



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΚΥΡΙΟΥ ΣΕ ΠΕΤΡΩΜΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΩΜΑΣ Δ. ΚΑΤΣΙΑΛΑΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ

ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ, 2004

Περίληψη

Η μοντελοποίηση της ζώνης αγκύρωσης μεταλλικού αγκυρίου σε πέτρωμα είναι το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία.

Στις περισσότερες υπόγειες εκσκαφές τα πετρώματα που περιβάλλουν το άνοιγμα δεν είναι ικανά παραμείνουν στην αρχική τους θέση (θέση που είχαν πριν την εκσκαφή) χωρίς τεχνητή υποστήριξη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση της εκσκαφής. Η κατάρρευση των υπόγειων ανοιγμάτων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της Γεωμηχανικής. Ένας από τους πλέον σύγχρονους και οικονομικούς τρόπους υποστήριξης υπόγειων εκσκαφών είναι η υποστήριξη με μεταλλικά αγκύρια. Ο λόγος αυτός ήταν η αιτία για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ένας από τους συνηθέστερους τύπους αγκυρίων είναι οι μεταλλικοί κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης που χρησιμοποιούν ως συγκολλητική ύλη το τσιμέντο.

Σε αυτή την διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο μία υποστήριξη, από κοχλίες αυτού του τύπου, είναι δυνατόν να αστοχήσει κάτω από την επίδραση του εντατικού πεδίου που επικρατεί στην περιοχή της υποστήριξης. Η μελέτη αυτή γίνεται με την δημιουργία δισδιάστατων μοντέλων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού πακέτου MARC.

Πρόλογος

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης τόσο για την ανάθεση του θέματος όσο και για την άψογη συνεργασία και πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή καθώς και τον τελικό έλεγχο και τις σημαντικές παρατηρήσεις που έκαναν επί της εργασίας.

Τέλος πρέπει να ευχαριστήσω τον εργαστηριακό βοηθό Στυλιανό Μαυριγιαννάκη για την βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια του εργαστηριακού μέρους της εργασίας και την εργαστηριακή βοηθό Ειρήνη Καλογήρου για την βοήθεια και της συμβουλές της κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Χανιά, Δεκέμβριος 2004

Θωμάς Κατσιάδας

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1ο

Εισαγωγή	1
----------	---

Κεφάλαιο 2ο

Πεδία Εφαρμογής της Υποστήριξης με Κοχλίες και Συνθήκες Κοχλίωσης	3
2.1 Ιστορική Αναδρομή	3
2.2 Γενικά	4
2.3 Λόγοι για τους οποίους Χρησιμοποιούνται τα Αγκύρια	5
2.4 Θεωρήσεις Σχεδιασμού	7
2.4.1 Ταξινόμηση Πετρωμάτων	7
2.4.2 Εντατική κατάσταση στην Περιοχή του Ανοίγματος	9
2.4.3 Διόγκωση και Συμπίεση του Πετρώματος	11
2.4.4 Επίδραση των Υπόγειων Υδάτων	12
2.4.5 Επίδραση των Δυναμικών Φαινομένων	13
2.5 Σχεδιασμός Υποστήριξης Πετρωμάτων	14
2.5.1 Αλληλεπίδραση Πετρώματος – Αγκυρίου	14
2.5.2 Αρχές του Σχεδιασμού	16
2.5.3 Ανάλυση της Σταθερότητας των Εκσκαφών	17
2.5.3.1 Ανάλυση Σταθερότητας των Σφηνών Βράχου	17
2.5.3.2 Ανάλυση Σταθερότητας της Δοκού ή της Πλάκας για τα Στρώματα των Πετρωμάτων	21
2.5.3.3 Ανάλυση Σταθερότητας της Αψίδας Τάσεων	25
2.6 Παρακολούθηση και Έλεγχος της Λειτουργίας της Κοχλίωσης	27
2.7 Αστοχίες κατά την Εφαρμογή της Κοχλίωσης	29

Κεφάλαιο 3ο

Καταγραφή των Κυριότερων Τύπων Αγκυρίων	31
3.1 Εισαγωγή	31

3.2	Προεντεταμένοι Κοχλίες Σημειακής Αγκύρωσης	32
3.2.1	Κοχλίας με Εγκοπή και Σφήνα	33
3.2.2	Κοχλίας Διαστολής ή Αναπτυσσόμενου Κελύφους	35
3.3	Μη Προεντεταμένοι Κοχλίες Μηχανικής Αγκύρωσης Πλήρους Επαφής	38
3.3.1	Μη Προεντεταμένος Διαχωριζόμενος Κοχλίας (Split Set)	38
3.3.2	Μη Προεντεταμένος Σωληνοειδής Κοχλίας (Swellex)	39
3.3.3	Ξύλινος Κοχλίας	42
3.3.4	Κοχλίας Τύπου «Worley»	43
3.4	Προεντεταμένοι Κοχλίες Κατανεμημένης Αγκύρωσης με Συγκολλητικές Ύλες	44
3.4.1	Προεντεταμένος Κοχλίας Κατανεμημένης Αγκύρωσης με Τσιμέντο	44
3.4.2	Προεντεταμένος Κοχλίας Κατανεμημένης Αγκύρωσης με Ρητίνη	45
3.5	Μη Προεντεταμένοι Κοχλίες με Συγκολλητικές Ύλες	48
3.5.1	Χαλύβδινος Κοχλίας	48
3.5.2	Κοχλίας Τύπου «Perfo»	49
3.5.3	Κοχλίας Κατασκευασμένος από Διαφορετικό Υλικό	50
3.6	Αγκύρια με Μορφή Συρματόσκοινων	50
3.7	Υλικά Πλήρωσης	53

Κεφάλαιο 4ο

Εφαρμογή των Αριθμητικών Μεθόδων στην Γεωμηχανική	62
4.1 Εισαγωγή	62
4.2 Μέθοδοι για την Επίλυση των Γεωμηχανικών Προβλημάτων	62
4.3 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	64
4.3.1 Γενικά	64
4.3.2 Διαδικασία της Μεθόδου	67
4.3.3 Διακριτοποίηση	68
4.3.4 Χαρακτηριστικά της Διαίρεσης του Πεδίου	71
4.4 Οι συναρτήσεις Μορφής	72
4.5 Επιβολή των Συνοριακών Συνθηκών	74
4.6 Τύποι Προβλημάτων	77
4.7 Μοντέλα Συμπεριφοράς Υλικών	77
4.8 Εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων σε γεωυλικά	80
4.9 Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων	82

Κεφάλαιο 5ο

Ελαστοπλαστικά Μοντέλα και Κριτήρια Αστοχίας Mohr-Coulomb	83
5.1 Εισαγωγή	83
5.2 Μελέτη του Γραμμικού Κριτηρίου Mohr-Coulomb	86
5.3 Μελέτη του Παραβολικού κριτηρίου Mohr-Coulomb	87
5.4 Σύγκριση της Συμπεριφοράς των Υλικών για Γραμμικά και Παραβολικά Κριτήρια Mohr-Coulomb	88
5.5 Επιπλέον Σύγκριση	93
5.6 Συμπεράσματα	96

Κεφάλαιο 6ο

Διερεύνηση του Τρόπου Αστοχίας του Τσιμέντου που Χρησιμοποιείται ως Μέσο Συγκόλλησης στα Αγκύρια Κατανεμημένης Αγκύρωσης	97
6.1 Εισαγωγή	97
6.2 Περιγραφή των Διαστάσεων των Μοντέλων	97
6.3 Συννοριακές Συνθήκες και Ιδιότητες των Υλικών	101
6.4 Ο Ρόλος της Διακριτοποίησης	104
6.5 Επιλογή του Κριτηρίου Αστοχίας	106
6.6 Εφαρμογή του Κριτηρίου Αστοχίας	106
6.6.1 Απόκριση των Μοντέλων ως Συνάρτηση της Απόστασης από την Επιφάνεια του Διατρήματος	108
6.6.2 Απόκριση του Μοντέλου ως συνάρτηση της Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη του Τσιμέντου	121
6.6.3 Απόκριση του Μοντέλου ως συνάρτηση της Γωνίας εσωτερικής Τριβής του Τσιμέντου	124
6.7 Σύνοψη	129

Κεφάλαιο 7ο

Συμπεράσματα – Προτάσεις	130
7.1 Συμπεράσματα	130
7.2 Προτάσεις	131

Βιβλιογραφία	132
--------------	-----

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη του μηχανισμού αστοχίας των υποστηρίξεων υπόγειων ανοιγμάτων με μεταλλικούς κοχλίες. Η μελέτη πραγματοποιείται με την μοντελοποίηση της ζώνης αγκύρωσης μεταλλικών αγκυρίων σε πέτρωμα.

