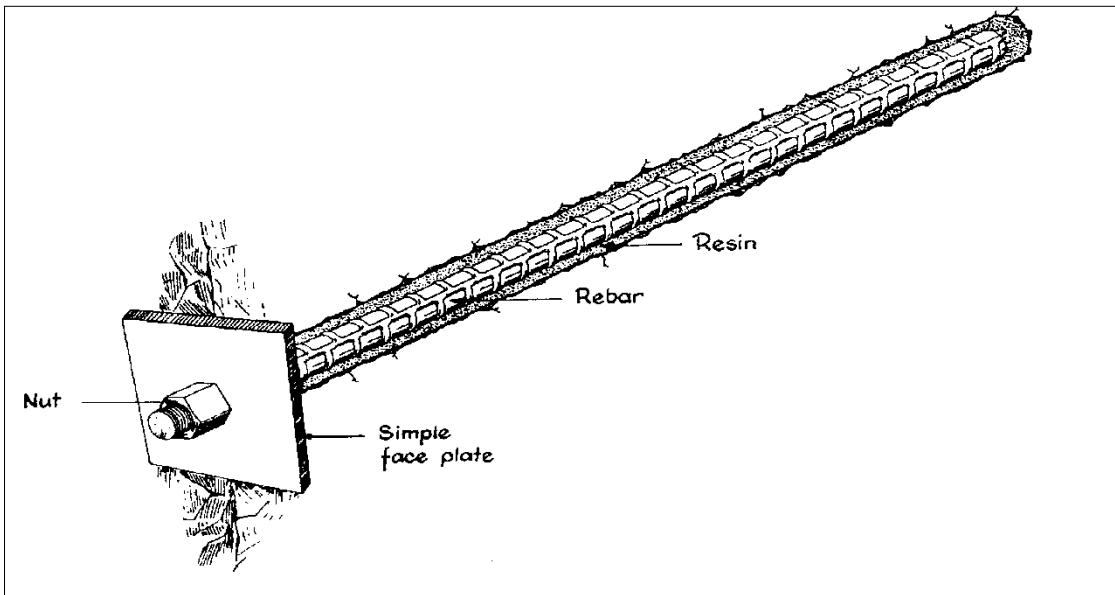
Το αναπτυσσόμενο κέλυφος παραλαμβάνει την αρχική τάνυση, ενώ το τσιμέντο παραλαμβάνει τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την παθητική φόρτιση του κοχλία.



Σχήμα 2.1: Κοχλίας αναπτυσσόμενου κελύφους (USACE, 1997)

Προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη

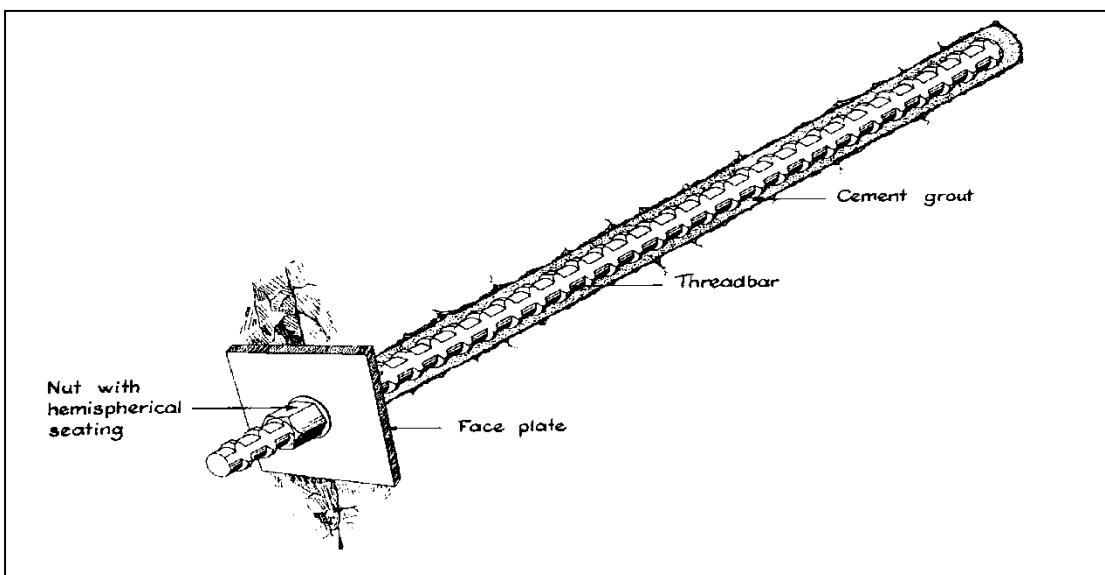
Αυτό αποτελεί το πιο εξελιγμένο σύστημα κοχλίωσης που έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Πριν από την εισαγωγή του κοχλία στο διάτρημα, εισάγονται φυσίγγια που περιέχουν ρητίνες και κάποιον καταλύτη σκλήρυνσης. Ο κοχλίας εισάγεται στο διάτρημα με περιστροφή, με συνέπεια τη ψραύση του φυσιγγίου και την ανάμιξη της ρητίνης με τον καταλυτή. Μεγάλο μέρος της αντοχής επιτυγχάνεται σε μερικά δευτερόεπτα έως λίγα λεπτά, κάτι που επιτρέπει την άμεση τάνυση του κοχλία. Το μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι το υψηλό κόστος ρητίνης και το ενδεχόμενο καταστροφής της ρητίνης όταν παραμείνει αποθηκευμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα (Σχήμα 2.3) (Αγιουτάντης, 2002).



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

Προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο

Η παράπλευρη επιφάνεια των κοχλιών αυτών συνήθως δεν είναι ομαλή, ώστε να δημιουργούνται καλύτερες συνθήκες πρόσφυσης με το υλικό αγκύρωσης. Το μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η αδυναμία τάνυσης πριν αναπτυχθούν οι αντοχές του τσιμέντου (Σχήμα 2.4).



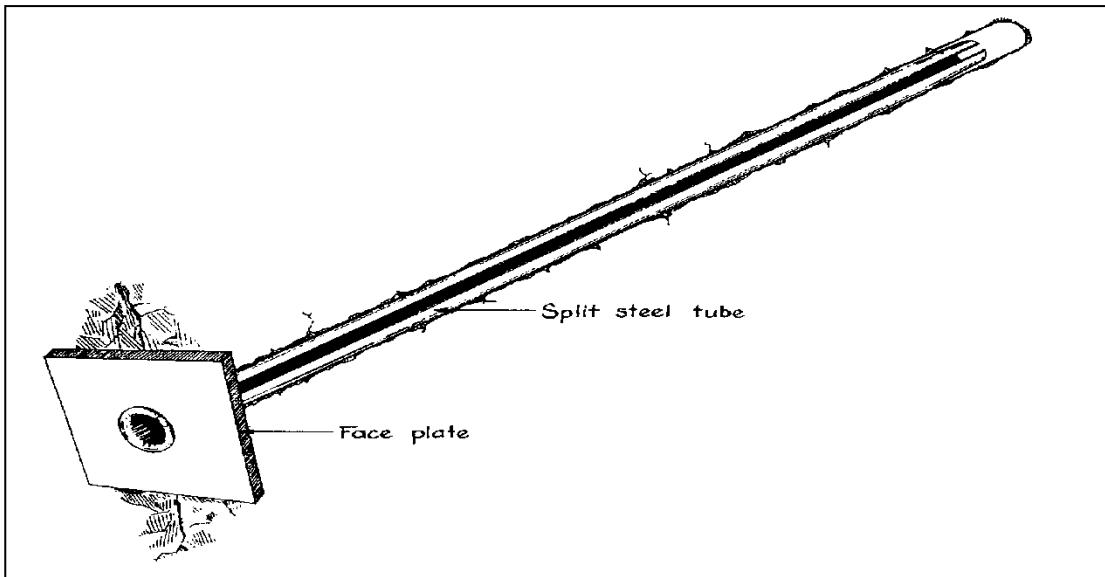
Σχήμα 2.4: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο (USACE, 1997)

Μη προεντεταμένοι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο

Μοιάζουν με τους αντίστοιχους προεντεταμένους κοχλίες με την διαφορά ότι δεν μπορούν να υποστούν τάνυση και επομένως πρέπει να τοποθετηθούν πριν από ενδεχόμενες κινήσεις του πετρώματος.

Μη προεντεταμένοι διαχωριζόμενοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (split set)

Η αγκύρωση στους κοχλίες αυτούς επιτυγχάνεται με αναδίπλωση του άκρου και επομένως η διάμετρος του διατρήματος πρέπει να έχει μικρή απόκλιση από τις προδιαγραφές ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αγκύρωση (Σχήμα 2.5)



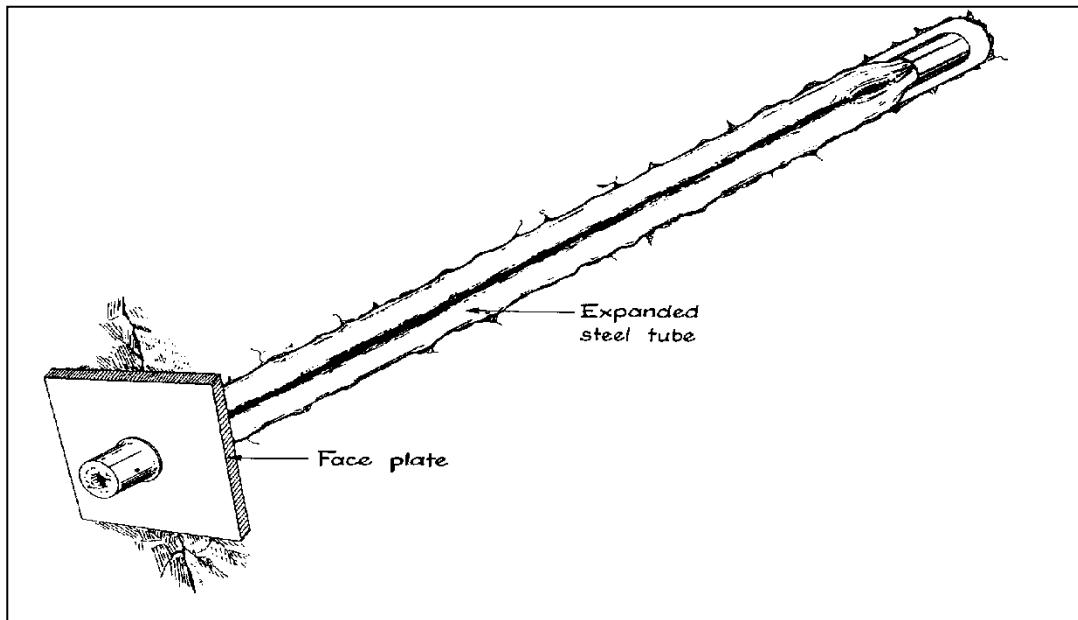
Σχήμα 2.5: Μη προεντεταμένος διαχωριζόμενος κοχλίας σημειακής αγκύρωσης (USACE, 1997)

Μη προεντεταμένοι σωληνοειδείς κοχλίες σημειακής αγκύρωσης (swellex)

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε πρόσφατα από τον Σουηδικό οίκο Atlas Copco και συνίσταται, στην κατασκευή ενός σωλήνα λεπτού τοιχώματος (Σχήμα 2.7) ο οποίος είναι κλειστός από το ένα άκρο, ενώ από το άλλο άκρο μπορεί να προσαρμοστεί στο ακροφύσιο μίας αντλίας νερού υψηλής πίεσης.

Η πίεση του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη διαστολή του κοχλία σε όλο του το μήκος, επιτυγχάνοντας έτσι άμεση κατανεμημένη αγκύρωση. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η αντοχή του συστήματος εξαρτάται άμεσα από την αντοχή του σωλήνα λεπτού τοιχώματος (Σχήμα 2.6) (Αγιουτάντης, 2002).

Οι κοχλίες split set και swellex, θεωρείται συχνά ότι προσφέρουν παροδική ενίσχυση στο πέτρωμα διότι θεωρείται αβέβαιη μετά από χρονικό διάστημα, η αντίστασή τους σε φαινόμενα διάβρωσης.



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



Σχήμα 2.7: Γεωμετρία κοχλιών Swellex (Atlas Copco, 2006)

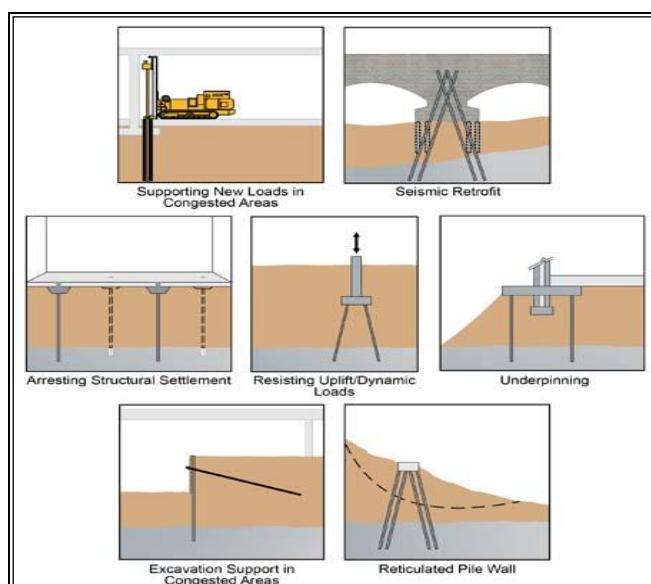
2.1.1.2 Πυκνότητα Κοχλίωσης

Η πυκνότητα της κοχλίωσης εξαρτάται από την κατάσταση του πετρώματος που πρόκειται να υποστηριχτεί και κυμαίνεται συνήθως από 0.5 έως 1 κοχλία ανά m^2 επιφάνειας υποστήριξης. Η κοχλίωση μπορεί να βελτιωθεί με την τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος το οποίο συγκρατεί τα ενδιάμεσα τμήματα του πετρώματος και επομένως εμποδίζει την χαλάρωση του κύριου όγκου της οροφής. Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται κοχλίωση των τοιχωμάτων μιας στοάς, αυτή επιτυγχάνεται συνήθως με μικρότερη πυκνότητα κοχλίωσης.

2.1.2 Μέθοδος Μικροπασσάλων

Οι μικροπάσσαλοι είναι εύκαμπτα δομικά στοιχεία εντός του εδάφους που αποσκοπούν στην ανάληψη φορτίων. Οι πάσσαλοι αυτοί έχουν μικρή διάμετρο, έως 300 mm για κατασκευή με εκσκαφή και έως 150 mm για κατασκευή με έμπηξη. Ο διατρητικός εξοπλισμός που υπάρχει καθώς και οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί επιτρέπουν στους μικροπασσάλους να εγκαθίστανται σε οποιεσδήποτε εδαφικές συνθήκες, και σε οποιαδήποτε γωνία έτσι ώστε να λαμβάνουν πολύ υψηλά φορτία.

Το φορτίο το λαμβάνει κυρίως το χαλύβδινο μέρος και μεταφέρεται διαμέσω του τσιμεντενέματος στο περιβάλλον πέτρωμα όπως στις περιπτώσεις των αγκυρίων και των ηλώσεων. Η περισσότεροι μικροπάσσαλοι έχουν μήκος 15 έως 30 m, διάμετρο μεταξύ 100 και 250 mm και αντοχή σε εφαρμογή θλιπτικής δύναμης 250 έως 1000 kN. Κάποιες εφαρμογές των μικροπασσάλων φαίνονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Εφαρμογές μικροπασσάλων (Baker, 1996)

2.2 Μέθοδοι βελτίωσης βραχόμαζας

Σε ορισμένες περιπτώσεις που υπάρχουν εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες για κατασκευή σηράγγων απαιτείται η χρησιμοποίηση μεθόδων βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών (ground improvement). Οι κύριες μέθοδοι βελτίωσης είναι τέσσερις, η μέθοδος ενεμάτωσης με χαμηλή πίεση (grouting ή low pressure injection), η μέθοδος με ενεμάτωση υψηλής πίεσης (jet-grouting), η μέθοδος ψύξης του εδάφους (freezing), και η μέθοδος της αποστράγγισης (dewatering ή drainage) (Peila et al., 2006).

2.2.1 Ενεμάτωση με χαμηλή πίεση

Η ύπαρξη διαφόρων ρευστών στην κατασκευή σηράγγων είναι ένα σύνηθες πρόβλημα το οποίο μπορεί να καταστεί καταστροφικό. Έτσι, δεν θα πρέπει να υπάρχει διαρροή των ρευστών αυτών από την σήραγγα, όπως δεν θα πρέπει να υπάρχει και εισροή ύδατος από τα γειτονικά εδάφη. Η εισροή ύδατος στην σήραγγα μπορεί να οδηγήσει σε καθιζήσεις στην επιφάνεια, σε ανικανότητα άντλησης νερού από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις νερού, να δημιουργήσει ζημιές στις υπάρχουσες κατασκευές στην επιφάνεια και να έχει άλλες ανεπιθύμητες συνέπειες. Η ενεμάτωση με χαμηλή πίεση (low pressure injection) έχει σκοπό να σταθεροποιήσει, να βελτιώσει αλλά και να στεγανοποιήσει τα υπερχείμενα στρώματα.

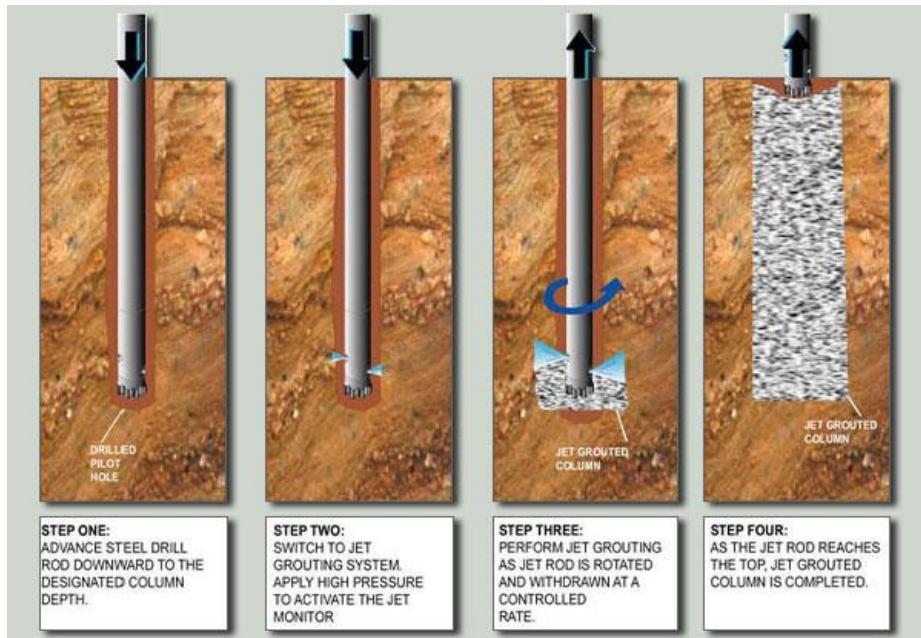
Όταν η ποιότητα του εδάφους είναι φτωχή, η διαδικασία της διάτρησης είναι δυσκολότερη ενώ η ανάγκη να διατρηθούν οριζόντια διατρήματα είναι πολύ μεγαλύτερη. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας να γίνεται τοποθέτηση του ενέματος εκεί όπου πραγματικά απαιτείται. Όπου είναι δυνατόν, τα διατρήματα της ενεμάτωσης θα πρέπει να γίνονται σε σωστές γωνίες σε σχέση με κύριες ρηγματώσεις, ούτως ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη πλήρωσή τους με σκυρόδεμα. 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 m από το μέτωπο (Atlas Copco, 2011).

2.2.2 Ενεμάτωση υψηλής πίεσης

Η ενεμάτωση με υψηλή πίεση (jet grouting), διαφέρει σημαντικά από τις άλλες μεθόδους βελτίωσης εδαφών. Στη μέθοδο αυτή καταστρέφεται εξ ολοκλήρου η δομή του εδάφους, το εδαφικό υλικό μεταφέρεται στην επιφάνεια με τη βοήθεια των εισπιεζόμενων ρευστών και έπειτα αναμιγνύεται με το τσιμέντο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ομογενοποιημένου εδάφους το οποίο στο επόμενο στάδιο στερεοποιείται.

Η τεχνική jet grouting 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 ως αριμώδεις χάλικες (Jet-grouting.com, 2011).

Η διαδικασία της βελτίωσης του εδάφους με τη μέθοδο της ενεμάτωσης με υψηλή πίεση, έχει ως εξής: πρώτα γίνεται διάτρηση της οπής διαμέτρου 100-150 mm μέχρι το επιθυμητό βάθος. Κατόπιν, με την βοήθεια μίας ισχυρής αντλίας πίεσης μέσω ενός η περισσοτέρων ακροφυσίων 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 τελικά ανυψώνονται (Σχήμα 2.10). Έτσι δημιουργείται μια στήλη μίγματος από εδαφικό υλικό και τσιμέντο (Jet-grouting.com, 2011).



Σχήμα 2.10: Αναπαράσταση της μεθόδου jet grouting (laynegeo.com, 2011)

Έχουν αναπτυχθεί τρία συστήματα ενεμάτωσης με υψηλή πίεση σε σχέση με τα εισπιεζόμενα ρευστά που χρησιμοποιούνται:

Μονό ρευστό: Αυτό το σύστημα είναι η απλούστερη, καθώς επίσης και η συνιστώμενη μέθοδος για έργα που περιλαμβάνουν κρίσιμες ή ευαίσθητες δομές. Το ενιαίο ρευστό που αναφέρεται σε αυτήν την μέθοδο είναι ρευστοκονίαμα τσιμέντου. Το ρευστοκονίαμα τσιμέντου εγχέεται μέσω ενός μικρού ακροφυσίου στην υψηλή πίεση και μίγμα με το επιτόπιο χώμα. Αυτή η μέθοδος παράγει το πιό ομοιογενές στοιχείο χώμα-τσιμέντου με την υψηλότερη δύναμη και το λιγότερο ποσό επιστροφής ρευστοκονιάματος.

Διπλό ρευστό: Τα δύο ρευστά που αναφέρονται σε αυτήν τη μέθοδο είναι ρευστοκονίαμα και αέρας τσιμέντου. Το ρευστοκονίαμα τσιμέντου εγχέεται στην υψηλή πίεση και βοηθιέται από ένα κώνο του συμπιεσμένου αέρα, ο οποίος τυλίγει την έγχυση ρευστοκονιάματος. Ο αέρας μειώνει την απώλεια τριβής που επιτρέπει στο ρευστοκονίαμα τσιμέντου να ταξιδεύει περεταίρω από το σημείο εγχύσεων και να παράγει τις μεγαλύτερες διαμέτρους στηλών. Εντούτοις, η παρουσία του αέρα μειώνει τη δύναμη της στήλης σε σύγκριση με την ενιαία ρευστή μέθοδο, και παράγει περισσότερη επιστροφή ρευστοκονιάματος.

Τριπλό ρευστό: Τα τρία ρευστά που αναφέρονται σε αυτήν την μέθοδο είναι ρευστοκονίαμα, αέρας και νερό τσιμέντου. Το νερό εγχέεται στην υψηλή πίεση και βοηθιέται από το συμπιεσμένο αέρα. Αυτή η διαδικασία παράγει μια επίδραση ανύψωσης αέρα που εκκενώνει το χώμα από μέσα από την προοριζόμενη διάμετρο στηλών. Το ρευστοκονίαμα εγχέεται σε μια χαμηλότερη πίεση μέσω ενός χωριστού ακροφυσίου κάτω από το νερό και τα ακροφύσια αέρα για να γεμίσει το κενό που δημιουργείται με τη διαδικασία ανύψωσης αέρα. Παράγει ουσιαστικά περισσότερη επιστροφή ρευστοκονιάματος από τις προηγούμενες μεθόδους (Laynegeo.com, 2011).

2.2.3 Ψύξη εδαφών

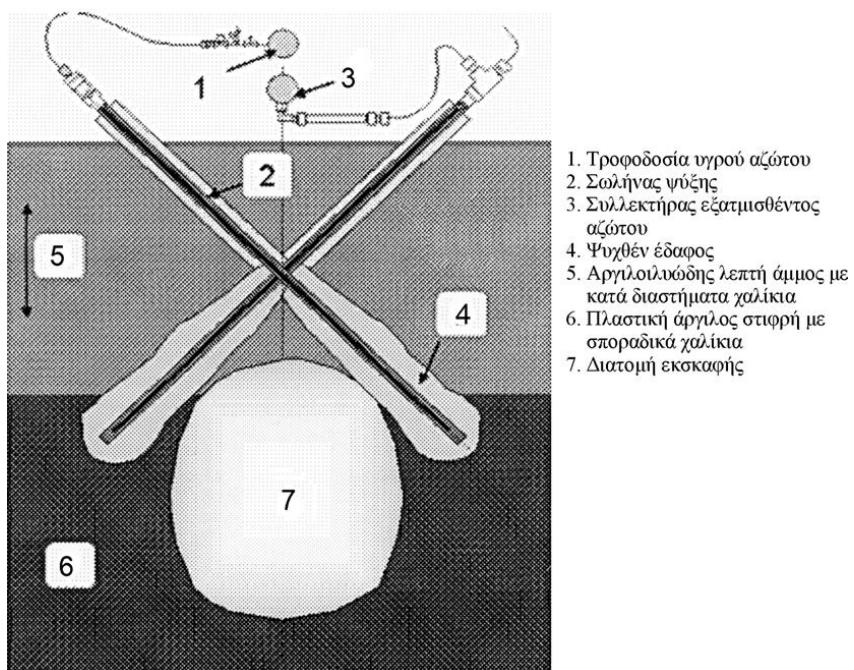
Η εφαρμογή της μεθόδου της ψύξης σε εδαφικούς σχηματισμούς δίνει άμεσες βραχυπρόθεσμες λύσεις σε διάφορα μεγάλα τεχνικά έργα, όπως προσωρινή αντιστήριξη παγοποιημένου μετώπου ορύγματος για τη θεμελίωση βάθρων οδογεφυρών, διάνοιξη μετώπου σήραγγας ή σε μικρότερης έκτασης τεχνικά έργα σύμφωνα με την αναγκαιότητα διέλευσης ενός δρόμου.

Η ψύξη του εδάφους επί τόπου του έργου δια μέσω υγρού αζώτου επιφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μεγάλη αντοχή του παγοποιημένου εδάφους λόγω της χαιρηλής θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται.
- Δυνατότητα δραστικής επέμβασης, εξαλείφοντας ενδεχόμενες ανομοιομορφίες του χειρισμού.

Στην περίπτωση π.χ. εκσκαφής ενός ορύγματος, η ψύξη στα πρανή και το δάπεδο επιφέρει στεγανότητα και συνθήκες ευστάθειας ολόκληρου του εδαφικού τμήματος που βρίσκεται μεταξύ της μέγιστης στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και της επιφάνειας έδρασης. Έτσι στη φάση αυτή δεν υπάρχουν ροές αλλά μόνο μία σταθερή περιεχόμενη υγρασία. Για την εφαρμογή της μεθόδου της ψύξης και την υλοποίηση της κατασκευής απαιτείται η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων που αναπτύσσει ο εδαφικός σχηματισμός κατά τη διάρκεια της ψύξης (TEE.gr, 2011).

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 μία σήραγγα, μπορεί να οδηγήσει επίσης σε σταθεροποίηση του εδάφους ακόμη και σε υποστήρηξη της κατασκευής εάν οι εδαφικές συνθήκες είναι οι κατάλληλες (Σχήμα 2.11) (TEE.gr, 2011).



Σχήμα 2.11: Εφαρμογή της μεθόδου της ψύξης κατά τη διάνοιξη σήραγγας (Bielefeld, Germany) σε αλουβιακές αποθέσεις (Καββαδάς, 2000).

2.2.4 Αποστράγγιση

Το νερό που υπάρχει μέσα σε μια υπό κατασκεύη σήραγγα, πρέπει να απομακρυνθεί γιατί κάνει τα πετρώματα πιο επιφρεπή σε καταστάσεις αποχωρισμού και πτώσεις, μειώνοντας τη φυσική συνοχή τους. Αφαιρώντας το νερό, βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχόμαζας, ενισχύεται η σταθερότητα της κατασκευής και βελτιώνονται οι συνθήκες εργασίας των εργαζόμενων (USACE, 2000).

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 στα σημεία αυτά. 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 εκσκαφές όμως χρησιμοποιούνται μεγάλα συστήματα αποστράγγισης με πολλές μονάδες 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 τα μέτρα υποστήριξης που λαμβάνονται και να μην εμποδίζει τον εξοπλισμό εκσκαφής ούτε και την εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος υποστήριξης (Καββαδάς, 2000).

2.3 Μέθοδοι Προσωρινής Υποστήριξης Σηράγγων

Οι μέθοδοι προσωρινής υποστήριξης σηράγγων, βασίζονται στην ιδέα της εξωτερικής υποστήριξης της βραχόμαζας και δρουν μέχρι την εγκατάσταση της μόνιμης υποστηριξης 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), η περιφερειακή πρότυμηση (mechanical precut) και η μέθοδος pretunnel (Peila, 2006).

2.3.1 Προπασσάλωση Οροφής

Η προπασσάλωση οροφής (forepoling) είναι μία μέθοδος που 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 ως 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 και αλληλοκαλύπτονται σε μήκος που καθορίζεται από το σχεδιασμό του έργου. Έτσι σταθεροποιείται το μέτωπο της σήραγγας σε περιμετρικές και επιμήκεις κατευθύνσεις της σήραγγας. Οι μέθοδοι προπασσάλωσης οροφής που μπορούν να αναφερθούν είναι η μέθοδος προπασσάλωσης με ενεμάτωση υψηλής πίεσης, η μέθοδος προπασσάλωσης pipe roof και η μέθοδος προπασσάλωσης με χαλύβδινες δοκούς προπορείας (Peila, 2006).

2.3.2 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete), ονομάζεται το σκυρόδεμα που συνίσταται από τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα υλικά (συνήθως έως 10 mm) καθώς και από κάποιο επιταχυντή πήξεως, το οποίο εφαρμόζεται με εκτόξευση με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα (Σχήμα 2.12). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως, είτε ως ξηρό μίγμα με προσθήκη νερού στο στόμιο εκτοξεύσεως είτε ως υγρό μείγμα όπου η ανάμιξη με νερό γίνεται στον αναδευτήρα κατά την παρασκευή του μείγματος. Το υγρό μείγμα χρησιμοποιείται συχνότερα στις περιπτώσεις κατανάλωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλες ποσότητες (Καββαδάς, 2000).



Σχήμα 2.12: Μηχανική εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (BASF, 2011)

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει περισσότερες εφαρμογές σε επισκευές, γιατί:

- 1) Διαστρώνεται σε επιφάνειες οποιαδήποτε κλίσης ακόμη και σε επιφάνειες ορόφων, χωρίς τη χρήση ξυλότυπων.
- 2) Έχει υψηλή θλιπτική αντοχή εξαιτίας του χαμηλού υδατοσυντελεστή N/T και εξαιτίας της εξαιρετικής συμπύκνωσης λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης.
- 3) Επιτυγχάνεται πολύ καλή πρόσφυση με το υλικό της βάσης λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης και λόγω της μεγάλης ικανότητας διεύσδυσης των κόκων των αδρανών.
- 4) Η εγκατάσταση είναι κινητή και έτσι επιτυγχάνεται σκυροδέτηση σε δυσπρόσιτες θέσεις.

Η σύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ακολουθεί αντίστοιχους κανόνες με αυτούς που ισχύουν για το συμβατικό έγχυτο σκυρόδεμα και εξαρτάται από τις κατασκευαστικές ανάγκες αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η εφαρμογή του. Έτσι για μικρό πάχος σκυροδέτησης επιλέγεται λεπτόκοκκη διαβάθμιση ενώ στην περίπτωση σκυροδέτησης στοιχείων μεγάλου πάχους επιλέγεται περισσότερο χονδρόκοκκη διαβάθμιση. Επίσης, το μέγεθος των αδρανών εξαρτάται από τη διάμετρο των σωλήνων μέσα στις οποίες μεταφέρεται το σκυρόδεμα και από τον τρόπο εκτόξευσης. Κατά την χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων αδρανών αυξάνεται η ποσότητα του ανακλώμενου υλικού (άχρηστο υλικό), ενώ στην περίπτωση του λεπτόκοκκου υλικού η συστολή ξήρανσης είναι υψηλότερη. Αυτό αποτελεί και το βασικότερο λόγο για τον οποίο τα μέτρα συντήρησης (ίδια με αυτά που προβλέπονται για το συμβατικό σκυρόδεμα) πρέπει να τηρούνται σχολαστικά, ώστε να αποφευχθούν πιθανές ρηγματώσεις (Δρίτσος, 2011).

Στο μίγμα που θα εκτοξευθεί μπορεί να προστεθούν ειδικά πρόσμικτα όπως στεγανωτικά μάζας, μειωτές νερού, πλαστικοποιητές, σκληρυντές κ.ά. υλικά που θα διευκολύνουν τη σκυροδέτηση και θα βελτιώσουν τις τεχνικές ιδιότητες του υλικού. Ιδιαίτερα σημαντικοί είναι οι επιταχυντές πήξης οι οποίοι όμως ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την τελική αντοχή του σκυροδέματος γι' αυτό συνδυάζονται με ρευστοποιητές οι οποίοι μειώνουν το ποσοστό του νερού στο μίγμα με συνέπεια την αύξηση της αντοχής (Δρίτσος, 2011).



Σχήμα 2.13: Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε σήραγγα σε συνδυασμό με πλέγμα (BASF, 2011)

Η χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνδυάζεται συνήθως με την ενίσχυση με νέους οπλισμούς και με τη στερέωση λεπτού δομικού πλέγματος εξωτερικώς για τη συγχράτησή του, ιδίως σε στρώσεις μεγάλου πάχους όπως στο Σχήμα 2.13.

Για το λόγο αυτό όταν η δέσμη εκτόξευσης συναντά οπλισμούς, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε το υλικό να παει καλά πίσω από τις ράβδους και να μην δημιουργούνται συσσωματώματα με αυτές.

Προκειμένου να περιοριστούν οι ρηγματώσεις λόγω της υψηλής συστολής ξήρανσης και ταυτόχρονα να επιτευχθεί περιορισμός των δομικών πλεγμάτων γίνεται προσθήκη ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται ίνες από χάλυβα (μέγιστο ποσοστό 2% κ.ο.), από προπυλένιο ή γυαλί (ποσοστό 1%-3% κ.ο.) μήκους μερικών cm και πάχους περίπου στο mm. Όταν χρησιμοποιούνται χαλύβδινες ίνες γίνεται εκτόξευση ξηρής ανάμιξης ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ανόργανες ή οργανικές ίνες γίνεται συνήθως εκτόξευση υγρής ανάμιξης. Εκτός από την αντοχή σε ρηγμάτωση και τη σκληρότητα της επιφάνειας, βελτιώνονται γενικά οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού το οποίο αποκτά ομοιόμορφη συμπεριφορά προς όλες τις διευθύνσεις, εξοικονομείται ο οπλισμός και κατασκευάζονται λεπτότερες διατομές.