Ένας ασφαλής, οικονομικός και γρήγορος τρόπος υποστήριξης είναι η ιδανική λύση στα προβλήματα κατάρρευσης υπόγειων ανοιγμάτων που μελετούνται από την επιστήμη της Γεωμηχανικής. Τα τελευταία χρόνια τη λύση αυτή την παρέχουν οι κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης.

Το κύριο πρόβλημα στις περιπτώσεις κοχλίωσης είναι η διαστασιολόγηση των παραμέτρων της αγκύρωσης, δηλαδή ο υπολογισμός του μήκους του αγκυρίου, του μήκους του διατρήματος και του τύπου του τσιμεντενέματος. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία παραμετρική ανάλυση του προβλήματος αυτού διατηρώντας σταθερές τη διάμετρο και το μήκος του κοχλία και της οπής.

Σε πολλές περιπτώσεις υποστήριξης με κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης που χρησιμοποιείται ως συγκολλητική ύλη το τσιμέντο η αποτυχία της μεθόδου οφείλεται στην αστοχία του τσιμέντου και όχι του κοχλία. Στη συνέχεια της εργασίας γίνεται προσπάθεια προσέγγισης του μηχανισμού αστοχίας του τσιμέντου που χρησιμοποιείται σε αυτούς τους κοχλίες. Η προσέγγιση γίνεται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και την επίλυση διαφόρων μοντέλων στο πρόγραμμα MARC-MENTAT για διάφορους τύπους τσιμέντου.

Επειδή το τσιμέντο είναι ένα ελαστοπλαστικό υλικό ένα τμήμα της εργασίας ασχολείται με την διερεύνηση της συμπεριφοράς των ελαστοπλαστικών υλικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εντοπίζονται τα πεδία εφαρμογής της υποστήριξης με αγκύρια. Γίνεται αναφορά στις συνθήκες κοχλίωσης που υπάρχουν σε κάθε περίπτωση, που είναι δυνατόν να εφαρμοστεί αυτή, καθώς επίσης και γιατί πρέπει να προτιμηθεί η υποστήριξη με κοχλίες.

Στο τρίτο κεφάλαιο καταγράφονται οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενοι τύποι αγκυρίων. Αναφέρονται μερικά από τα τεχνικά στοιχεία, τα οικονομικά στοιχεία και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τύπου. Επίσης γίνεται ταξινόμηση των κοχλίων σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο αγκύρωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται εν συντομία οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι

υπολογισμού. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στην περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων καθώς επίσης και στην εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στη Γεωμηχανική.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μοντελοποίηση ελαστοπλαστικών γεωυλικών με διαφορετικές παραμέτρους και διαφορετικά κριτήρια αστοχίας. Με τα αποτελέσματα κάθε μοντέλου προσδιορίζεται η αλλαγή στη συμπεριφορά των γεωυλικών λόγω της αλλαγής των παραμέτρων αυτών και λόγω της χρήσης διαφορετικού κριτηρίου αστοχίας. Τα κριτήρια που εφαρμόζονται είναι το γραμμικό και το παραβολικό κριτήριο Mohr-Coulomb και οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι το μέτρο ελαστικότητας και η γωνία εσωτερικής τριβής.

Στο έκτο κεφάλαιο προσεγγίζεται ο μηχανισμός αστοχίας του ελαστικού και ελαστοπλαστικού τσιμέντου που χρησιμοποιείται ως συγκολλητική ύλη στα αγκύρια. Ο προσδιορισμός της αστοχίας γίνεται σε τσιμέντα με διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής και διαφορετικές αντοχές σε μονοαξονική θλίψη. Στα ελαστοπλαστικά μοντέλα εφαρμόζεται το παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Ακόμα για την επιβεβαίωση της αστοχίας γίνεται εφαρμογή του προγράμματος RockWin.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα από την συνολική επεξεργασία και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση του προβλήματος.

Κεφάλαιο 2^ο

Πεδία Εφαρμογής της Υποστήριξης με Κοχλίες και Συνθήκες Κοχλίωσης

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η κοχλίωση της οροφής, ως μέσο υποστήριξης των υπογείων εκσκαφών, άρχισε να εφαρμόζεται σποραδικά από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Η πρώτη σχετική δημοσίευση αναφέρεται σε ανθρακωρυχείο της άνω Σιλεσίας, όπου επιχειρήθηκε κοχλίωση των πετρωμάτων σε υπόγειες στοές, το έτος 1918 (Οικονομόπουλος, 1989).

Οπωσδήποτε όμως, πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος αυτή άρχισε ουσιαστικά να εφαρμόζεται περίπου το 1950. Ιδιαίτερα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής παράλληλα με την θεωρητική μελέτη των σχετικών προβλημάτων πραγματοποιήθηκαν και εκτεταμένες έρευνες προς την κατεύθυνση της πρακτικής εφαρμογής του νέου αυτού τύπου υποστήριξης των μεταλλευτικών έργων.

Η Υπηρεσία Μεταλλείων των Η.Π.Α. (U.S. Bureau of Mines) άρχισε να ενδιαφέρεται για την μέθοδο της κοχλίωσης στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, για την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων ευστάθειας της οροφής, τα οποία είχαν άμεση επίδραση στο βαθμό ασφαλείας των εκμεταλλεύσεων.

Το ανθρακωρυχείο Concord της Εταιρείας Tennessee Coal, Iron & Railroad Co ήταν το πρώτο στο οποίο εφαρμόστηκε η κοχλίωση αποτελεσματικά ως μέσο υποστήριξης. Αρχικά οι δοκιμές περιορίστηκαν σε ένα τμήμα του ορυχείου, και αργότερα ως συνέπεια των εξαιρετικών ευνοϊκών αποτελεσμάτων, η χρήση των κοχλίων γενικεύθηκε και διέκοψε παντελώς την τοποθέτηση ξύλινων υποστηριγμάτων (Οικονομόπουλος, 1989).

Από τις διεξαγόμενες εκτεταμένες δοκιμές έγινε αντιληπτό, ότι η μέθοδος υποστήριξης με κοχλίωση της οροφής ήταν δυνατό να εφαρμοσθεί επιτυχώς σε ποικίλες συνθήκες (Οικονομόπουλος, 1989).

Περίπου την ίδια εποχή η μέθοδος άρχισε να εφαρμόζεται και σε διάφορες πόλεις της Ευρώπης. Για παράδειγμα στα μεταλλεία σιδήρου στην περιοχή της Λορένης, στην ΒΑ Γαλλία, η μέθοδος είχε αρχίσει να εφαρμόζεται από το έτος 1953, αφού πρώτα διενεργήθηκαν εξαιρετικά ενδιαφέρουσες μελέτες σχετικές με τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Όμως στα ανθρακωρυχεία της Γαλλίας τα οποία επίσης εφάρμοσαν την μέθοδο, δεν

υπήρξαν τα ίδια αποτελέσματα γιατί οι ειδικές συνθήκες εκμετάλλευσης των ανθρακοφόρων κοιτασμάτων δεν επέτρεπαν την εφαρμογή της μεθόδου. Παρόμοια προβλήματα αντιμετωπίστηκαν επίσης και στα ανθρακωρυχεία και μεταλλεία της Αγγλίας.