2.3.3 Χαλύβδινα πλαίσια

Τα χαλύβδινα 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 υποστήριξης, όπως η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, διακρίνονται από την σχετική ανεξαρτησία τους από το περιβάλλον πέτρωμα που αντιστηρίζουν. Τα πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα ή σε συνδυασμό με άλλα μέτρα, παραδείγματος χάριν 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 μοναδικός σκοπός είναι η προστασία από καταπτώσεις μεμονωμένων τεμαχίων πετρώματος, χωρίς προσπάθεια αποτροπής της σύγκλισης της διατομής. Αυτή η περίπτωση προκύπτει γενικά για βραχόμαζα που, ενώ θραύεται, οι γεωτεχνικές της ιδιότητες είναι επαρκείς για τη συγκράτηση των παραμορφώσεων σε μικρές τιμές. Τα πλαίσια στην περίπτωση αυτή “προστατεύουν” και αποσκοπούν στην προστασία των εργαζομένων κατά την κατασκευή του έργου διαδραματίζοντας ένα δευτερεύοντα ρόλο στην υποστήριξη της περιβάλλουσας βραχόμαζας (Σχήμα 2.14). Η δεύτερη περίπτωση 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 λαμβάνουν ένα ποσό της πίεσης σταθεροποίησης. Σε αυτή τη 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, δικτυωτά πλαίσια τα οποία είναι ελαφρύτερα και αποτελούνται από ράβδους οπλισμού και συνδετήρες με τη μορφή χωροδικτυώματος και τέλος, συστοιχίες χαλύβδινων ράβδων οπλισμού σε παράλληλη διάταξη συνδεδεμένους με εγκάρσιους συνδετήρες (Καββαδάς, 2000).



Σχήμα 2.14: Υποστήριξη σήραγγας με χαλύβδινα πλαίσια (BASF, 2011)

2.3.4 Περιφερειακή πρότυπη

Η περιφερειακή πρότυπη (mechanical precut) είναι μία 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. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται κατά μήκος του τόξου της σήραγγας ένα συνεχές και λεπτό στρώμα σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή, συνήθως βρίσκεται εφαρμογή σε μαλακά πετρώματα καθώς και σε μαλακές έως μέτρια σκληρές αργίλους. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο της περιφερειακής πρότυπης φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Σε μια αλυσίδα κοπής, μήκους 150 έως 220 mm, εφαρμόζεται μια λεπίδα μήκους 5 m 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 (Σοφιανός, 2000).



Σχήμα 2.15: Μηχάνημα περιφερειακής πρότυπησης (Atlas Copco, 2000)

2.3.5 Μέθοδος Pretunnel

Η μέθοδος pretunnel αναπτύχθηκε για την κατασκευή μεγάλης διατομής σηράγγων σε δύσκολες εδαφικές συνθήκες. Ιστορικά μπορεί να θεωρηθεί ως η εξέλιξη της περιφερειακής πρότυπησης. Η σημαντική καινοτομία της μεθόδου αυτής βρίσκεται στο γεγονός ότι κατασκευάζεται η τελική επένδυση μπροστά από το μέτωπο πριν από την εκσκαφή. Με τον τρόπο αυτό εξαφανίζεται η ανάγκη προσωρινής υποστήριξης και δημιουργούνται ασφαλείς εργασιακές συνθήκες κατά την κατασκευή της σήραγγας. Η κατασκευή της τελικής επένδυσης σε μία φάση και μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής, έχει επίσης ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων στην επιφάνεια (Tonon et al., 2005).

Την παραπάνω δύο πιθανοί τύποι κατασκευής της μεθόδου pretunnel, η συνεχής και η μη συνεχής. Η συνεχής μέθοδος είναι η κλασική μέθοδος pretunnel. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι παρόμοιος με της μεθόδου περιφερειακής πρότυπησης σε μεγαλύτερη διάσταση (Tonon et al., 2005).

Κεφάλαιο 3

Επίλυση Προβλημάτων Ευστάθειας Σηράγγων με Αριθμητικές Μεθόδους

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

Η όρυξη σηράγγων, η εκσκαφή πρανών 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 την δημιουργία των έργων αυτών, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, 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 όπως εδάφη και πετρώματα (Αγιουτάντης, 2002).

Το μεγάλο πλεονέκτημα των αριθμητικών μεθόδων είναι η δυνατότητα διεξαγωγής αντίστροφης ανάλυσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ακρίβεια στην επίλυση του προβλήματος και επίτευξη των συνθηκών ασφαλείας με το μικρότερο οικονομικό κόστος. Αξίζει, όμως, να σημειωθεί ότι καμία από τις μεθόδους δεν θεωρείται κατάλληλη για την επίλυση του συνόλου των δυνατών προβλημάτων. Κάθε μέθοδος παρουσιάζει θετικά και αρνητικά στοιχεία ως προς την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος.

Έτσι, πολλές φορές, είναι απαραίτητος είτε ο συνδυασμός είτε η σύγκριση περισσότερων της μιας μεθόδων, για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος (Κωμοδρόμος, 1999).

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 (district element method).
- Έβριδικές μέθοδοι (hybrid methods), οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δυο ή περισσότερες μεθόδους.

Το κεφάλαιο αυτό περιέχει κυρίως με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την οποία και πραγματοποιήθηκε η επίλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1.1 Γενικά Στοιχεία της Μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διαφόρους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης που θεωρείται και "πατέρας" της μεθόδου, ο Clough, ο Ritz και άλλοι. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόσθηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού (Bathe, Hughes, 1996).

Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. Για προβλήματα κατασκευών όπως σηράγγων υπάρχει τώρα ένας ικανός αριθμός προγραμμάτων γενικής χρήσης και το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τις δυνατότητες της μεθόδου έχει οδηγήσει στην ραγδαία εξέλιξη και χρήση της τα τελευταία χρόνια (Bathe, Hughes, 1996).

3.1.2 Φιλοσοφία της Μεθόδου

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αρχικά, το σώμα διαιρείται σε σύνολο μικρότερων γεωμετρικών μορφών γνωστών ως “στοιχεία” ή elements. Τα στοιχεία αυτά ψεωρούνται συνδεδεμένα μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία τα οποία ονομάζονται “κόμβοι” (nodes). Η διαδικασία του διαμερισμού του σώματος σε μικρότερα στοιχεία ονομάζεται διακριτοποίηση (Αγιουτάντης, 2002).

Μετά 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 ολόκληρο το σώμα. Το σύστημα αυτό των εξισώσεων έχει την γενική μορφή:

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

Όπου $[K]$ είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, γνωστός με τον όρο μητρώο ακαμψίας του σώματος, το $\{U\}$ παριστάνει το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων στους κόμβους και το $\{F\}$ περιγράφει τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους (Fagan, 1996).

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 μία απλή διαδικασία. Η δυσκολία έγκειται στον μεγάλο αριθμό εξισώσεων που απαιτούνται για να περιγράψουν το μεγάλο αριθμό κόμβων. Κάποια προβλήματα για να περιγραφούν σωστά χρειάζονται πάνω από 50.000 εξισώσεις. Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη δημιουργία ειδικών λογισμικών 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 (Fagan, 1996).

3.1.3 Διαδικασία της Μεθόδου

Η διαδικασία που ακολουθείται σε μία ανάλυση με την 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 διαχριτοποίηση 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 το μελετητή.

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

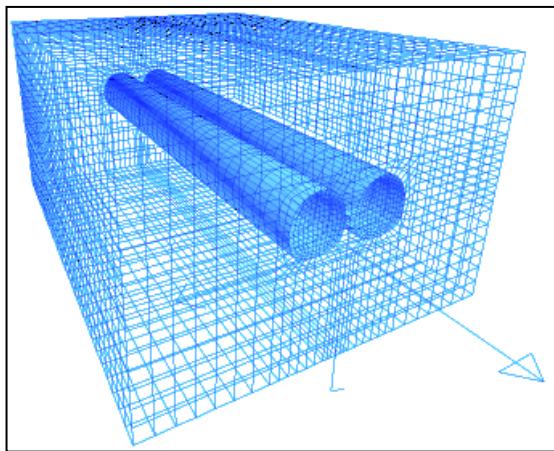
3.1.4 Διαχριτοποίηση

Η διαχριτοποίηση αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός της διαχριτοποίησης 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 (Σχήμα 3.1) Στην διαδικασία της διαχριτοποίησης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να προσφέρει όσο 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 την διάσταση η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε αυτή δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Η ανάλυση αυτών μπορεί να γίνει με τη μοντελοποίηση με ψεώρηση επίπεδης τάσης ή επίπεδης παραμόρφωσης.

Εκτός από την γεωμετρική απλοποίηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποιο σώμα που μελετάται, υπάρχει και απλοποίηση λόγω συμμετρίας. Υπάρχουν κυρίως τέσσερα είδη συμμετρίας που συναντώνται σε 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 (Αγιουτάντης, 2002).

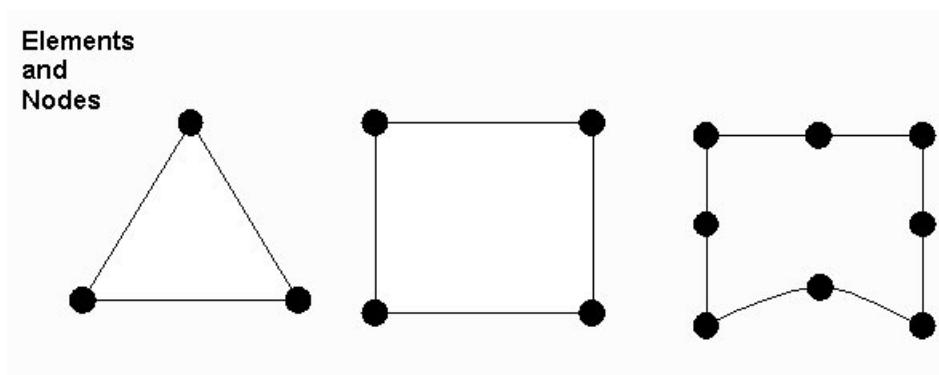


Σχήμα 3.1: Παράδειγμα διακριτοποίησης πεδίου γύρω από διπλή σήραγγα (Atlas Copcp, 2006)

3.1.5 Είδη και Αριθμός των 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 αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με καμπύλα ή ευθύγραμμα τμήματα (Σχήμα 3.2). Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους του πλέγματος ή κάνναβου διακριτοποίησης του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 3.2: Είδη γεωμετρίας στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά σε τρεις διαστάσεις.

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. Τύπων όμως και περιπτώσεις, όπου ένα στοιχείο περιγράφεται από παραπάνω κόμβους και προκύπτουν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ. (Αγιουτάντης, 2002).

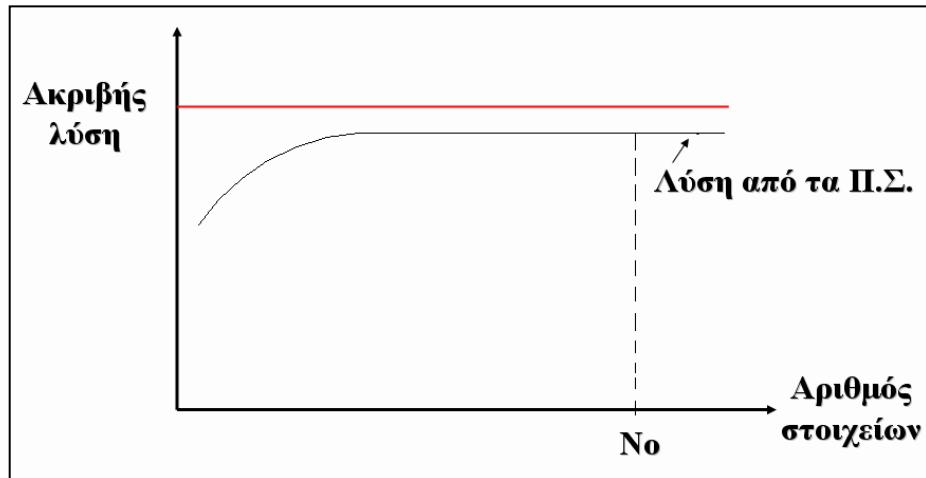
Ουσιαστικά, σε κάθε κόμβο αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο (π.χ δύναμη, τάση) και το αποτέλεσμα (π.χ. μετατόπιση, παραμόρφωση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος. Ο αριθμός βαθμών ελευθερίας ενός στοιχείου αναφέρεται στο σύνολο των άγνωστων μεταβλητών που αντιστοιχούνται σε κάθε στοιχείο.

Επίσης τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πώς συνδέεται η συμπεριφορά και κατ' επέκταση οι ιδιότητες τους με τα μεγέθη που αντιστοιχούνται στους κόμβους τους. Έτσι, ένα γραμμικό στοιχείο, το οποίο ουσιαστικά παριστάνει μία ράβδο με τις κατάλληλες ιδιότητες ανάλογα με το εξεταζόμενο πρόβλημα, μπορεί να έχει δύο ή περισσότερους κόμβους και 1,2,3 ή και περισσότερους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο ανάλογα με τη διάσταση του προβλήματος.

Τα επίπεδα στοιχεία μπορεί να παριστάνουν επιφάνειες σε δισδιάστατα ή τρισδιάστατα προβλήματα. Στις συνήθεις περιπτώσεις των προβλημάτων, κάθε κόμβος έχει δύο ή τρεις βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης του κόμβου.

Εάν οι κόμβοι μεταφέρουν ροπές, τότε οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο μπορεί να αυξηθούν κατά έναν στις δύο διαστάσεις και τρεις στις τρεις διαστάσεις. Στις γεωτεχνικές εφαρμογές, είναι συνήθης η εφαρμογή τριγωνικών ή τετραπλευρικών επίπεδων στοιχείων, τα οποία απεικονίζουν τμήματα υλικού, των οποίων η τρίτη διάσταση είναι μοναδιαία με την προϋπόθεση που είναι δυνατή μία τέτοια απλοποιητική παραδοχή (Αγιουτάντης, 2002).

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην διαχριτοποίηση του προβλήματος είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους της διαχριτοποίησης. Μεγάλος αριθμός στοιχείων κάνει ακριβέστερη την προσέγγιση στην λύση του προβλήματος, αυξάνει όμως και τον χρόνο υπολογισμού των εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα, οι οποίες είναι πολλαπλάσιες των κόμβων των στοιχείων. Για κάθε πρόβλημα, όμως, αποδεικνύεται ότι πέρα από κάποιον βέλτιστο αριθμό στοιχείων, η ακρίβεια της λύσης δεν αλλάζει σημαντικά με την περαιτέρω αύξηση των στοιχείων (Σχήμα 3.3). Έτσι σε κάθε πρόβλημα ξεχωριστά προσδιορίζεται ο βέλτιστος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων που θα δώσει την ακριβέστερη λύση (Εξαδάκτυλος, 2006).



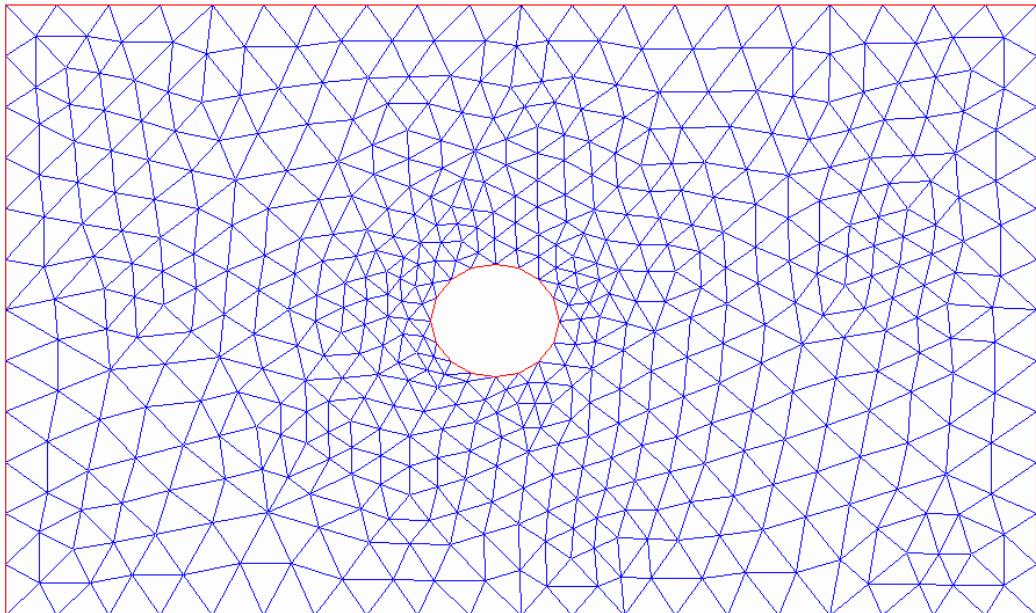
Σχήμα 3.3: Γραφική παράσταση της ακρίβειας της λύσης συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.1.6 Χαρακτηριστικά της Διαίρεσης του Πεδίου

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

1. Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου.
2. Την επιλογή του αριθμού των κόμβων του στοιχείου.
3. Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου.
4. Την επιλογή της πυκνότητας του κάνναβου.

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 (Σχήμα 3.4). Για παράδειγμα, στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις, συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν, αναλόγως με τις απαιτήσεις του προβλήματος να αυξηθούν οι κόμβοι σε ένα στοιχείο και να χρησιμοποιηθούν τετραπλευρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους. Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία που 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 (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 3.4 : Διαβάθμιση των στοιχείων στο πεδίο (Εξαδάκτυλος, 2006)

3.1.7 Συναρτήσεις Μορφής

Οι συναρτήσεις μορφής εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο, συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους και ορίζουν τη μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων στη γεωμετρία κάθε στοιχείου. Οι συναρτήσεις μορφής μπορούν να παρουσιαστούν με συναρτήσεις επιρροής κάθε κόμβου προς το περιβάλλον του. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις υπολογισμού των λεγόμενων ισοχαμπούλων (π.χ. ισοϋψών, ισοπαχών, κλπ), με βάση τις τιμές της μεταβλητής σε δεδομένα σημεία, υπάρχουν διαφορετικές συναρτήσεις τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιήσει ο ερευνητής, για να εκφράσει την επιρροή κάθε σημείου στον περιβάλλοντα χώρο του.

Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να είναι είτε γραμμικές είτε μη γραμμικές. Στις περιπτώσεις στοιχείων με ισάριθμες ακμές και κόμβους εφαρμόζονται χυρίως γραμμικές συναρτήσεις ενώ, όταν ο αριθμός των κόμβων υπερβαίνει τον αριθμό των ακμών ενός στοιχείου, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μη γραμμικές. Ο υπολογισμός ή η επιλογή των συναρτήσεων μορφής μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε εμπειρικά (με επισκόπηση, με δοκιμή και λάθος κλπ) ή με επίλυση αριθμητικών συστημάτων (Fagan, 1996).

3.1.8 Φόρτιση των Υλικών και Συνοριακές Συνθήκες

Μετά την διαίρεση του πεδίου 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 τιμών ενώ, 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 μειωθούν κατά το ήμισυ οι πράξεις και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος (Αγιουτάντης, 2002).

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

1. Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου (βαρυτικές δυνάμεις).
2. Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις).
3. Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις).
4. 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 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 και αντιστρόφως.

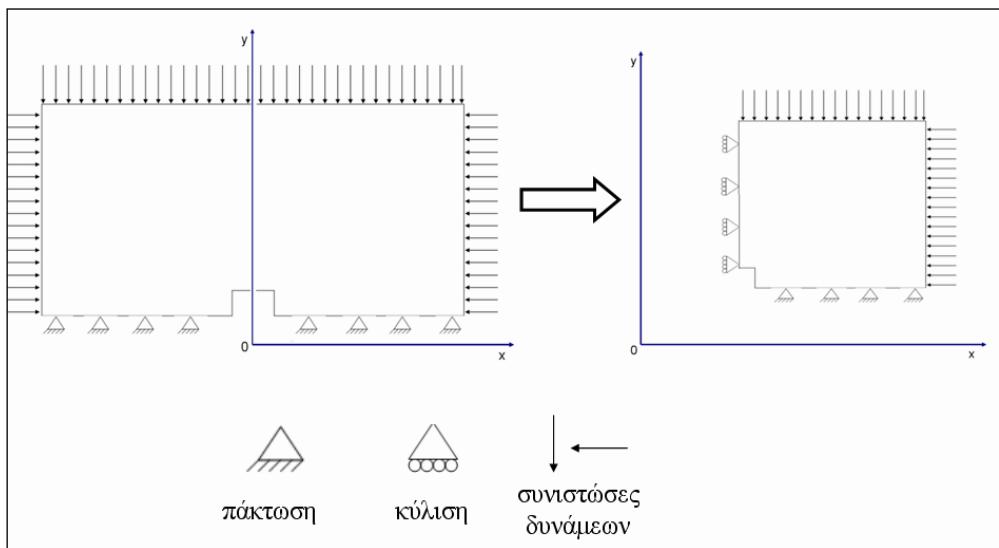
Η αξιοποίηση της συμμετρίας, όπως προαναφέρθηκε, και η κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, δύναται να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των στοιχείων, κατά συνέπεια και των κόμβων στο πεδίο, με αποτέλεσμα να μειωθεί αισθητά ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος (Σχήμα 3.5).

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

3.1.9 Τύποι Συνοριακών Συνθηκών

Τηρούνται τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών:

1. Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές (geometric or forced boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Dirichlet.
2. 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.
3. Προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.



Σχήμα 3.5: Επιβολή συνοριακών συνθηκών σε μοντέλο σήραγγας και αξιοποίηση της συμμετρίας ως προς τον άξονα των y (Εξαδάκτυος, 2006)

3.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών

3.2.1 Γενικά Στοιχεία της Μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπήρξε η πρώτη αριθμητική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση προβλημάτων αντοχής κατασκευών. Η πρώτη εφαρμογή σε προβλήματα χρονολογείται από το 1921, όταν ο Hencky επέλυσε τις εξισώσεις ορθογωνίων ελασμάτων στο πεδίο των μεγάλων μετατοπίσεων. Η σημασία της μεθόδου είχε αναγνωρισθεί από τότε αλλά μόνο με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά την μεταπολεμική περίοδο άρχισε να βρίσκει ευρεία εφαρμογή.

Οι λύσεις που αποκτώνται δεν έχουν την απόλυτη ακρίβεια των αναλυτικών λύσεων καθόσον σύμφωνα με την βασική παραδοχή της μεθόδου η κατασκευή που είναι ένα συνεχές μέσο αντικαθίσταται από ένα αντίστοιχο διακριτό, στους κόμβους του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας.

Η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης εξαρτάται λοιπόν από το κατά πόσο η προσομοίωση προσεγγίζει τις αναλυτικές εξισώσεις ισορροπίας (Caridis, 2000).

Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ζητείται ο υπολογισμός των αγνώστων μεγεθών στους κόμβους, οι οποίοι δημιουργούνται από την διαίρεση του πεδίου σε νοητά στοιχεία. Σε αντιδιαστολή δηλαδή με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το πεδίο δεν διαιρείται σε στοιχεία, αλλά ορίζονται κόμβοι πάνω σε αυτό, οι οποίοι καλύπτουν όλο το πεδίο ορισμού των ζητούμενων μεγεθών. Στη συνέχεια, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τιμή των ζητούμενων αυτών μεγεθών σε κάθε κόμβο του πεδίου, με την θεώρηση κατάλληλων συναρτήσεων, οι οποίες συνδέουν τα ζητούμενα μεγέθη στους κόμβους του πεδίου (Αγιουτάντης, 2002).

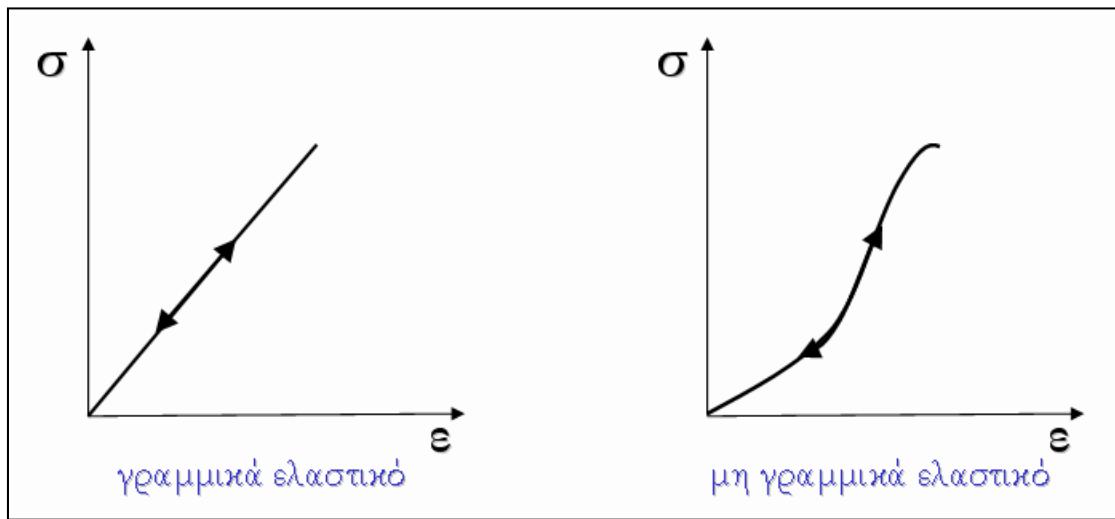
Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μεθόδου είναι η συμπεριφορά του υλικού και η πύκνωση των κόμβων. Όταν χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι οι παράγωγοι εκφράζονται με σχέσεις διαφορών των συναρτήσεων σε καθορισμένα διαστήματα (στο χώρο ή και στο χρόνο). Σε κάθε κόμβο η εξίσωση ισορροπίας εκφράζεται σε μορφή πεπερασμένων διαφορών. Σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες, ορίζεται σύστημα εξισώσεων για τις επί μέρους λύσεις της εξίσωσης ισορροπίας στους κόμβους. Η αντιστροφή του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας γίνεται εύκολα με έτοιμες διαδικασίες σε μικρό-υπολογιστές (απαλοιφή κατά Gauss, Gauss-Seidel, κλπ) (Caridis, 2000).

3.2.2 Συνοριακές Συνθήκες της Μεθόδου

Για να είναι δυνατή η επίλυση των προβλημάτων αυτών, πρέπει να εφαρμοστούν είτε συνοριακές συνθήκες, είτε αρχικές συνθήκες. Οι αρχικές αποτελούν ουσιαστικά συνοριακές συνθήκες οριακής κατάστασης στον χώρο και στον χρόνο. Μετά την εφαρμογή των συνθηκών αυτών, είναι δυνατή η κατάστρωση του συστήματος των εξισώσεων από την επίλυση των οποίων θα προκύψουν οι άγνωστες μεταβλητές στους κόμβους του πεδίου (Αγιουτάντης, 2002)

3.3 Ελαστική και Ελαστοπλαστική Συμπεριφορά Υλικών

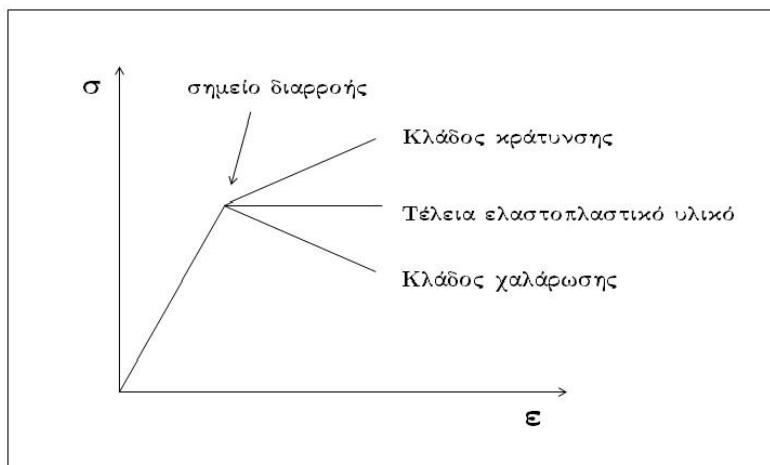
Η ελαστική συμπεριφορά στα υλικά περιγράφεται σε διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης σαν γραμμική ή μη γραμμική (Σχήμα 3.6). Η εντατική κατάσταση είναι τέτοια ώστε για οποιαδήποτε επιβολή τάσης σε αυτά τα όρια, το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά και ως εκ τούτου δεν εμφανίζει μόνιμες παραμορφώσεις.



Σχήμα 3.6: Τύποι ελαστικής συμπεριφοράς υλικού (Εξαδάκτυλος, 2006)

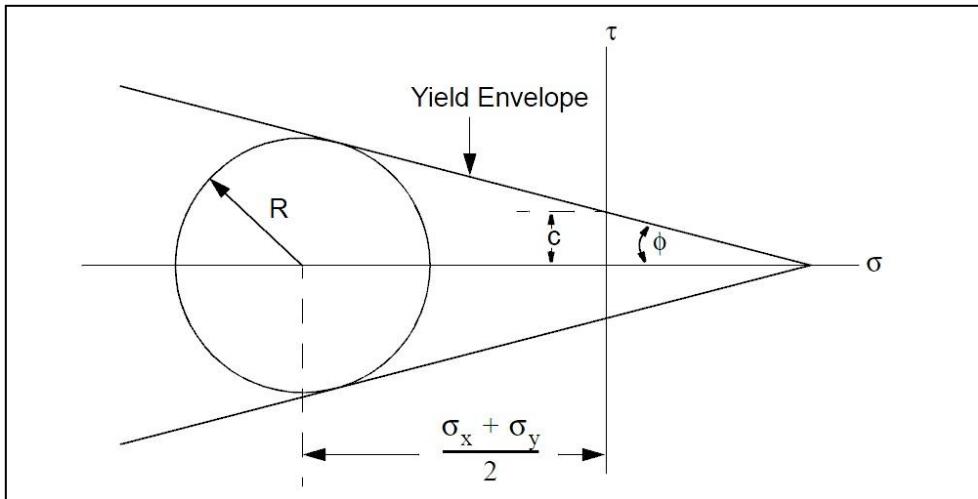
Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από έναν γραμμικά ή μη γραμμικά ελαστικό κλάδο, και έναν πλαστικό κλάδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Όταν η εντατική κατάσταση του υλικού αντιπροσωπεύεται από τον ελαστικό κλάδο, τότε το υλικό παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά.

Όταν, όμως, η εντατική κατάσταση υπερβεί το σημείο διαρροής του υλικού (yield point), τότε αρχίζει η εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων. Επίσης, ένα πέτρωμα ή γεωυλικό μπορεί να μην χαρακτηρίζεται από τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά, αλλά στον κλάδο, μετά το σημείο διαρροής, να παρουσιάζει είτε κράτυνση (strain hardening) είτε χαλάρωση (strain softening) (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 3.7: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού (Αγιουτάντης, 2002)

Το κριτήριο Mohr – Coulomb είναι ένα ευρέως ελαστοπλαστικό κριτήριο αντοχής. Στην πιο απλή μορφή του το κριτήριο αυτό παρίσταται ως ευθεία τ , σ (Σχήμα 3.8)



Σχήμα 3.8: Κριτήριο Αστοχίας σε άξονες τ, σ

Πολλές εφαρμογές απαιτούν μη γραμμικών μορφών του Mohr – Coulomb όπως για παράδειγμα παραβολική περιβάλλουσα. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούν το γραμμικό κριτήριο Mohr – Coulomb που εξαρτάται από δύο παραμέτρους: την συνοχή (c) και την γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) (Σχήμα 3.8). Σημειώνεται ότι όταν το κριτήριο αυτό εφαρμόζεται σε αριθμητικούς κώδικες επίλυσης τότε είναι δυνατόν αντί των παραμέτρων c , ϕ να ζητούνται διαφορετικές παράμετροι. (MSC. Software Corporation, 2000)

Στην περίπτωση του λογισμικού πακέτου MSC. Marc ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει της παραμέτρους $\bar{\sigma}$, α ως συνάρτηση των παραμέτρων c και ϕ με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c = \frac{\bar{\sigma}}{[3(1 - 12\alpha^2)]^{1/2}} ; \quad \frac{3\alpha}{(1 - 3\alpha^2)^{1/2}} = \sin\phi$$

Κεφάλαιο 4

Μοντέλα – Αποτελέσματα

4.1 Γεωμετρία των Μοντέλων

Αρχικά, για την παραμετρική διερεύνηση της εντατικής κατάστασης κατά την διάνοιξη της σήραγγας με το λογισμικό MSC.Marc, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα παρόμοιας γεωμετρίας, το ένα χωρίς υποστήριξη και το άλλο με υποστήριξη με την χρήση κοχλιών. Έτσι μπορεί να συγχριθεί η διαφορά στις μετατοπίσεις και τις τάσεις που λαμβάνει η σήραγγα με ή χωρίς υποστήριξη κοχλιών. Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν και η παραμετρική τους ανάλυση θα παρουσιαστούν εκτενέστερα παρακάτω.