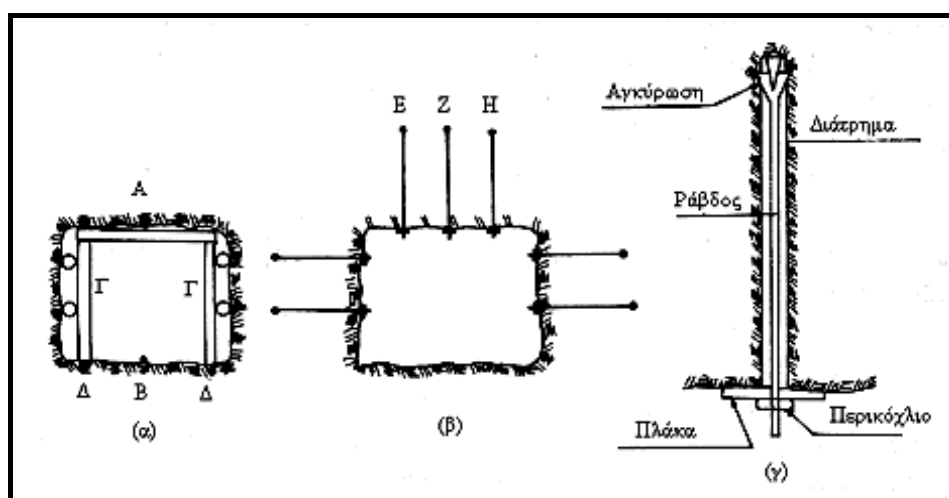
Πέραν όμως από τα μεταλλεία, η μέθοδος έχει ευρεία εφαρμογή και σε άλλα τεχνικά έργα, όπως για παράδειγμα στην όρυξη σηράγγων, στην κατασκευή υδροηλεκτρικών έργων, στην υποστήριξη πρανών κατά την διάνοιξη οδικών αρτηριών κλπ (Οικονομόπουλος, 1989).

2.2 Γενικά

Η υποστήριξη των υπογείων ανοιγμάτων με κοχλίωση της οροφής αποτελεί σχετικά πρόσφατη τεχνική. Έτσι, λόγω αυτού δεν υφίσταται μακροχρόνια και επομένως επαρκής εμπειρία στα σχετικά θέματα. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου υποστήριξης στα μεταλλεία επέτρεψε την εισαγωγή νέου τύπου εξοπλισμού και κατέστησε αναγκαία την ριζική αλλαγή των τρόπων εργασίας κατά την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι πολλά και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Ως γνωστό, κατά τη διάνοιξη υπόγειας εκσκαφής δημιουργείται ζώνη ελαττωμένων πιέσεων. Τα πετρώματα τα οποία βρίσκονται στη ζώνη αυτή συχνά περνούν πέρα από την ελαστική περιοχή, "ρέουν" προς το άνοιγμα και θραύονται (Οικονομόπουλος, 1989).

Με την κλασσική υποστήριξη επιδιώκεται η ελάττωση της σύγκλισης ή αλλιώς της μεταβολής της απόστασης των σημείων Α και Β (Σχήμα 2.1). Όσο περισσότερο τα σημεία Α και Β τείνουν να πλησιάσουν μεταξύ τους, τόσο περισσότερο πιέζουν την υποστήριξη η οποία αντιδρά αναλόγως, εφαρμόζοντας στην οροφή και το δάπεδο δυνάμεις οι οποίες αντιτίθενται στις πιέσεις των πετρωμάτων. Επιπρόσθετα, η κλασσική υποστήριξη συγκρατεί τα χαλαρωμένα τεμάχια του πετρώματος και εμποδίζει την πτώση τους.



Σχήμα 2.1: Κλασσική υποστήριξη και υποστήριξη με κοχλίες (Οικονομόπουλος, 1989)

Η κλασσική υποστήριξη εδράζεται, κατά τον ένα ή τον άλλο τρόπον, περιμετρικά της στοάς. Για να υποστηριχθεί το σημείο Α της οροφής απαιτείται επαφή με το δάπεδο της στοάς στα σημεία Δ, μέσω των ορθοστατών Γ.

Με την κοχλίωση της οροφής και των παρειών της στοάς επιτυγχάνεται αντίδραση στην σύγκλιση των σημείων Α και Β και αποφεύγονται οι πτώσεις τεμαχίων πετρώματος. Συνήθως όμως, οι κοχλίες δεν απαιτούν περιμετρική έδραση.

Συνεπώς, με την κοχλίωση των πετρωμάτων επιδιώκεται η συγκράτησή τους (Σχήμα 2.1γ), ώστε να αυξηθεί η συνοχή τους και να επιτραπεί σε αυτά να αντιδράσουν αποτελεσματικά έναντι των τάσεων στις οποίες υποβάλλονται (Οικονομόπουλος, 1989).

2.3 Λόγοι για τους οποίους Χρησιμοποιούνται τα Αγκύρια

Ο κύριος στόχος στο σχεδιασμό ενός συστήματος υποστήριξης είναι να υποστηριχθεί η βραχομάζα. Αυτό ισχύει για παράδειγμα στα συστήματα ενίσχυσης όπου τα αγκύρια πραγματικά διαμορφώνουν μέρος της βραχομάζας, όσο το δυνατόν καλύτερα σύμφωνα με τα συστήματα υποστήριξης. Τα χαλύβδινα πλαίσια δεν αποτελούν μέρος της βραχομάζας, αλλά υποστηρίζουν αυτή εξωτερικά (το αγκύριο αναγκάζει και κινητοποιεί την εσωτερική δύναμη της βραχομάζας).

Τα αγκύρια και τα συστήματα εξωτερικής υποστήριξης χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό για την καλύτερη δυνατή σταθεροποίηση της βραχομάζας. Στην πραγματικότητα, πολλές φορές ένας συνδυασμός αγκυρίων και πλέγματος πλαισίων (τα οποία υποστηρίζουν την επιφάνεια του πετρώματος μεταξύ των αγκυρίων), παρέχει το βέλτιστο σύστημα για την σταθεροποίηση της βραχομάζας. Είναι ένα σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσωρινή καθώς επίσης και για μόνιμη υποστήριξη πετρωμάτων (Stillborg, 1994).

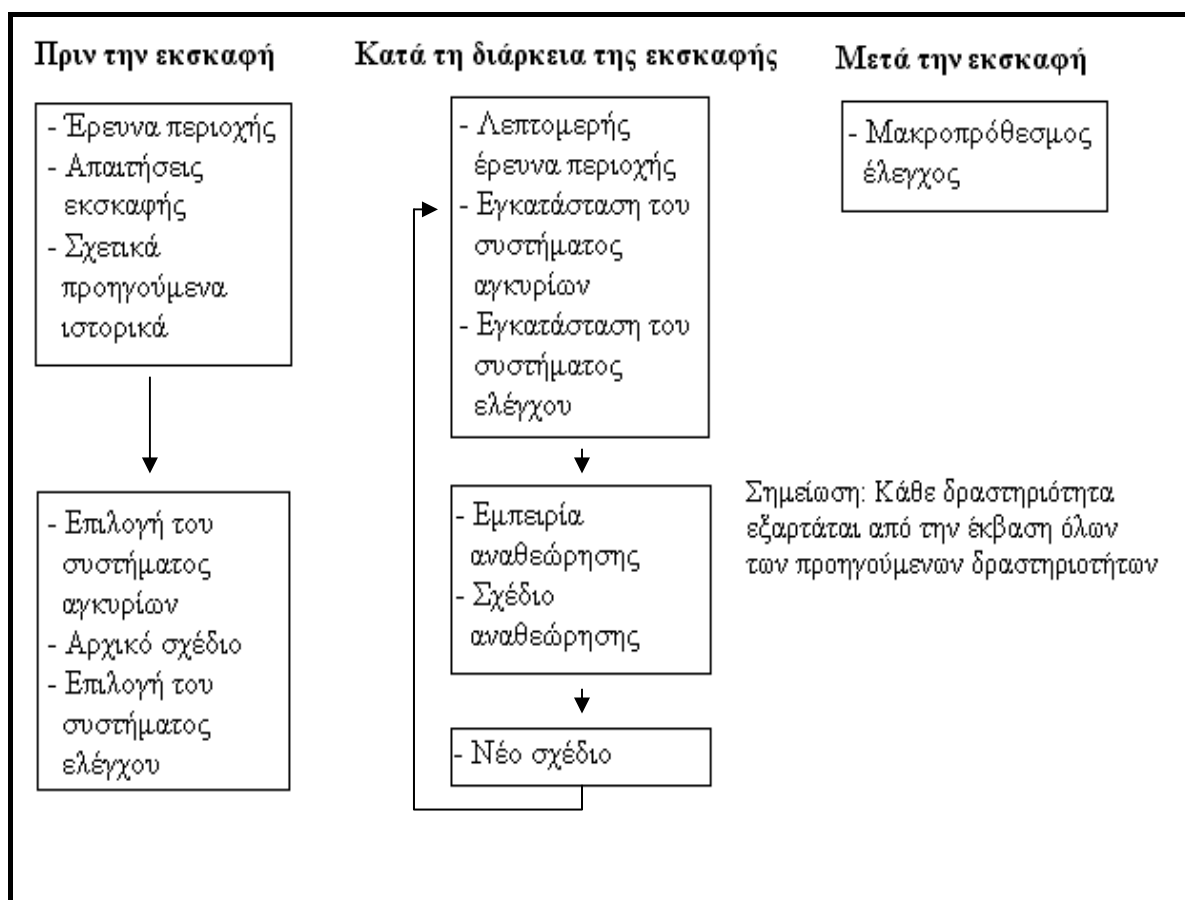
Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τη διαδεδομένη χρήση των συστημάτων ενίσχυσης με αγκύρια (Stillborg, 1994):

- είναι ευπροσάρμοστα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε γεωμετρία εκσκαφής,
- είναι απλά και γρήγορα στην εφαρμογή,
- είναι σχετικά οικονομικά,
- η εγκατάστασή τους μπορεί να μηχανοποιηθεί πλήρως.

Χρησιμοποιώντας αγκύρια, η πυκνότητα ενίσχυσης (διαστήματα μεταξύ των αγκυρίων) μπορεί να τροποποιηθεί λόγω των τοπικών συνθηκών της βραχομάζας. Ένα άλλο πλεονέκτημα όπως προαναφέρθηκε είναι ότι τα αγκύρια μπορούν εύκολα να

χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με πλέγμα πλαισίων εξωτερικής υποστήριξης ή μια συγκεκριμένη επένδυση. Σε πολλές μεθόδους για υποστήριξη υπόγειων εκσκαφών (όπως στη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Διάνοιξης Σηράγγων (NATM)) η συστηματική κοχλίωση συνδυάζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και για την μόνιμη ενίσχυση του βράχου, με μια συγκεκριμένη επένδυση. Επιπλέον, μετά από την ανατίναξη η γρήγορη εγκατάσταση των αγκυρίων είναι πολύ σημαντική προκειμένου να διατηρηθεί η ακεραιότητα της βραχομάζας. Πολλά συστήματα αγκυρίων προσφέρουν το πλεονέκτημα της άμεσης δράσης στήριξης μετά από την εγκατάσταση.

Ένα διάγραμμα ροής για ένα πρόγραμμα ενίσχυσης βραχομάζας φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Είναι σημαντικό ότι ο γενικός έλεγχος του προγράμματος κοχλίωσης της βραχομάζας (όλες οι μεμονωμένες δραστηριότητες που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα) είναι στα χέρια ενός μηχανικού, ή όταν αυτό δεν είναι δυνατό ο μηχανικός θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι οι επιμέρους δραστηριότητες είναι κατάλληλα τεκμηριωμένες.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής για την υποστήριξη βραχομάζας με κοχλίες (Stillborg, 1994)

2.4 Θεωρήσεις Σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός του συστήματος αγκυρίων είναι ένα θέμα με το οποίο γίνονται προσπάθειες να προβλεφθούν το μέγεθος, οι κατευθύνσεις και οι τύποι των τάσεων που προκύπτουν από τις αρχικές τάσεις και η επιρροή τους στη βραχομάζα που περιβάλλει μια εκσκαφή. Στην πράξη, αυτό δεν είναι ένα απλό πρόβλημα δεδομένου ότι οι μεταβολές των τάσεων σε ένα πέτρωμα εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η γεωμετρία εκσκαφής, οι συνθήκες του πετρώματος, η εντατική κατάσταση της βραχομάζας κλπ. Επιπλέον, πρέπει να εξεταστεί η επίδραση της ενίσχυσης στη βραχομάζα και ο προσδοκώμενος χρόνος ζωής της ενίσχυσης. Στη συνέχεια παρατίθεται κατάλογος με παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός συστήματος υποστήριξης (Stillborg, 1994):

- Σκοπός της εκσκαφής
- Προσωρινή ή μόνιμη ενίσχυση
- Συνθήκες πετρώματος
- Εντατική κατάσταση της περιοχής
- Απαιτήσεις ασφάλειας
- Συνθήκες υπόγειας υδροφορίας
- Πρακτικές εκτιμήσεις
- Πιθανοί τρόποι αστοχίας
- Γεωμετρία εκσκαφής
- Απαιτούμενη πίεση υποστήριξης
- Ευκολία πρόσβασης
- Χρόνος ζωής / δράσης υποστήριξης
- Τεχνική εξαγωγής
- Προηγούμενη εμπειρία
- Εγγύτητα των παρακείμενων εκσκαφών
- Κόστος και διαθεσιμότητα

Μερικοί από τους παραπάνω παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό συστημάτων υποστήριξης με αγκύρια θα αναλυθούν και όποτε είναι δυνατόν, μέσω παραδειγμάτων θα ερμηνευθεί ο τρόπος με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες μπορούν να ποσοτικοποιηθούν.