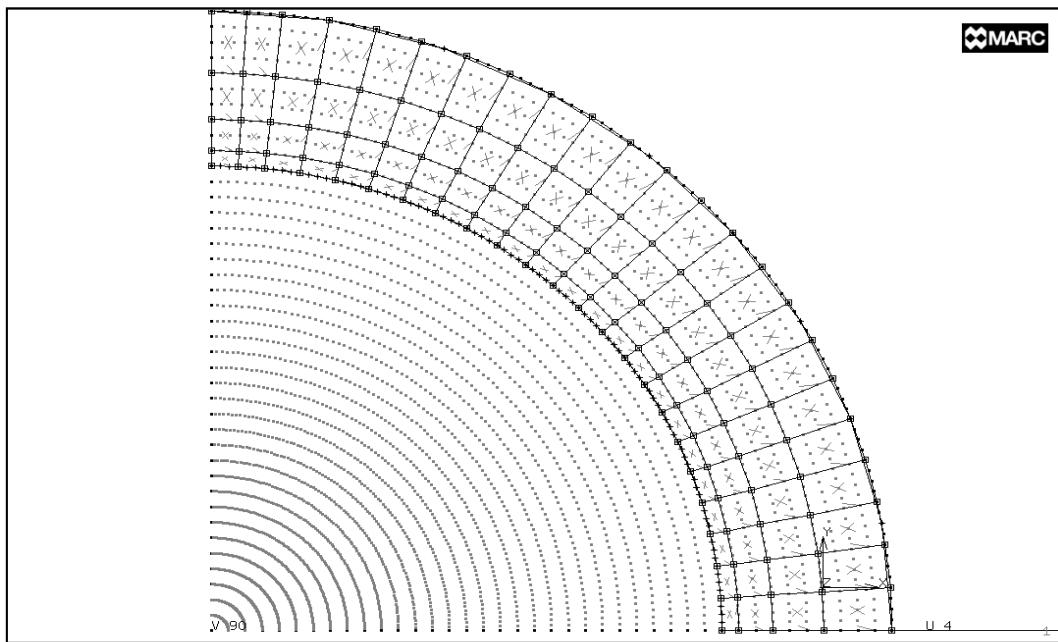
4.1.1 Γεωμετρία και Ιδιότητες Μοντέλου χωρίς Υποστήριξη

Στο πρώτο μοντέλο, που κατασκευάστηκε για την επίλυση του προβλήματος, δεν χρησιμοποιήθηκε υποστήριξη και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

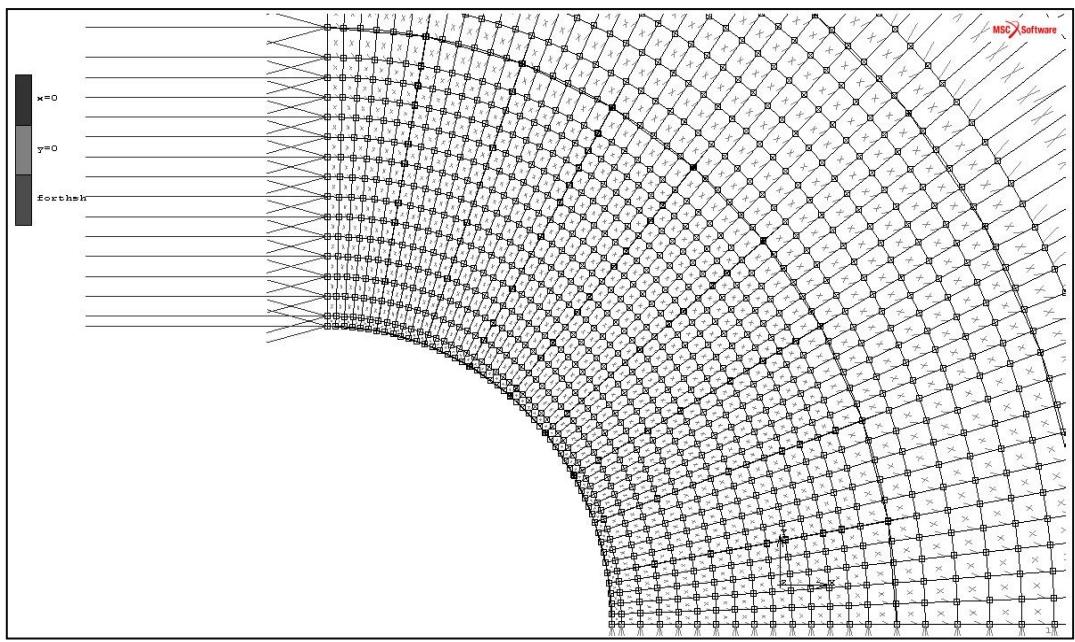
Πίνακας 4.1: Παράμετροι μοντέλου

Υψος	18m
Πλάτος	18m
Ακτίνα Σήραγγας	3m
γ	20kN/m ³
Στοιχεία	1997
Κόμβοι	2091
E	500MPa
v	0.3

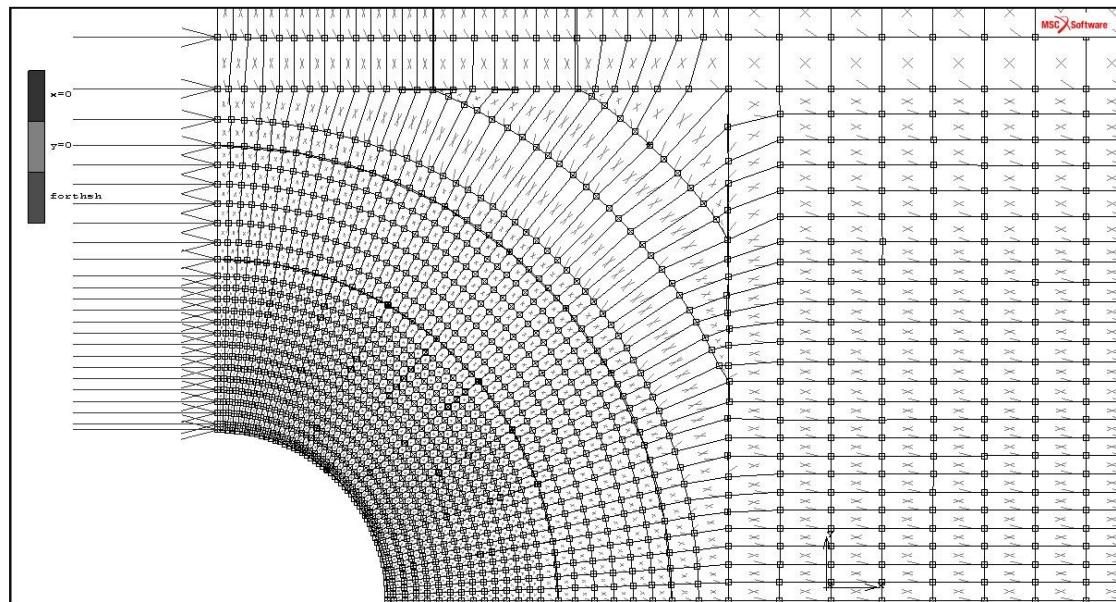
Έτσι, το ύψος του μοντέλου είναι 18m, πλάτος του είναι 18m και η ακτίνα της σήραγγας που εξιρύσσεται είναι 3m. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, η σήραγγα έχει κατασκευαστεί σαν τεταρτοκύκλιο. Αυτό έγινε λόγω της συμμετρίας του μοντέλου και ως εκ τούτου για τη μείωση των στοιχείων του μοντέλου, άρα και την επίτευξη ταχύτερης επίλυσης του. Η διακριτοποίηση του μοντέλου φαίνεται στα σχήματα 4.2 και 4.4 βήμα προς βήμα.



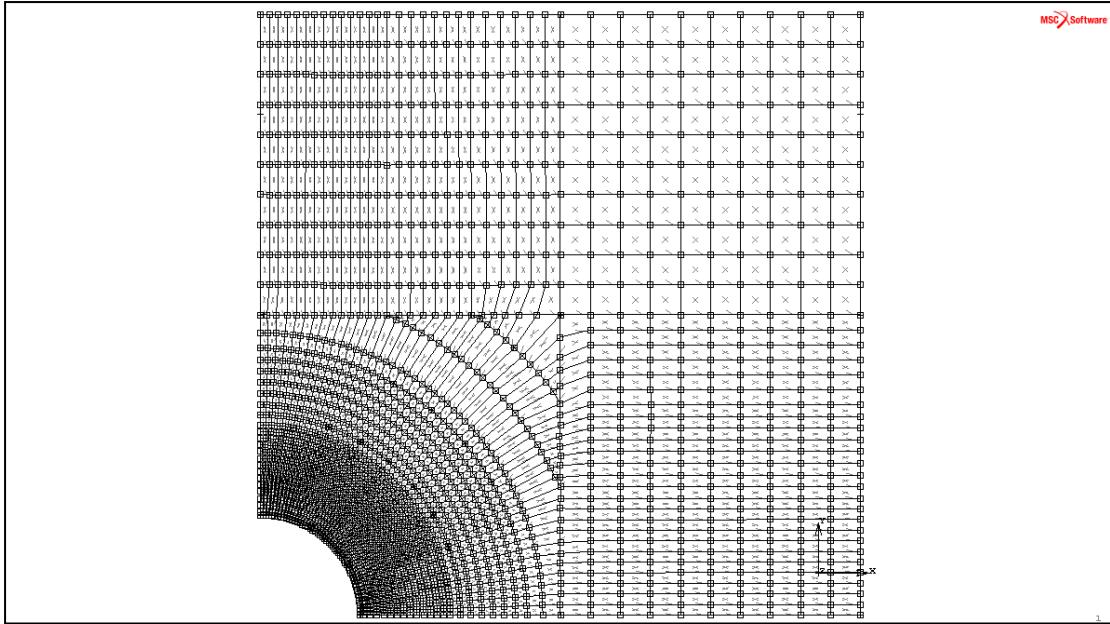
Σχήμα 4.1: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης στο όριο της σήραγγας (Βήμα 1)



Σχήμα 4.2: Λεπτομέρεια διαχριτοποίησης (Βήμα 2)



Σχήμα 4.3: Λεπτομέρεια διαχριτοποίησης (Βήμα 3)



Σχήμα 4.4: Συνολική διακριτοποίηση μοντέλου (Βήμα 4)

Το μοναδιαίο βάρος του πετρώματος είναι $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. 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 18m. Οπότε είναι $\sigma_v = 360 \text{ kPa}$ ή 0.36 MPa . Η φόρτιση αυτή, επιβάλλεται στο μοντέλο σταδιακά, με την χρήση ενός πίνακα, σε δέκα στάδια. Η πλευρική φόρτιση θεωρήθηκε μηδενική καθώς θα επηρέαζε ελάχιστα την επίλυση του προβλήματος.

Η επίλυση του μοντέλου έγινε με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης (plain 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 $\epsilon_z = 0$) 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). Για την επίλυση του μοντέλου τελικά, επιλέχτηκε μία “φέτα” από την σήραγγα η οποία έχει πάχος (thickness) ίσο με 1m.

4.1.2 Γεωμετρία και Ιδιότητες Μοντέλου με Υποστήριξη Κοχλιών

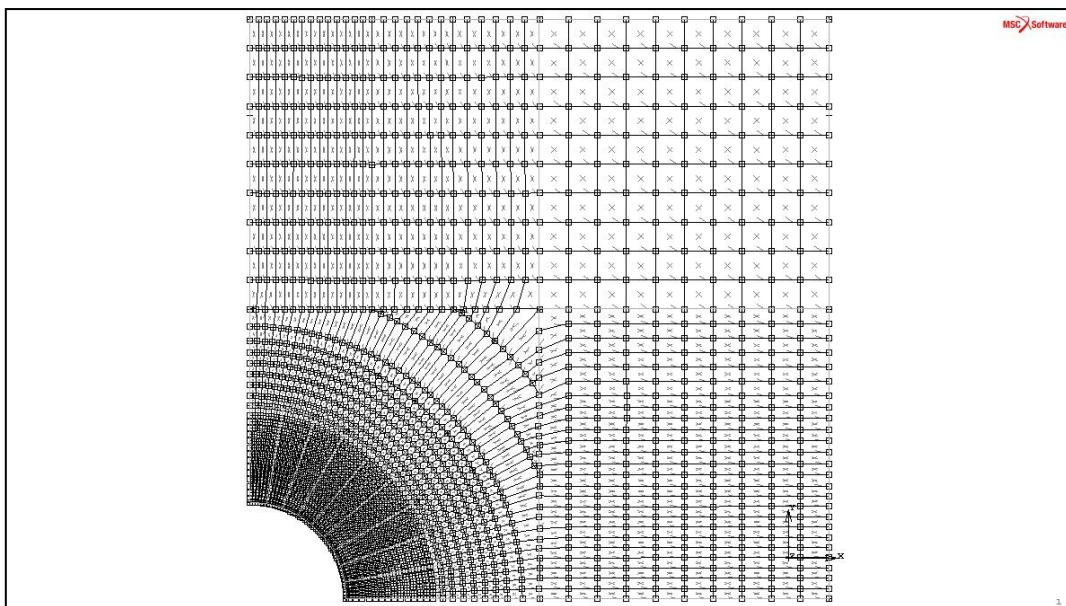
Στο επόμενο μοντέλο που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε υποστήριξη κοχλιών και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι του ελαστικού μοντέλου με κοχλίες

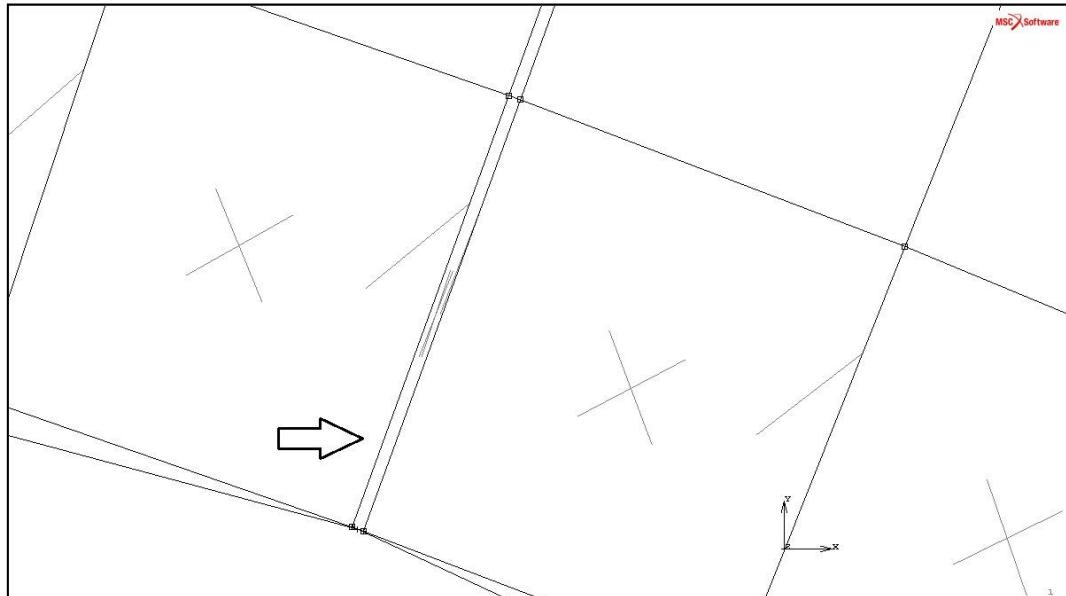
Τύπος	18m
Πλάτος	18m
Ακτίνα Σήραγγας	3m
γ	20 kN/m ⁸
Στοιχεία	1997
Κόμβοι	2091
E	500MPa
v	0.3
Κοχλίες	
E	210GPa
v	0.3
Μήκος	3m
Πάχος	0.025m

Το μοντέλο με την υποστήριξη κοχλιών έχει αριθμός την ίδια γεωμετρία με το προηγούμενο μοντέλο, μόνο που αυτό έχει επιπλέον 9 κοχλίες περιμετρικά της σήραγγας με απόσταση 0.5m ο ένας από τον άλλο. Ο κάθε κοχλίας έχει μήκος 3m και πάχος 0.025m. Το μέτρο ελαστικότητας του κάθε κοχλία είναι 210MPa.

Για την κατασκευή του μοντέλου αυτού χρησιμοποιήθηκαν 1997 στοιχεία (elements) τύπου (3) που είναι τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό MSC.Marc για επίλυση με παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης όπως στην προκειμένη περίπτωση. Η συνολική διαχριτοποίηση του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 4.5 και η λεπτομέρεια του κοχλία στο Σχήμα 4.6. Στην επαφή του πετρώματος με τους κοχλίες ωστε μπορούσε να χρησιμοποιηθούν τα λεγόμενα στοιχεία επαφής ή contact elements για να μελετηθεί καλύτερα η επαφή πετρώματος – κοχλία αλλά το μοντέλο ωστε χρειαζόταν πολύ περισσότερο χρόνο για να “τρέξει” οπότε δεν χρησιμοποιήθηκαν τέτοια στοιχεία.



Σχήμα 4.5 : Διαχριτοποίηση μοντέλου με κοχλίες

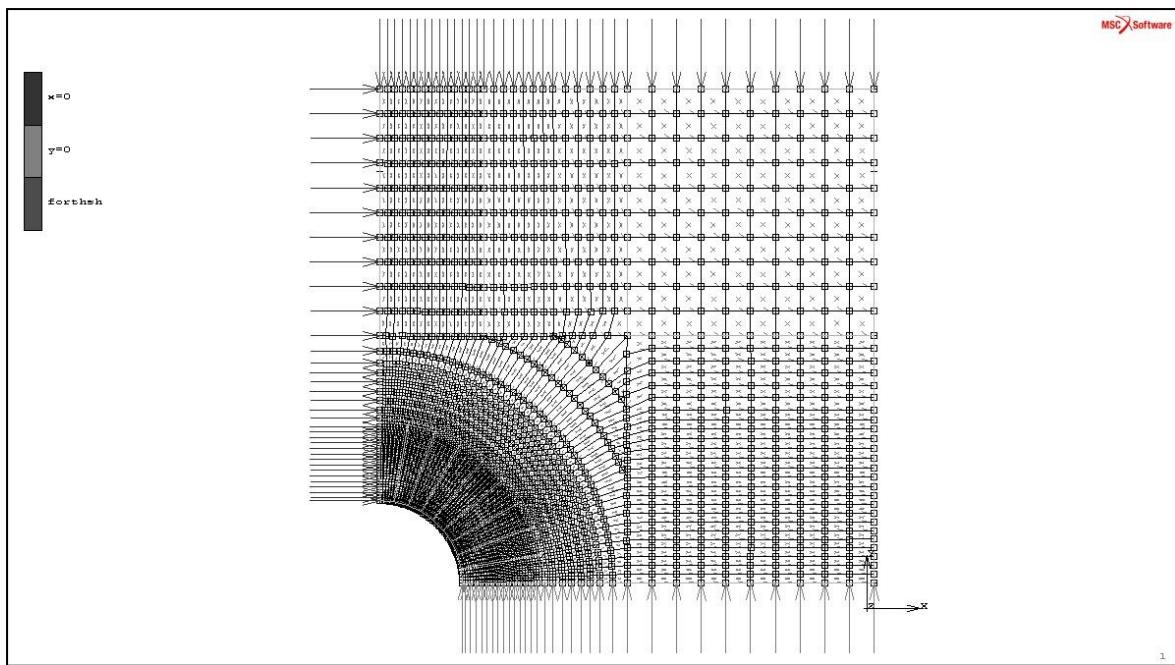


Σχήμα 4.6: Λεπτομέρεια διαχριτοποίησης στον κοχλία

4.2 Συνοριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες που τέθηκαν (Σχήμα 4.5) είναι κοινές και στα δύο μοντέλα καθώς η μοναδική διαφορά που έπρεπε να έχουν τα δύο μοντέλα ήταν η υποστήριξη από τους κοχλίες. Έτσι οι συνθήκες που εφαρμόστηκαν είναι οι εξής:

- Επιβολή φόρτισης άνω επιφάνειας (edge load) με $\sigma_v = 360\text{kPa}$
- Κύλιση στον άξονα X ($dy = 0$)
- Κύλιση στον άξονα Y ($dx = 0$)



Σχήμα 4.5: Συνοριακές συνθήκες που τέθηκαν στο μοντέλο

Η κατακόρυφη φόρτιση που τέθηκε στο σώμα έγινε με ομοιόμορφο τρόπο καθώς χρησιμοποιήθηκε πίνακας με εκατό στάδια φόρτισης ο οποίος συμβάλει ώστε να μην δέχεται κατευθείαν ολόκληρη την φόρτιση το μοντέλο.