2.4.1 Ταξινόμηση Πετρωμάτων

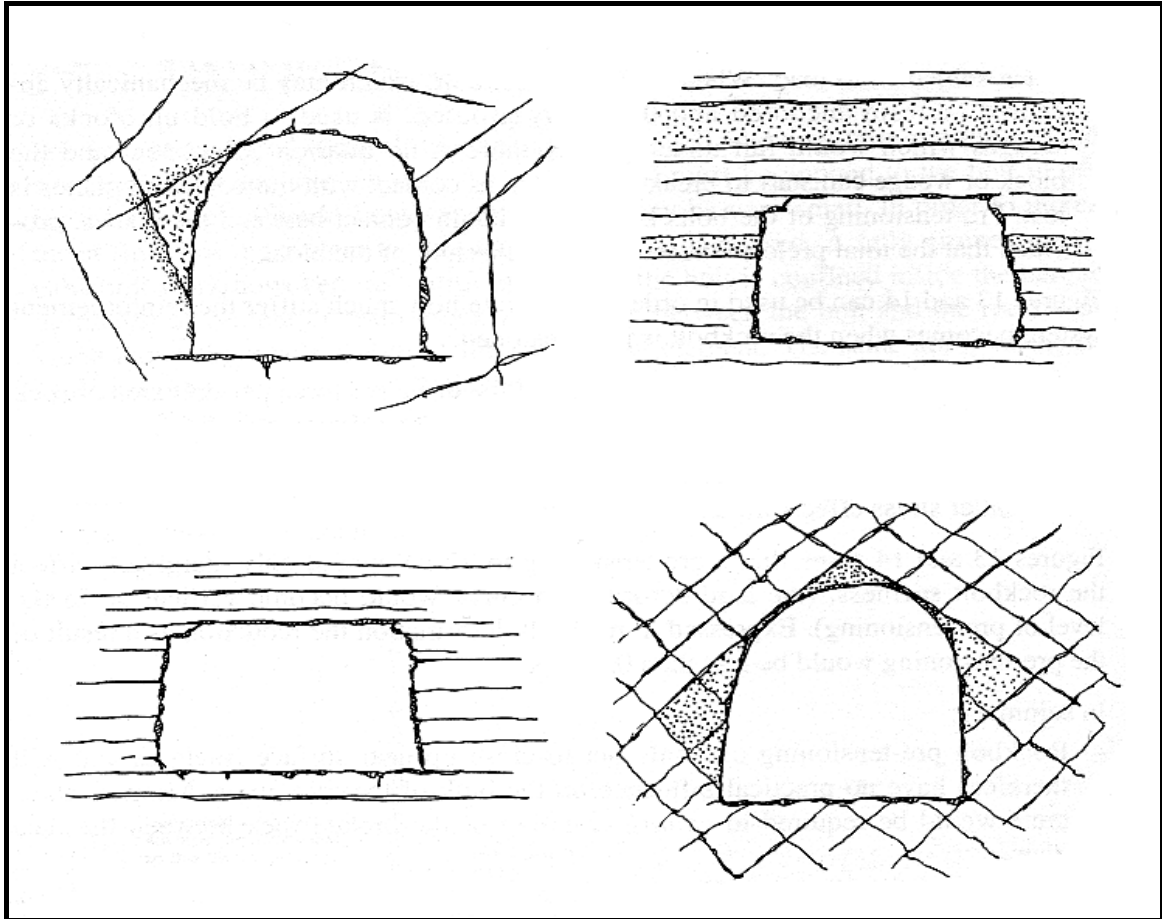
Είναι γνωστό ότι τα πετρώματα ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: τα ιζηματογενή, τα μεταμορφωμένα και τα ηφαιστειακά. Στον Πίνακα 2.1 δίνονται τυπικές μηχανικές ιδιότητες μερικών τύπων πετρωμάτων (Stillborg, 1994).

Πίνακας 2.1: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες των κυριότερων πετρωμάτων (Stillborg, 1994)

Κατηγορία πετρώματος	Τύπος πετρώματος	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c [MPa]	Αντοχή σε εφελκυσμό σ_t [MPa]	Μέτρο ελαστικότητας E [GPa]	Δείκτης σημειακής φόρτισης $I_{S(50)}$ [MPa]	Γωνία εσωτερ. τριβής ϕ ($^\circ$)
Ιζηματογενή πετρώματα	Ασβεστόλιθος	50-200	5-20	20-70	0.5-7	33-40
	Άργιλος	5-15	---	---	0.1-6	----
	Ψαμμίτης	50-150	5-15	15-50	0.2-7	25-35
	Ιλυόλιθος	5-200	2-20	20-50	6-10	27-31
	Σχιστόλιθος	50-100	2-10	5-30	-	27
Μεταμ/μένα πετρώματα	Γνεύσιος	100-200	5-20	30-70	2-11	23-29
	Μάρμαρο	100-200	5-20	30-70	2-12	25-35
	Χαλαζίτης	200-400	25-30	50-90	5-15	48
Ηφαιστειακά πετρώματα	Βασάλτης	100-300	10-15	40-80	9-14	31-38
	Γάββρος	100-300	10-15	40-100	6-15	---
	Γρανίτης	100-200	5-20	30-70	5-10	29-35

Στη φύση, οι ακέραιες βραχομάζες με μηχανικές ιδιότητες όπως αυτές αναφέρονται στον Πίνακα 2.1 είναι σπάνια περίπτωση. Αντ' αυτού, οι ιδιότητες των πετρωμάτων ποικίλουν αρκετά, και σπάνια είναι ίδιες από περιοχή σε περιοχή. Ακόμη και στην ίδια σήραγγα, τα πετρώματα μπορεί να διαφέρουν από το αέριο πέτρωμα. Εντούτοις, τα πετρώματα μπορεί μερικές φορές να είναι ομογενή και καλά διαβαθμισμένα όσον αφορά τις γεωλογικές δομές. Παραδείγματα μερικών γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται συνήθως στις υπόγειες σήραγγες δίνονται στο Σχήμα 2.3 (Stillborg, 1994).

Στις περιπτώσεις όπου οι συνθήκες των πετρωμάτων δεν μπορούν εύκολα να ταξινομηθούν σε κάποιο από τα παραδείγματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3, ο προσδιορισμός αυτός πραγματοποιείται με διάφορα πρόσθετα συστήματα ταξινόμησης που υπάρχουν. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν στον κατάλληλο σχεδιασμό της υποστήριξης.



Σχήμα 2.3: Τυπικά παραδείγματα γεωλογικών σχηματισμών που αντιμετωπίζονται κατά τη διάνοιξη σηράγγων (Stillborg, 1994)

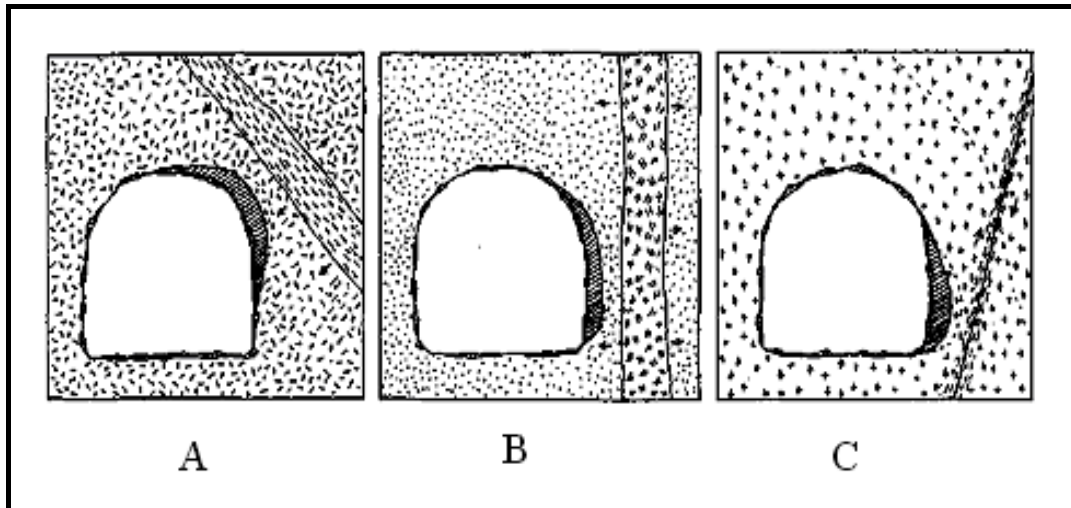
2.4.2 Εντατική κατάσταση στην Περιοχή του Ανοίγματος

Η εντατική κατάσταση της βραχομάζας μπορεί να καθοριστεί από τις μετρήσεις των πιέσεων του πετρώματος. Τα μεγέθη των τάσεων, οι διευθύνσεις τους και η συσχέτισή τους με τα θεωρητικά μεγέθη, μαζί με τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας καθοδηγούν το μηχανικό στην εκτίμηση της πιθανότητας κατάρρευσης του βράχου ή άλλων προβλημάτων κατά την εκσκαφή. Η συμπεριφορά του πετρώματος γύρω από μία υπόγεια εκσκαφή συσχετίζεται, σε μεγάλο βαθμό, με τις τάσεις που επικρατούν στην περιοχή. Όταν μια υπόγεια εκσκαφή αναπτύσσεται η αρχική εντατική κατάσταση επηρεάζεται σε δεδομένες αποστάσεις γύρω από μια "διάμετρο εκσκαφής" από την περιφέρειά της. Οι κατακόρυφες τάσεις στη βραχομάζα είναι, γενικά, συνάρτηση του ύψους του ανοίγματος, του χρόνου και της πυκνότητας του πετρώματος. Οι οριζόντιες τάσεις ποικίλλουν αρκετά και στην περίπτωση που αυτές προκαλούνται τεκτονικά ή με κάποιο άλλο τρόπο μπορούν να φθάσουν στην ίδια τάξη μεγέθους με τις αντοχές του πετρώματος. Ανάλογα με τις ιδιότητες της βραχομάζας, μπορεί να εμφανιστεί αστοχία και κατάρρευση του ανοίγματος.