Σε μία δεύτερη σειρά επιλύσεων μερικά μοντέλα έτρεξαν με μία επιπλέον, συνοριακή συνθήκη πλευρικής φόρτισης η οποία χρησιμοποιήθηκε μοντέλα με υποστήριξη και χωρίς υποστήριξη για να διαπιστωθεί η διαφορά που προκαλεί. Η πλευρική φόρτιση που τέθηκε είναι το 1/3 της κατακόρυφης φόρτισης.

4.3 Παραμετρική Ανάλυση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι παράμετροι των μοντέλων που κατασκευάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκαν δέκα ελαστικά μοντέλα, με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, τα πέντε από αυτά χωρίς υποστήριξη και τα άλλα πέντε με υποστήριξη κοχλιών. Ακόμα δημιουργήθηκαν άλλα δέκα ελαστο-πλαστικά μοντέλα, με το κριτήριο Mohr-Coulomb, με και χωρίς υποστήριξη.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι των πρώτων πέντε μοντέλων χωρίς κοχλιώση.

Πίνακας 4.3: Παράμετροι ελαστικών μοντέλων χωρίς υποστήριξη

Όνομα	E(MPa)	v
M500NK	500	0.3
M1000NK	1000	0.3
M5000NK	5000	0.3
M10000NK	10000	0.3
M20000NK	20000	0.3

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι παράμετροι των πρώτων πέντε μοντέλων με κοχλίωση.

Πίνακας 4.4: Παράμετροι ελαστικών μοντέλων με κοχλίωση

Όνομα	E(MPa)	v
M500K	500	0.3
M1000K	1000	0.3
M5000K	5000	0.3
M10000K	10000	0.3
M20000K	20000	0.3

Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι παράμετροι των πέντε ελαστο-πλαστικών μοντέλων με κοχλίωση.

Πίνακας 4.5: Παράμετροι ελαστο-πλαστικών μοντέλων με κοχλίωση

Όνομα	E(MPa)	v	c	φ (deg)	α	σ̄
M500MCK	500	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M1000MCK	1000	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M5000MCK	5000	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M10000MCK	10000	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M20000MCK	20000	0.3	0.07	40	0.201	0.087

Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι παράμετροι των πέντε ελαστο-πλαστικών μοντέλων χωρίς κοχλίωση.

Πίνακας 4.5: Παράμετροι ελαστο-πλαστικών μοντέλων με κοχλίωση

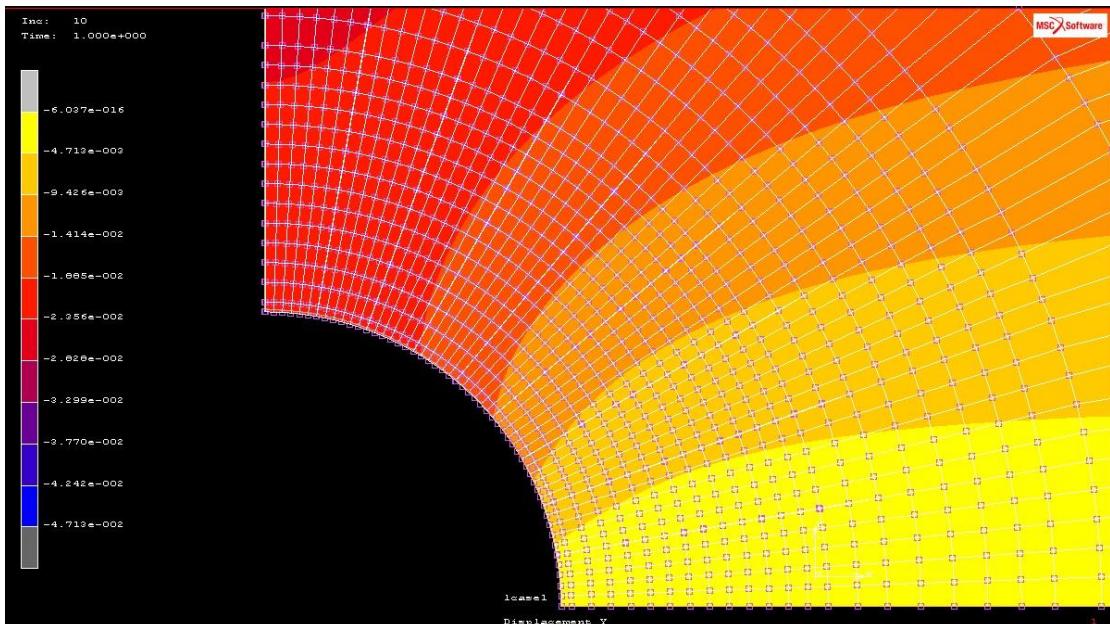
Όνομα	E(MPa)	v	c	φ (deg)	α	$\bar{\sigma}$
M500MCNK	500	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M1000MCNK	1000	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M5000MCNK	5000	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M10000MCNK	10000	0.3	0.07	40	0.201	0.087
M20000MCNK	20000	0.3	0.07	40	0.201	0.087

4.4 Αποτελέσματα

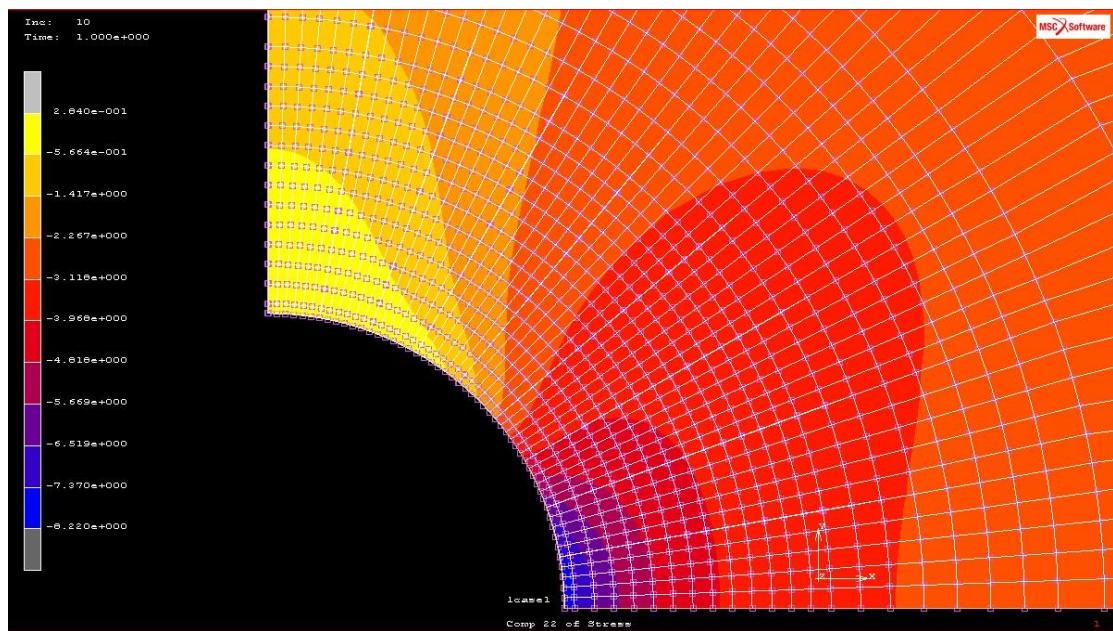
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας και θα γίνει η σύγκριση των μοντέλων μέσα από κατανομές τάσης, παραμόρφωσης, μετατόπισης και από συγκεντρωτικά διαγράμματα.

Αρχικά θα παρουσιαστούν οι κατανομή της κατακόρυφης τάσης, παραμόρφωσης και μετατόπισης για τα ελαστικά μοντέλα με την υποστήριξη κοχλιών ή χωρίς υποστήριξη. Οι κατανομές αντιστοιχούν στο μοντέλο με πέτρωμα το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας $E = 1000 \text{ MPa}$ αλλά είναι παρόμοιες και για τα υπόλοιπα μοντέλα.

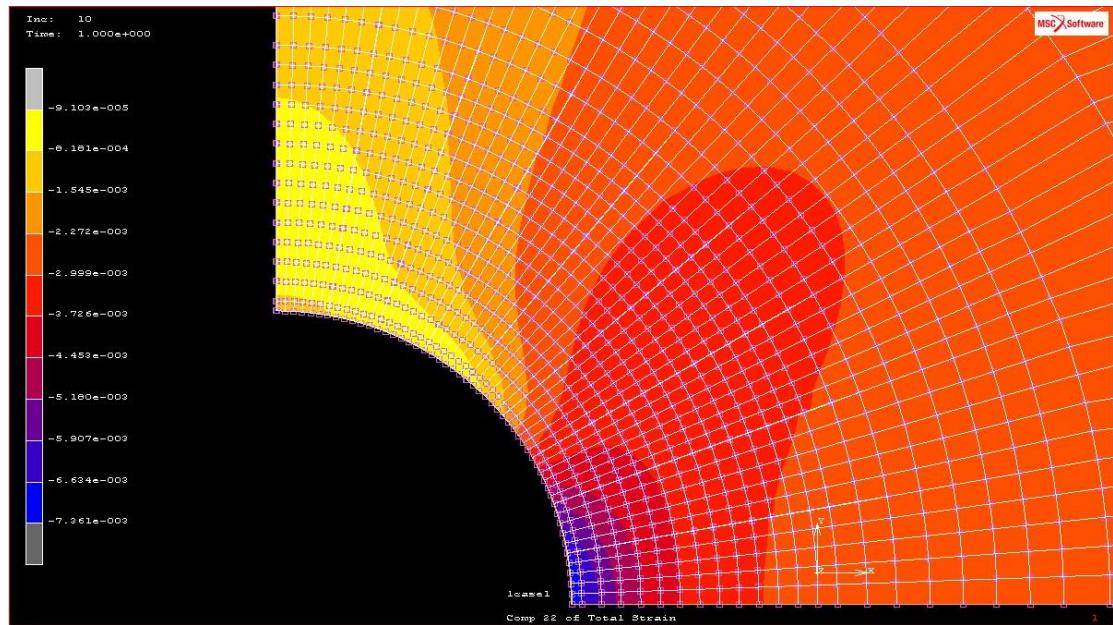
Για το μοντέλο χωρίς υποστήριξη οι χρωματικές κατανομές είναι οι εξής:



Σχήμα 4.6: Κατανομή κατακόρυφης μετατόπισης χωρίς υποστήριξη με κοχλίες



Σχήμα 4.7: Κατανομή κατακόρυφης τάσης χωρίς υποστήριξη με κοχλίες

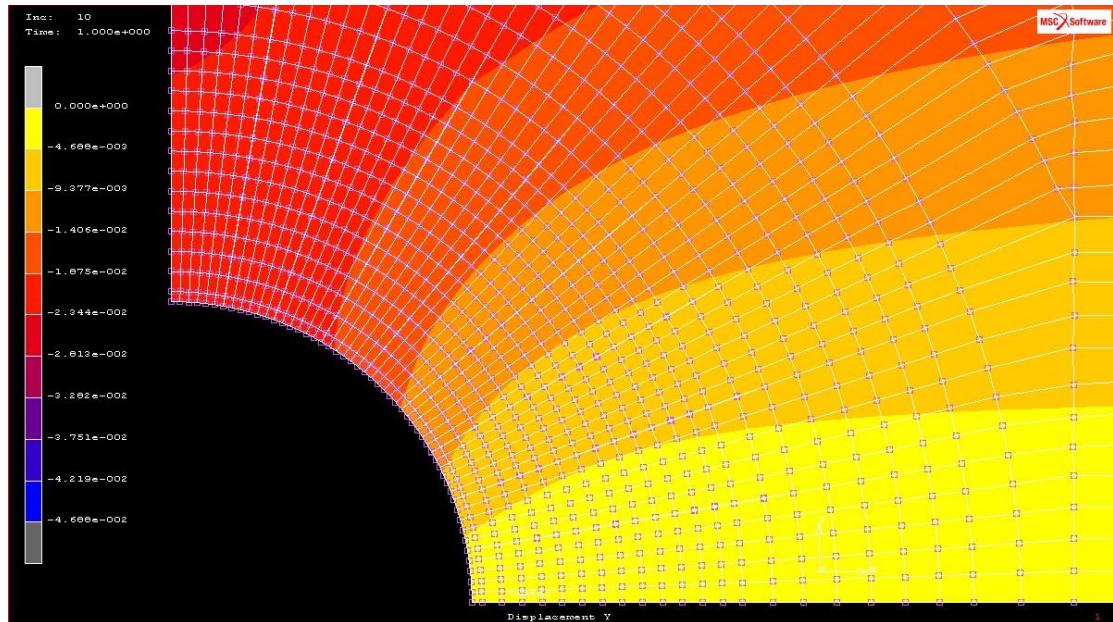


Σχήμα 4.8: Κατανομή κατακόρυφης παραμόρφωσης χωρίς υποστήριξη με κοχλίες

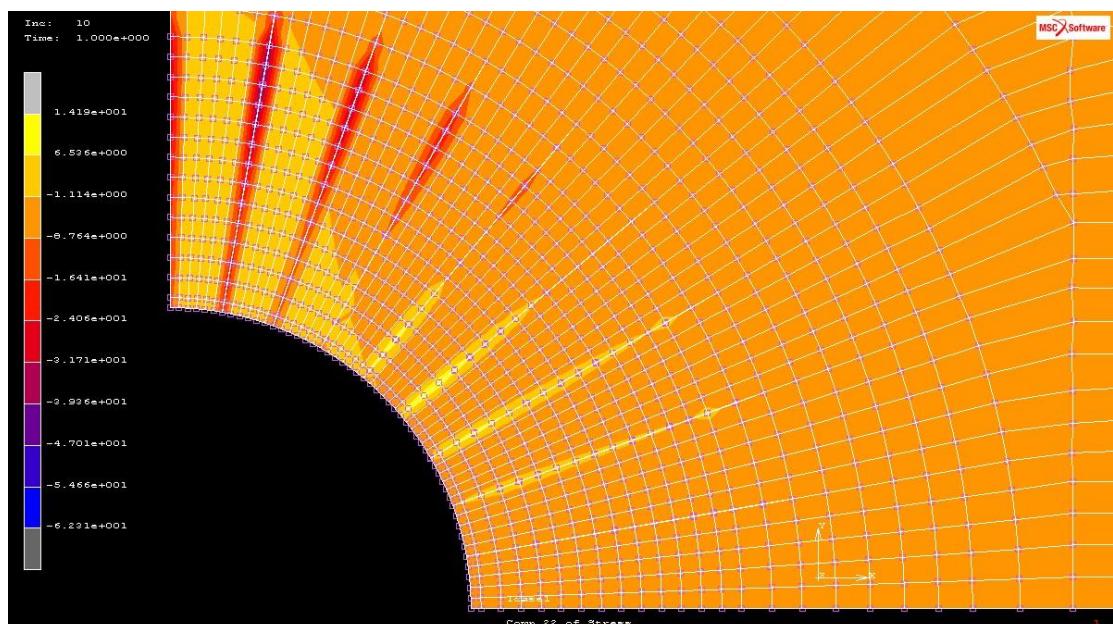
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.6 έως 4.8, την μεγαλύτερη καταπόνηση την δέχεται το κάτω όριο του ανοίγματος καθώς εκεί ασκείται η μεγαλύτερη θλιπτική τάση δημιουργώντας έτσι μέγιστη παραμόρφωση κατά τον οριζόντιο άξονα X.

Ακόμα η κατακόρυφη μετατόπιση στο κάτω όριο του ανοίγματος είναι μηδενική, ενώ μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση παρατηρείται στο άνω άκρο του ανοίγματος.