Μετά από την εκσκαφή ενός υπόγειου ανοίγματος η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στη βραχομάζα που περιβάλλει το άνοιγμα ανακατανέμεται σταδιακά πέρα από την περιοχή της εκσκαφής, και έτσι με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η συγκέντρωση υψηλών τάσεων. Η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων που εμφανίζεται αρχικά στην περιφέρεια του ανοίγματος, με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται από το σύνορο. Στους μαλακούς σχηματισμούς αυτή η αναπροσαρμογή εμφανίζεται σχεδόν αμέσως μετά από το άνοιγμα της στοάς σαν συνέπεια της παραμόρφωσης του πετρώματος. Παρ' όλα αυτά, ο μη ελαστικός σκληρός και εύθραυστος βράχος (με ή χωρίς ασυνέχειες), είναι επιρρεπής στη θραύση όταν υποβάλλεται σε υψηλά φορτία. Σε μια μη ελαστική βραχομάζα η αναπροσαρμογή πραγματοποιείται πιο αργά. Εάν οι τάσεις αυτής της διαδικασίας υπερβαίνουν την αντοχή του πετρώματος, κοντά στην εκσκαφή εμφανίζεται αστοχία και σχηματίζεται μια ζώνη θρυμματισμένου πετρώματος. Στην παραμορφωμένη ζώνη μειώνονται οι υψηλές τάσεις μέχρι ένα επίπεδο ισορροπίας με την αντοχή του θρυμματισμένου πετρώματος, η οποία είναι χαμηλότερη από αυτή του άθικτου πετρώματος (Stillborg, 1994).

Τα προβλήματα όπως η διάρρηξη και η χαλάρωση έχουν επιπτώσεις και στην επιλογή του συστήματος υποστήριξης. Η εμπειρία από εκμεταλλεύσεις σε μεγάλα βάθη και σε σκληρά πετρώματα έχει δείξει ότι ο ακέραιος βράχος που περιβάλλει την εκσκαφή αναπόφευκτα θα παραμορφωθεί σημαντικά. Για τον έλεγχο της μετακίνησης του θρυμματισμένου πετρώματος, απαιτείται ένα ελαστικό σύστημα υποστήριξης. Ακόμη και στα σημεία όπου τα προβλήματα ολίσθησης της βραχομάζας είναι λιγότερο σοβαρά, και δεν οδηγούν απαραίτητα σε πλήρη παραμόρφωση του περιβάλλοντος πετρώματος, συστήνεται το ελαστικό σύστημα υποστήριξης. Ως εκ τούτου, και με την προϋπόθεση ότι το θρυμματισμένο πέτρωμα μπορεί να διατηρηθεί στη θέση του εμποδίζοντας την προοδευτική μετατόπιση, υπάρχει λιγότερος κίνδυνος να διαδοθεί η ζώνη χαλάρωσης με αποτέλεσμα την κατάρρευση της εκσκαφής. Μη προεντεταμένα αγκύρια έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικά στην πρόληψη της διάρρηξης του πετρώματος. Τα αγκύρια, εάν εγκαθίστανται κοντά στο μέτωπο προώθησης, εντείνονται από την παραμόρφωση της βραχομάζας, καθώς η υποστήριξη που παρέχεται από το πέτρωμα που αφαιρείται δεν υφίσταται πλέον και ο βράχος χαλαρώνει.

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται μερικοί γεωλογικοί σχηματισμοί που μπορούν να οδηγήσουν στη διάρρηξη του πετρώματος (Stillborg, 1994).



Σχήμα 2.4: Γεωλογικοί σχηματισμοί που μπορούν να οδηγήσουν σε διάρρηξη πετρώματος (Stillborg, 1994)

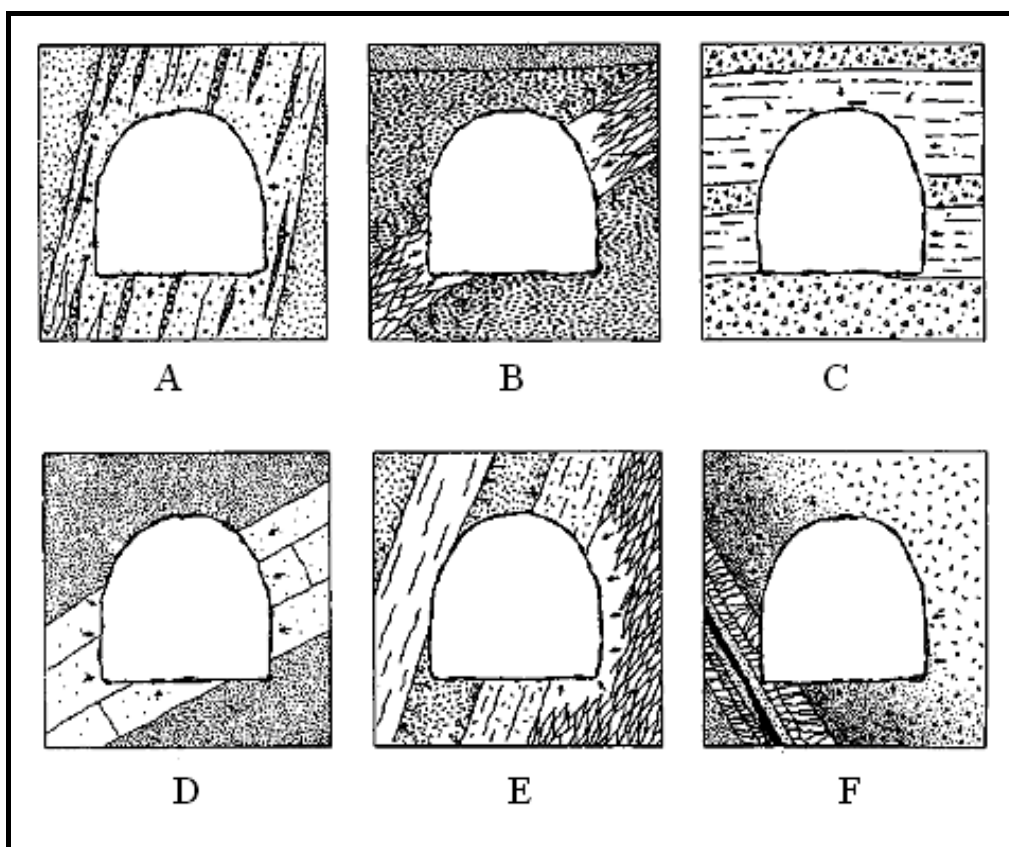
2.4.3 Διόγκωση και Συμπίεση του Πετρώματος

Το υλικό πλήρωσης της βραχομάζας, το οποίο διογκώνεται με την παρουσία του ύδατος, αποτελεί ένα κοινό πρόβλημα στις υπόγειες εκσκαφές και δεν υπάρχει κάποια δεδομένη τεχνική αντιμετώπισης. Το ίδιο πρόβλημα ισχύει και για την περίπτωση που το πέτρωμα που περιβάλλει την εκσκαφή επιδεικνύει, χρονικά εξαρτημένες, παραμορφώσεις. Όταν, οι τάσεις που ασκούνται στα πετρώματα υπερβούν την αντοχή της βραχομάζας ή το όριο ερπυσμού, η μάζα παραμορφώνεται πλαστικά.