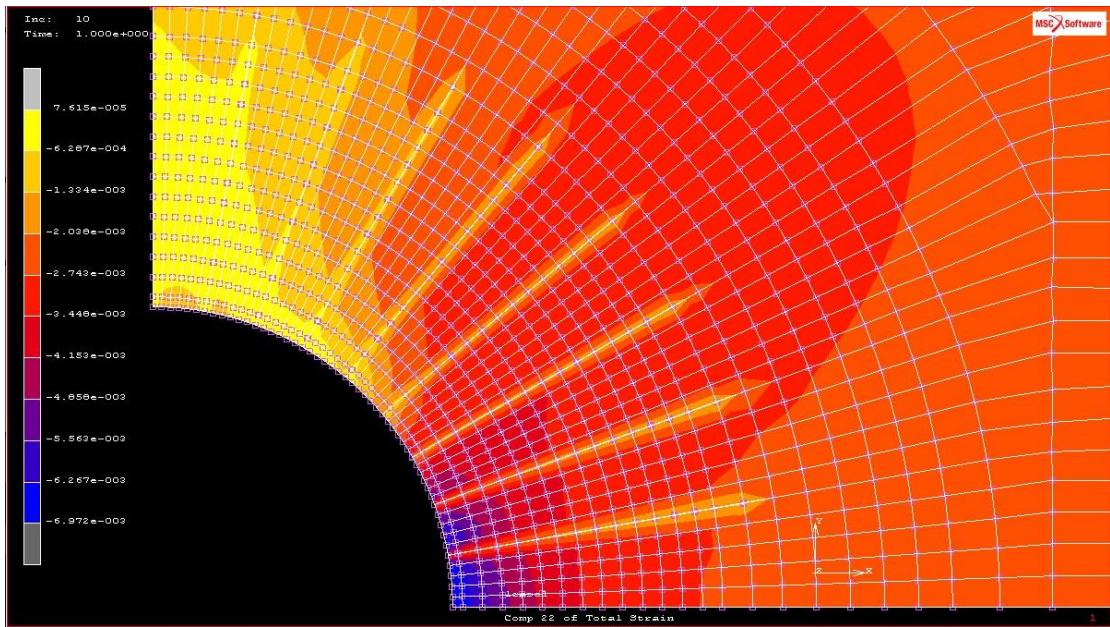
Για το μοντέλο με υποστήριξη κοχλιών οι χρωματικές κατανομές είναι οι εξής:



Σχήμα 4.9: Κατανομή κατακόρυφης μετατόπισης με υποστήριξη κοχλιών



Σχήμα 4.10: Κατανομή κατακόρυφης τάσης με υποστήριξη κοχλιών

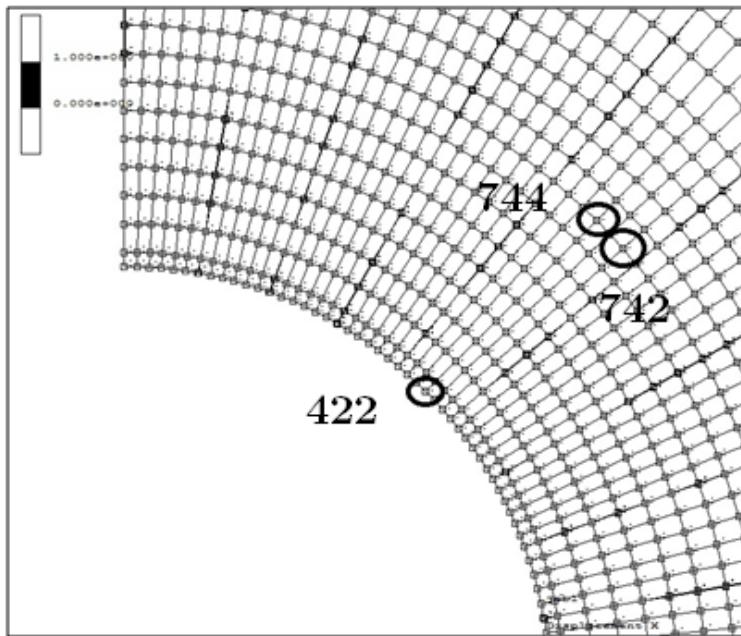


Σχήμα 4.11: Κατανομή κατακόρυφης παραμόρφωσης με υποστήριξη κοχλιών

Στα σχήματα 4.9 έως 4.11 παρατηρείται πως η χρήση κοχλιών μειώνει αισθητά τις μετατοπίσεις, τις τάσεις και τις παραμορφώσεις γύρω από το όριο του ανοίγματος της σήραγγας. Οι τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερες στους κοχλίες και γύρω από αυτούς με αποτέλεσμα το πέτρωμα να δέχεται λιγότερη καταπόνηση.

4.6 Σύγκριση – Αξιολόγηση

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά διαγράμματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μοντέλων. Για την λήψη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τρεις κόμβοι ελέγχου (control nodes) (Σχήμα 4.12), ο πρώτος κόμβος 422 στο όριο του ανοίγματος, ο δεύτερος κόμβος 744 μεταξύ δύο κοχλιών και ο τρίτος κόμβος 722 δίπλα στον κοχλία και σε απόσταση 1,5m από το όριο του ανοίγματος. Από αυτούς τους κόμβους εξάγονται τα δεδομένα για να κατασκευαστούν τα διαγράμματα που ονομάζονται History plot. Αρχικά γίνεται σύγκριση για τα ελαστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν και γίνεται μελέτη της κατακόρυφης μετατόπισης, κατακόρυφης τάσης και παραμόρφωσης για κάθε στάδιο φόρτισης.

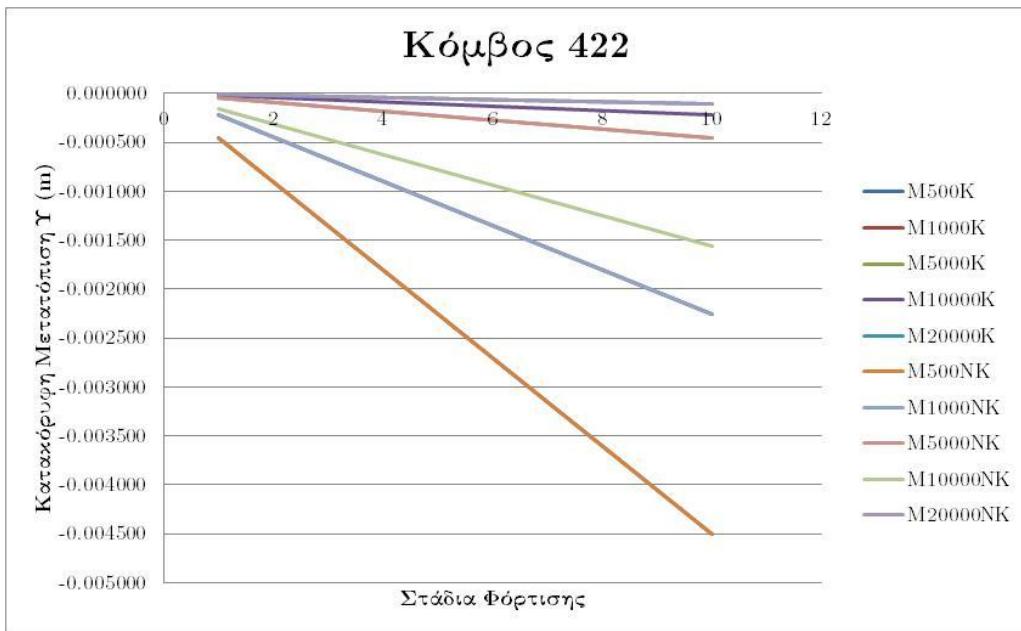


Σχήμα 4.12: Κόμβοι ελέγχου (Control Nodes)

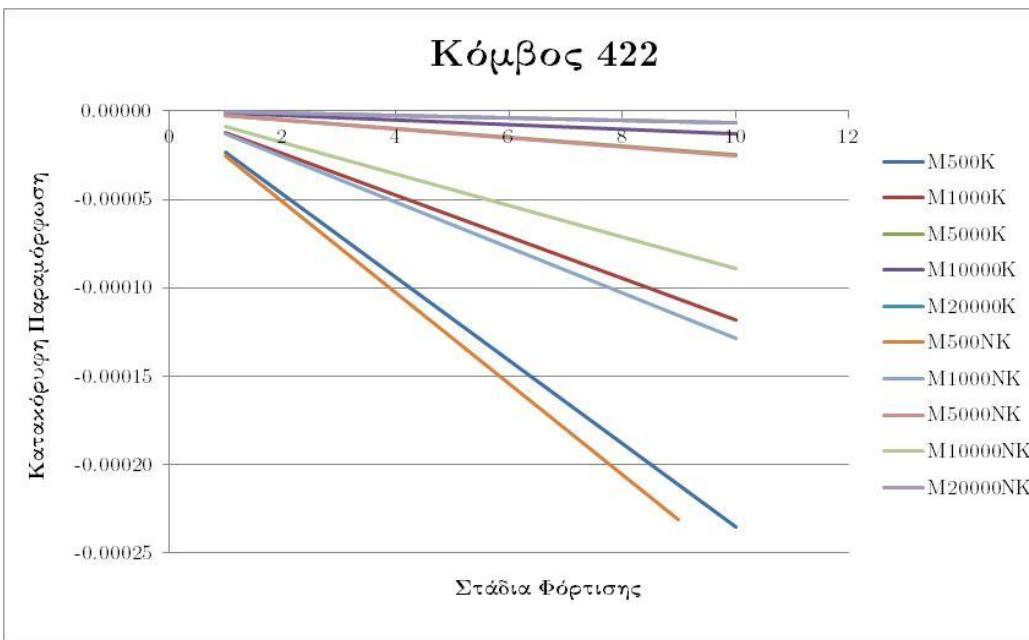
4.6.1 Συγκριτικά Διαγράμματα των Ελαστικών Μοντέλων

Στα Σχήματα 4.13 – 4.18 φαίνονται τα διαγράμματα των ελαστικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν με υποστήριξη κοχλιών. Στο Σχήμα 4.13, πιο συγκεκριμένα, φαίνεται συγκεντρωτικά η κατακόρυφη μετατόπιση στο όριο της σήραγγας για όλα τα ελαστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν.

Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των μοντέλων με κοχλίωση και χωρίς κοχλίωση είναι μηδαμινές καθώς τα μοντέλα είναι ελαστικά, οι κοχλίες επηρεάζουν ελάχιστα στην επίλυση και τελικά δεν δίνουν σημαντική διαφορά στην μετατόπιση.

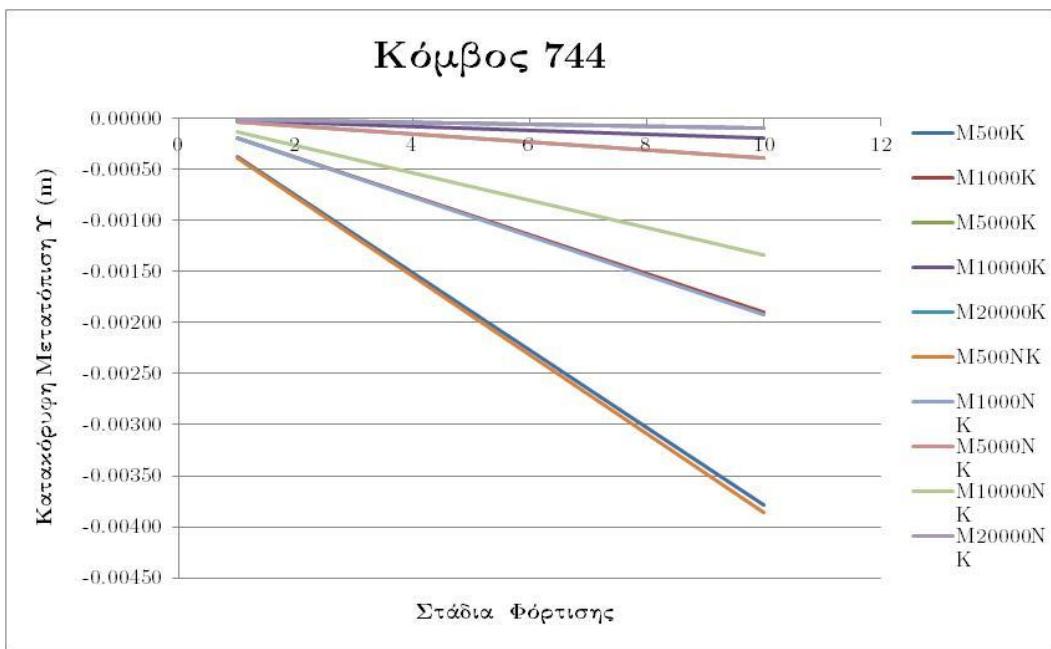


Σχήμα 4.13: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή

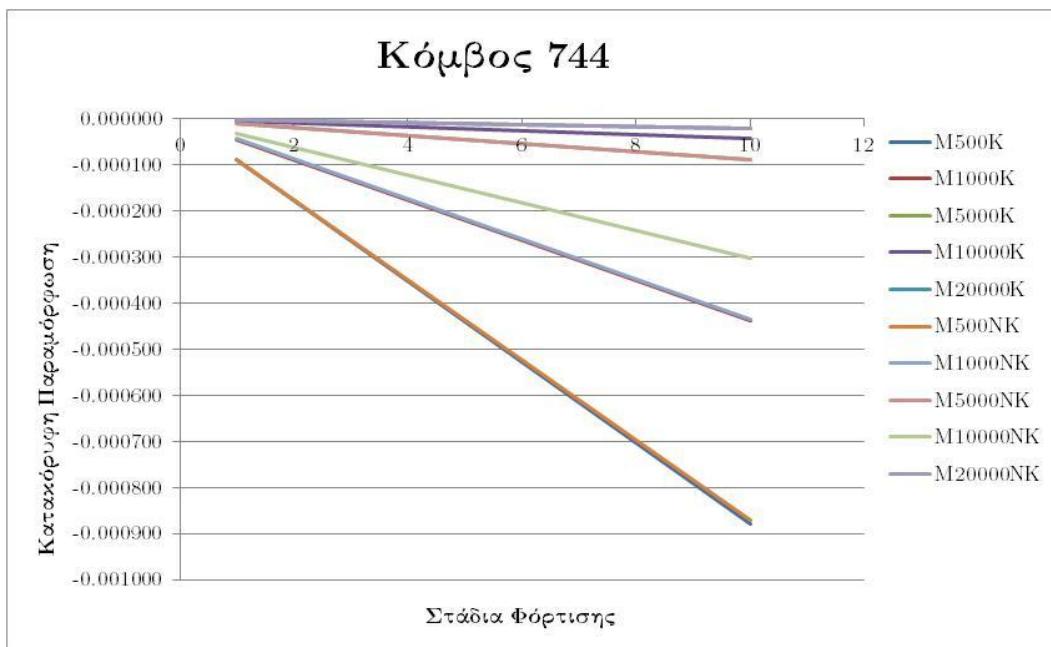


Σχήμα 4.14: Διάγραμμα κατακόρυφων παραμορφώσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή

Στο Σχήμα 4.14 παρατηρείται ότι οι κατακόρυφες παραμορφώσεις είναι παρόμοιες στα μοντέλα με κοχλίωση από τα μοντέλα χωρίς κοχλίωση, καθώς η χρήση υποστήριξης μειώνει τις παραμορφώσεις που δέχεται το πέτρωμα.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα κατακόρυφων παραμορφώσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή

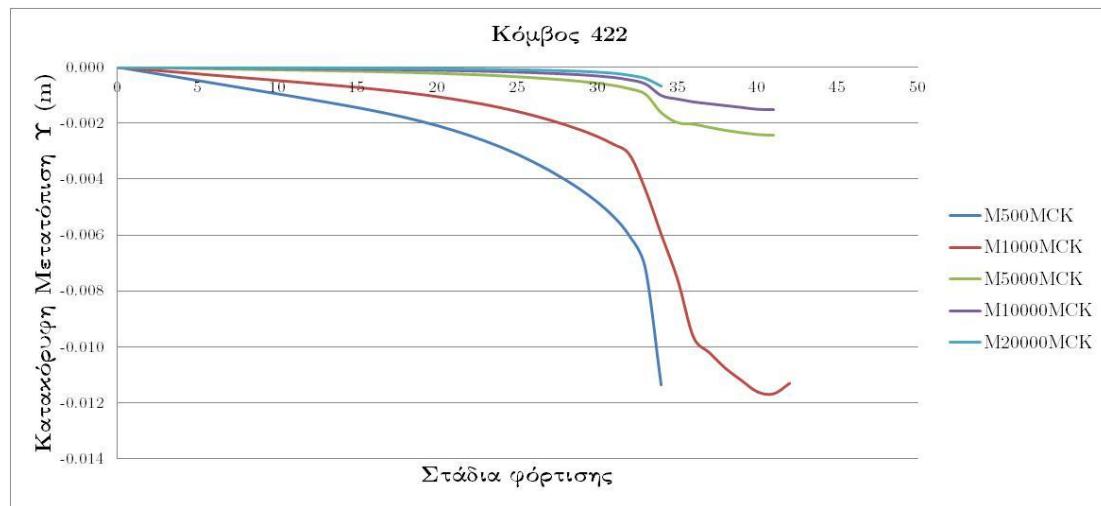
Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 φαίνονται η κατακόρυφη μετατόπιση και η κατακόρυφη παραμορφωση αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι και στα δύο διαγράμματα οι διαφορές είναι πολύ μικρές στα μοντέλα με κοχλίωση και χωρίς κοχλίωση. Αυτό δικαιολογείται καθώς ο κόμβος 744 που επιλέχτηκε, βρίσκεται ανάμεσα στους δύο κοχλίες με

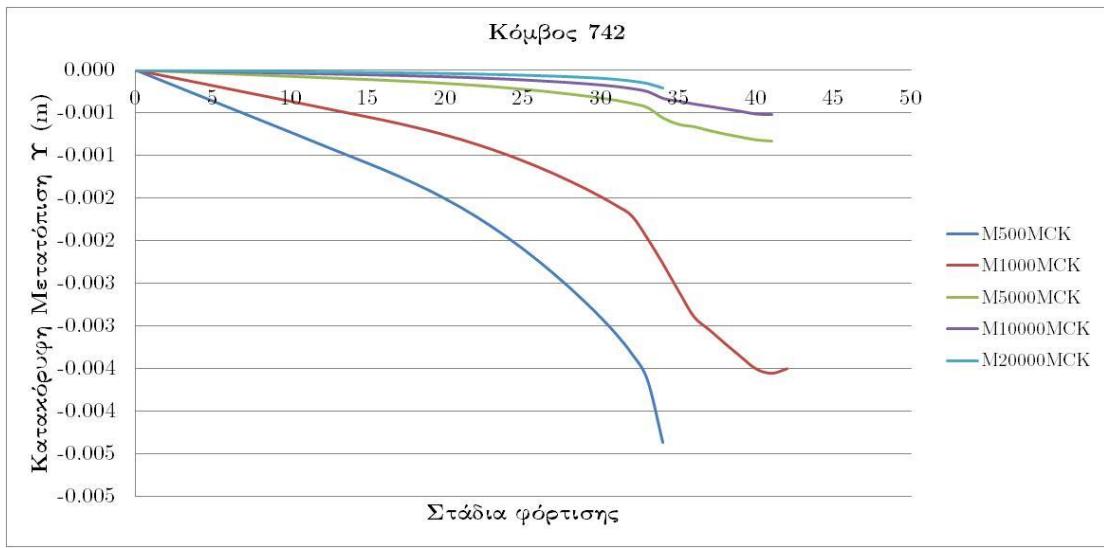
αποτέλεσμα να μην τον επηρεάζει η υποστήριξη. Από την σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως στο όριο της σήραγγας οι παραμορφώσεις μειώνονται με την χρήση υποστήριξης με κοχλίωση ιδιαίτερα στο μοντέλο με το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας.