Για το σχεδιασμό της ενίσχυσης που εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της διόγκωσης και της συμπίεσης του πετρώματος πρέπει αρχικά να επιτραπεί στο άνοιγμα να παραμορφωθεί χωρίς καμία υποστήριξη. Στην εκτόνωση του πετρώματος, οι παραμορφώσεις που πρέπει να επιτραπουν προτού να ληφθούν οποιαδήποτε μέτρα υποστήριξης πρέπει να είναι της τάξης του 5-10% της διαμέτρου του ανοίγματος. Το πρόβλημα με αυτήν την προσέγγιση είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους της παραμόρφωσης που μπορεί να επιτραπεί πριν να ξεπεραστεί η αντοχή του πετρώματος.

Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται μερικοί γεωλογικοί σχηματισμοί που προκαλούν τη συμπίεση των πετρωμάτων στις σήραγγες (Stillborg, 1994).

Διογκωμένα ή συμπιεσμένα πετρώματα έχουν συνήθως ιδιότητες οι οποίες είναι ίδιες με αυτές των πετρωμάτων με χαμηλή αντοχή. Επομένως για αυτούς τους τύπους πετρωμάτων οι κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης θεωρούνται ακατάλληλοι. Αντίθετα σε τέτοιες καταστάσεις συστήνονται οι κοχλίες τριβής και οι κοχλίες με συγκολλητικές ύλες για την υποστήριξη (Stillborg, 1994).



Σχήμα 2.5: Γεωλογικοί σχηματισμοί που οδηγούν στη συμπίεση πετρωμάτων στα υπόγεια ανοίγματα. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της συμπίεσης (Stillborg, 1994).

Ένα πλήρες σύστημα ενίσχυσης του πετρώματος για μια υπόγεια εκσκαφή πρέπει να περιλαμβάνει ένα αρχικό στρώμα ενίσχυσης από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες πάχους περίπου 25mm, και να ακολουθείται από ένα πλήρες σύστημα αγκυρίων, μόλις το πέτρωμα είναι έτοιμο να παραμορφωθεί. Είναι πιθανό οι ρωγμές να διαμορφώσουν το αρχικό στρώμα από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τα μικρά τεμάχια βράχου θα μπορούσαν έπειτα να πέσουν στο άνοιγμα μεταξύ των μπουλονιών. Επομένως χρησιμοποιείται ένα πλέγμα συγκράτησης που συνδέεται με τα αγκύρια και που στηρίζεται στα ενδιάμεσα σημεία του σκυροδέματος. Τελικά τοποθετείται ένα ακόμη στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους 25-50mm μετά από το πλέγμα που δημιουργεί ένα συνολικό στρώμα 50-75mm ενισχυμένου σκυροδέματος. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με αγκύρια τριβής, ή με αγκύρια με συγκολλητικές ύλες (τσιμέντο ή ρητίνες) παρέχει αποτελεσματική ενίσχυση στην εκσκαφή (Stillborg, 1994).

2.4.4 Επίδραση των Υπόγειων Υδάτων

Τα υπόγεια νερά είναι δυνατόν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στις υπόγειες εκσκαφές. Μπορεί να είναι πολύ δύσκολο, για παράδειγμα, να προβλεφθεί η εισροή των

υπόγειων υδάτων σε μια σήραγγα, τα οποία οδηγούνται εκεί μέσω των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών. Η ροή των υπόγειων υδάτων σε μια υπόγεια εκσκαφή έχει ιδιαίτερη σημασία για την ανάλυση της σταθερότητας της εκσκαφής και το σχεδιασμό της ενίσχυσης.

Συνεχής ροή υπόγειων υδάτων από τα διατρήματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση του πετρώματος αποκλείει τη χρήση της ρητίνης ή του τσιμέντου που χρησιμοποιείται ως συγκολλητική ύλη στα αγκύρια. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν μόνο αγκύρια μηχανικής υποστήριξης ή αγκύρια τριβής τα οποία να μπορούν να προστατευτούν αποτελεσματικά από τη διάβρωση. Επομένως είναι υποχρεωτική η ξήρανση των ζωνών του πετρώματος που περιβάλλει την εκσκαφή εάν η έρευνα της περιοχής δείχνει πως υπάρχει παρουσία υπόγειων υδάτων. Εντούτοις, ακόμη και έπειτα από τις σχετικές προφυλάξεις και αποξηράνσεις είναι υποχρεωτικό να λάβει κανείς υπόψην του τις πιέσεις του ύδατος προκειμένου να εξασφαλίσει τη δομική σταθερότητα της ανασκαφής. Εάν εφαρμόζεται εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, είναι σημαντικό αυτό να αποστραγγίζεται κατάλληλα. Αγκύρια με συγκόλληση τσιμέντου, χρησιμοποιούνται μερικές φορές σε συνδυασμό και για την υποστήριξη και για την μείωση της διαπερατότητας του πετρώματος. Όταν η συγκόλληση με τσιμέντο σχεδιάζεται και κατασκευάζεται κατάλληλα, μπορούν να επιτευχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Όταν στην ανάπτυξη μιας βαθιάς υπόγειας εκσκαφής αναμένεται η παρουσία υπόγειων νερών, είναι κρίσιμης σημασίας η προ-μελέτη να είναι προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση του προσδιορισμού των σημαντικότερων ζωνών που φέρουν υπόγεια νερά. Πρέπει να ληφθούν οι κατάλληλες προφυλάξεις στην τεχνική εκσκαφής για να ανταποκριθεί αυτή στο αναμενόμενο πρόβλημα (Stillborg, 1994).

2.4.5 Επίδραση των Δυναμικών Φαινομένων

Γενικά, τα "δυναμικά φαινόμενα" αναφέρονται στη σεισμική δραστηριότητα και στις δυνάμεις λόγω ανατίναξης. Σε μερικές περιπτώσεις εξίσου σημαντικά είναι και τα αποτελέσματα τη χρήσης υδραυλικών σφυρών στις σήραγγες. Αν και υπάρχουν τεχνικές διαθέσιμες για την αξιολόγηση των δυναμικών φαινομένων στα πετρώματα, έχουν περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής, δεδομένου ότι πρέπει να γίνουν διάφορες υποθέσεις και παραδοχές για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Οι μετατοπίσεις από τη δυναμική φόρτιση του πετρώματος που περιβάλλει μια υπόγεια εκσκαφή είναι γενικά μικρές, αλλά μερικές φορές η προοδευτική μετακίνηση από την ανατίναξη μπορεί να προκαλέσει καταστρεπτική χαλάρωση του πετρώματος. Η επίδραση της ανατίναξης στους κοχλίες

μηχανικής αγκύρωσης δεν μπορεί να αγνοηθεί και πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος ενίσχυσης. Για να εξασφαλισθεί η ένταση ενός κοχλία μηχανικής αγκύρωσης και να διατηρηθεί, το αγκύριο δεν πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση μικρότερη από 10m από την πιο κοντινή ανατίναξη, γεγονός που έχει προκύψει εμπειρικά.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εξόλκευσης, αγκυρίων με συνδετική ύλη τσιμέντου σε σκληρό πέτρωμα, έχουν δείξει ότι εάν το ενισχυμένο πέτρωμα υποβάλλεται σε δυναμική φόρτιση από μία κοντινή ανατίναξη παραγωγής, η φέρουσα ικανότητα του αγκυρίου θα είναι ικανοποιητική μόνο όταν η ταχύτητα διάδοσης υπερβαίνει τα 500 mm/s κοντά στο αγκύριο (Stillborg, 1994).