4.6.2 Συγκριτικά Διαγράμματα των Ελαστο-πλαστικών Μοντέλων

Στο Σχήμα 4.24 φαίνονται τα συγκριτικά διαγράμματα των ελαστο-πλαστικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν με το χριτήριο Mohr-Coulomb στον κόμβο 422 πάνω στο όριο του ανοίγματος. Παρουσιάζονται τα μοντέλα με τη χρήση υποστήριξης με κοχλίες και είναι εμφανής η διαφορά της μετατόπισης.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών

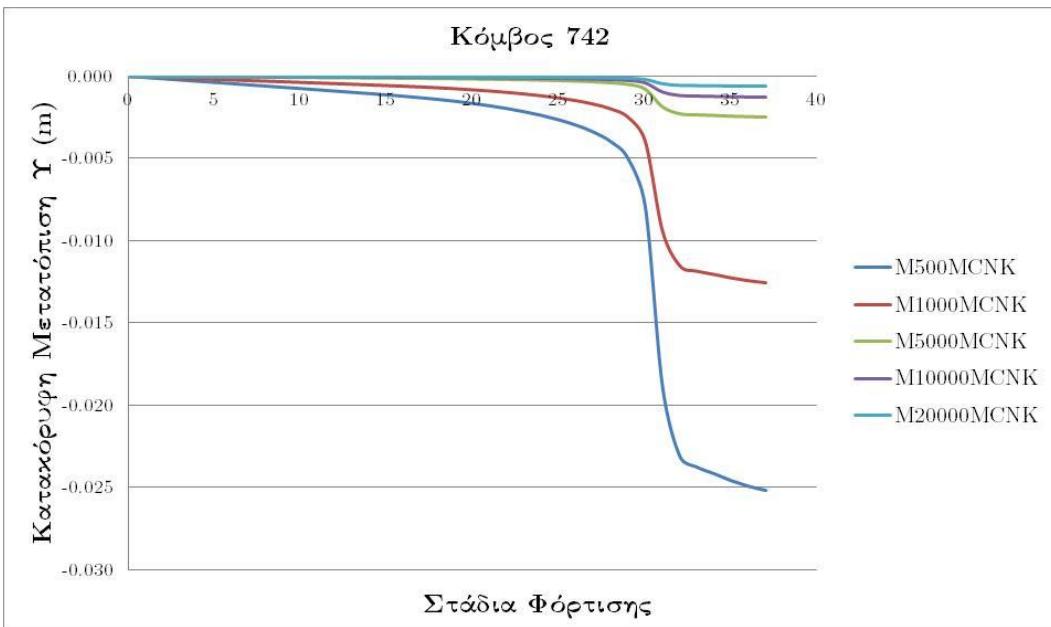


Σχήμα 4.25: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών

Στο Σχήμα 4.25 φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις για διατομή με υποστήριξη στον κόμβο 742 ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά στον κοχλία και σε απόσταση 1,5m από το όριο του ανοίγματος της σήραγγας. Από τα Σχήματα 4.24 και 4.25 συμπεραίνεται ότι οι μετατοπίσεις στο όριο του ανοίγματος είναι αισθητά μεγαλύτερες από ότι σε απόσταση 1,5m από το άνοιγμα και κοντά στον κοχλία. Στα Σχήματα 4.26 – 4.27 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις για τους ίδιους κόμβους με παραπάνω αλλά χωρίς υποστήριξη της οροφής με κοχλίες



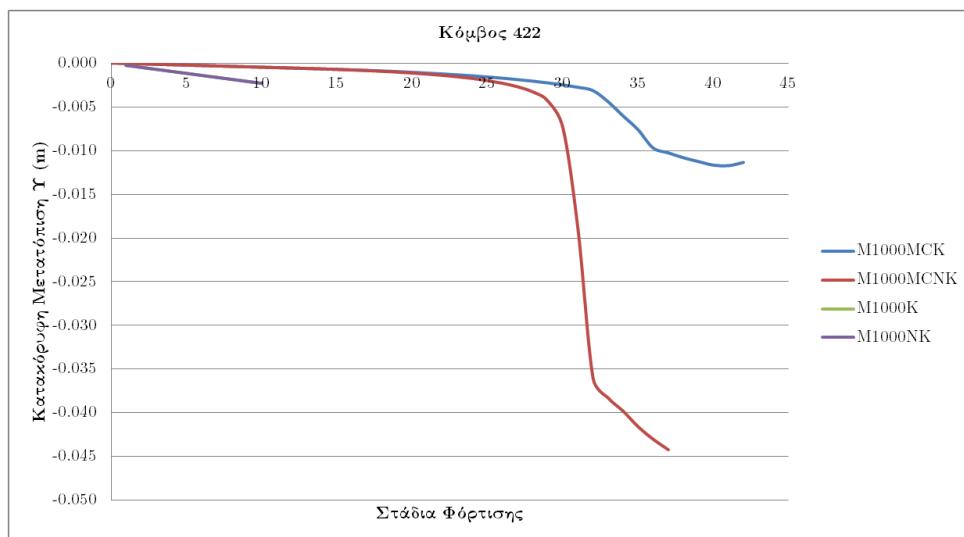
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή χωρίς υποστήριξη κολιών



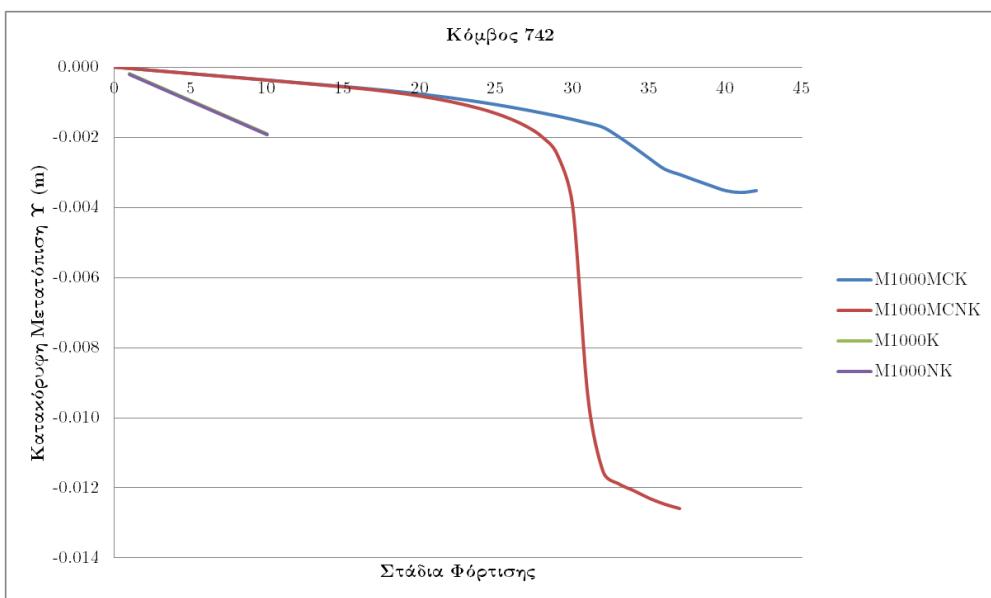
Σχήμα 4.27: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή χωρίς υποστήριξη κολιών

Από τα συγκριτικά διαγράμματα στα σχήματα 4.24 – 4.27 συμπεραίνεται πως οι κατακόρυφες μετατοπίσεις μειώνονται αισθητά με την χρήση υποστήριξης με κοχλίωση και ιδιαίτερα πάνω στο όριο του ανοίγματος της σήραγγας.

Στα Σχήματα 4.28 – 4.29 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις συναρτήσει των σταδίων φόρτισης στους κόμβους ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κοχλιών και για ανυποστήριχτη διατομή. Επιλέχτηκε ενδεικτικά ένα μοντέλο για να παρουσιαστεί η διαφορά της κατακόρυφης μετατόπισης, με και χωρίς υποστήριξη, αλλά και τα υπόλοιπα μοντέλα παρουσιάζουν αντίστοιχες μεταβολές.



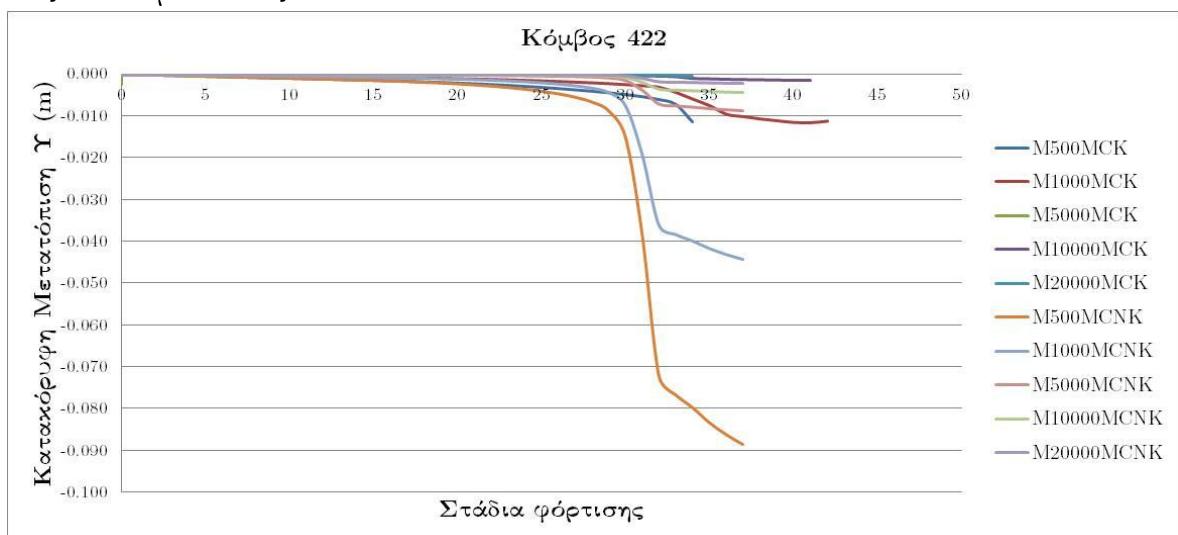
Σχήμα 4.28: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή σε ελαστικό και ελαστοπλαστικό μοντέλο



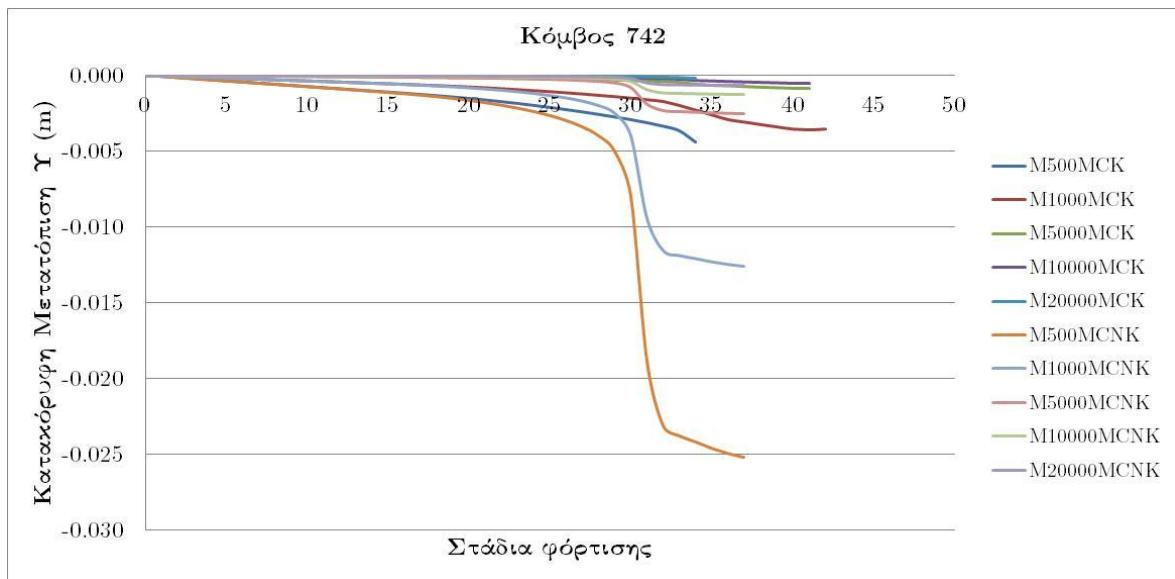
Σχήμα 4.29: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή σε ελαστικό και ελαστοπλαστικό μοντέλο

Στα Σχήματα 4.28 - 4.29 παρουσιάζεται η διαφορά της κατακόρυφης μετατόπισης και είναι προφανές πως η διατομή με υποστήριξη έχει μικρότερες μετατοπίσεις, της τάξης του cm, πάνω στο όριο του ανοίγματος αλλά και δίπλα στον κοχλία, της τάξης του mm.

Τέλος, στο Σχήμα 4.30 παρουσιάζονται συγκριτικά όλα τα μοντέλα για διατομή με υποστήριξη και για ανυποστήριχτη διατομή στους δύο κόμβους ελέγχου. Παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στην κατακόρυφη μετατόπιση και στις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4.30: Συγκριτικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήριχτη διατομή



Σχήμα 4.31: Συγκριτικό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων συναρτήσει των σταδίων φόρτισης σε κόμβο ελέγχου για διατομή με υποστήριξη κολιών και για ανυποστήρικτη διατομή

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η μέθοδος υποστήριξης οροφής με κοχλίωση και έγινε σύγκριση για διατομή με υποστήριξη και για ανυποστήριχτη διατομή, σε ελαστικά και ελαστοπλαστικά μοντέλα.

Η μέθοδος αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα αφού χρησιμοποιείται για οποιαδήποτε γεωμετρία διατομής σήραγγας, σε μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών και είναι πρακτικά ανεξάρτητη της ποιότητας της βραχομάζας. Δημιουργεί μείωση των μετατοπίσεων γύρω από την εκσκαφή αλλά και αύξηση της σταθερότητας του μετώπου εκσκαφής και των παρειών της σήραγγας.

Η μέθοδος υποστήριξης οροφής με κοχλίες είναι πολύ ευέλικτη αφού επιτρέπει την χρησιμοποίηση και άλλων μέτρων υποστήριξης σε συνδυασμό με αυτή. Ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια άλλη συμπληρωματική μέθοδος διότι το ζητούμενο ήταν να βρεθεί η διαφορά που προκαλεί η υποστήριξη με κοχλίες.

Όσον αφορά την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρατηρήθηκε, από την επίλυση των ελαστικών και ελαστοπλαστικών μοντέλων, πως τα ελαστικά έδειξαν πολύ μικρές διαφορές στην διατομή με υποστήριξη και στην ανυποστήριχτη διατομή. Αυτό ήταν κάτι αναμενόμενο καθώς μαζί με το πέτρωμα παραμορφώνονται και οι κοχλίες μη δίνοντας το επιυψημητό αποτέλεσμα. Αντίθετα τα ελαστοπλαστικά μοντέλα έδειξαν σημαντικές διαφορές στην διατομή με υποστήριξη και στην διατομή χωρίς υποστήριξη, δείχνοντας πως η κοχλίωση μειώνει σημαντικά τις μετατοπίσεις, τις τάσεις και τις παραμορφώσεις κυρίως στο όριο του ανοίγματος.

Αξίζει ακόμα να σημειωθεί πως τα ελαστοπλαστικά μοντέλα προσομοιώνουν πιο ρεαλιστικά την συμπεριφορά του πετρώματος στο περιβάλλον ενώ τα ελαστικά μοντέλα δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα και χρησιμοποιούνται πιο πολύ για εκπαιδευτικούς λόγους.

Τέλος, για περεταίρω ανάλυση προτείνεται να γίνει διερεύνηση για διαφορετικό μήκος κοχλία και για διαφορετική πυκνότητα κοχλιών. Ακόμα θα μπορούσαν δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα για πιο ολοκληρωμένη διερεύνηση της εντατικής κατάστασης που πετρώματος κατά την διάνοιξη της σήραγγας και την υποστήριξη της. Ακόμα θα μπορούσε να βελτιωθεί η διακριτοποίηση του πεδίου προσθέτοντας περισσότερα στοιχεία και κόμβους για καλύτερη ακρίβεια.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). “Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων”, Εκδόσεις Ίων.
2. Δρίτσος, Σ. (2005). “Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”, Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
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. Καρύδης, Π. (2003). Σημειώσεις Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές, Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου.
6. Κωμοδρόμος, Α. (2008). “Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική: Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευών”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
7. Σοφιανός, Α.Ι. (2000). Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, Έκδοση Ε.Μ.Πολυτεχνείου.

Διεθνής

1. Atlas Copco (2005). “Rock and Soil Reinforcement”, 3rd edition.
2. Bathe, K. (1996). “Finite Element Procedures”, Prentice Hall.
3. Baker, H. (2005). “Blue Book of Building & Construction”.
4. Duddeck, H. (1988). “Application of Numerical Analyses for Tunneling”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
5. Fagan, M.J. (1996). “Finite Element Analysis, Theory and Practice”, Longman.
6. Hoek, E. and E.T. Brown, (1992). “Underground Excavations in Rock”, 2nd edition, E & FN Spon, London.
7. MSC. Software Corporation, (2000) “MSC Marc User’s Guide”, USA.

8. Peila, D and C. Oggeri, (2006). "Various Excavation and Auxiliary Methods in Tunneling", ITA/AITES, Seoul.
9. US Army Corps of Engineers (USACE), (1997). "Tunnels and Shafts in Rock".

Διαδίκτυο

1. Jet-grouting.com, "Informations about the Environmental and Geotechnical Industry".
2. Laynegeo.com, "Geotechnical Construction Company".
3. Tee.gr, "Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας".
4. Rockreinforcement.com, "DSI Underground Systems".