2.5 Σχεδιασμός Υποστήριξης Πετρωμάτων

Η μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων που ενισχύονται από σύστημα αγκυρίων (δηλαδή η αλληλεπίδραση "πετρώματος-αγκυρίου"), δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητή. Αυτό ισχύει και για τα μεταλλικά αγκύρια (rockbolt) και για τα αγκύρια με συρματόσκοινο (cablebolt) παρά τη διαδεδομένη χρήση τους και φανερώνεται από την έλλειψη κατάλληλων στοιχείων και κριτηρίων για το σχεδιασμό της υποστήριξης με αγκύρια. Ακόμη και για τα μεγάλου μήκους αγκύρια με συρματόσκοινο, (μακρύτερα από 6 μέτρα), ο σχεδιασμός των συστημάτων υποστήριξης, στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στην εμπειρία του αρμόδιου μηχανικού ή των εμπειρικών αποτελεσμάτων από προηγούμενες δοκιμές. Εντούτοις, στη συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια να καταγραφούν μερικές από τις πιο χρήσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν το σχεδιασμό. Αυτές συνήθως εφαρμόζονται στα πρακτικά προβλήματα ενίσχυσης, όπου τα αγκύρια χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά στοιχεία (Stillborg, 1994).

2.5.1 Αλληλεπίδραση Πετρώματος – Αγκυρίου

Είναι σημαντικό να εκτιμηθούν οι διαφορές στην αλληλεπίδραση μεταξύ των αγκυρίων μηχανικής αγκύρωσης, των αγκυρίων τριβής και των αγκυρίων με συνδετικό υλικό με το πέτρωμα (Stillborg, 1994).

- Στα αγκύρια μηχανικής αγκύρωσης, η παραμόρφωση είναι σταθερή κατά μήκος του ελεύθερου μήκους του μπουλονιού. Οποιαδήποτε μετατόπιση της βραχομάζας μεταξύ των δύο σημείων αγκύρωσης, (της πλάκας αγκύρωσης και του σημείου στήριξης), θα κατανεμηθεί κατά μήκος του σώματος του κοχλία. Αυτό κάνει τους κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης ένα εύκαμπτο σύστημα υποστήριξης.
- Στους κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με συγκολλητικές ύλες το φορτίο

μεταφέρεται από το συνδετικό υλικό στο πέτρωμα, και η παραμόρφωση του πετρώματος και της ενίσχυσης δεν μπορούν να χωριστούν. Το φορτίο κατανέμεται σε μια περιορισμένη ακτίνα από το σημείο της ένωσης (περίπου 5-20 διάμετροι του κοχλίου), το οποίο κάνει την κοχλίωση με συνδετικές ύλες ένα δύσκαμπτο σύστημα ενίσχυσης της βραχομάζας.

- Στους κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης λόγω τριβής η μεταφορά των τάσεων είναι παρόμοια με τους κοχλίες με συγκολλητικές ύλες δεδομένου ότι η παραμόρφωση της βραχομάζας και του κοχλίου δεν μπορούν να χωριστούν. Εντούτοις, αυτό ισχύει μόνο για ένα ορισμένο φορτίο. Για τους διαχωριζόμενους κοχλίες (Split Set) η αντίσταση της τριβής στην ολίσθηση υπερνικείται στην περίπου μισή αντοχή του υλικού από το οποίο αποτελείται ο κοχλίας (π.χ. χάλυβας), και ο κοχλίας αρχίζει να γλιστράει. Το αντίστοιχο φορτίο για τον σωληνοειδή κοχλία (Swellex EXL) είναι περίπου 115 kN όταν αρχίζει να γλιστρά. Για τον κοχλία Swellex EXL αυτό το φορτίο είναι πολύ κοντά στην αντοχή του σωλήνα από χάλυβα.

Στις περισσότερες ενισχύσεις πετρωμάτων (εκτός από την περίπτωση της υποστήριξης των ασταθών τεμαχίων του βράχου) όταν σχεδιάζονται τα αγκύρια για να κρατήσουν το νεκρό βάρος του τεμαχίου, το φορτίο που λαμβάνεται από τους κοχλίες είναι μικρό σε σχέση με τα φορτία που ενεργούν στο πέτρωμα. Έτσι τα αγκύρια επιτρέπουν στη βραχομάζα να «αυτοϋποστηριχθεί».

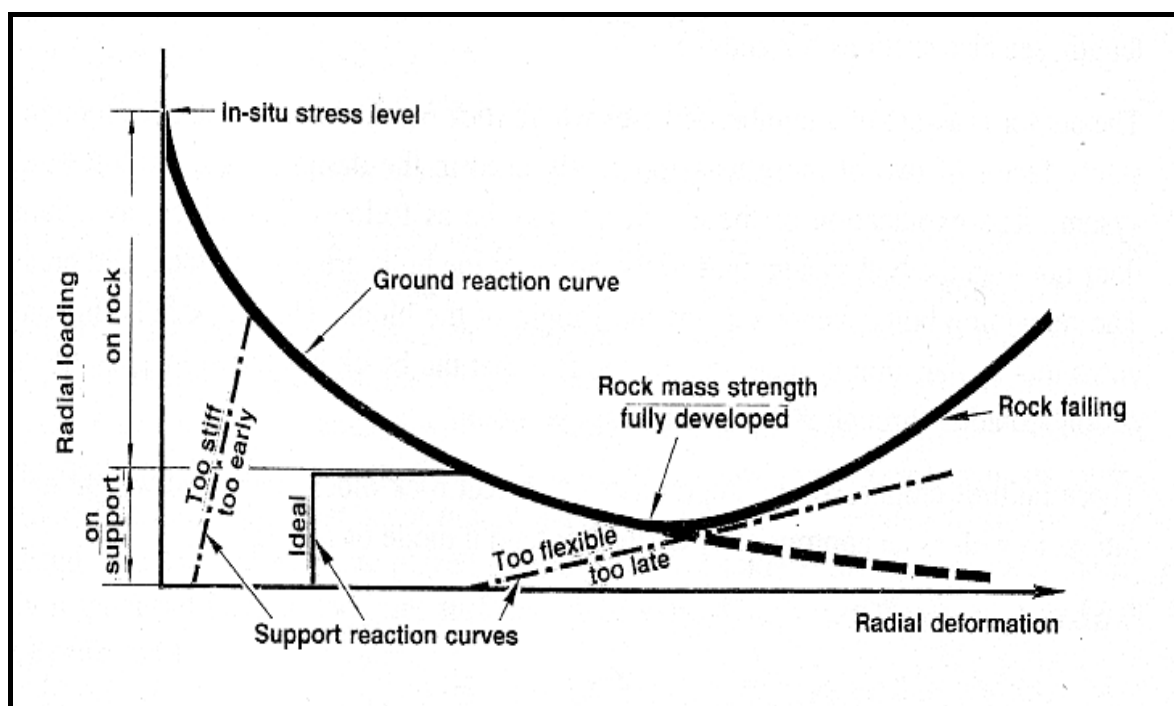
Για την αξιολόγηση της ορθότητας επιλογής του συστήματος ενίσχυσης του βράχου, είναι απαραίτητο να εξετασθεί η αλληλεπίδραση αγκυρίου – βραχομάζας. Τα χαρακτηριστικά του φορτίου και της παραμόρφωσης της βραχομάζας πρέπει να εξάγονται με κάποιο βαθμό εμπιστοσύνης πριν να εξεταστεί ένα σύστημα υπόγειας υποστήριξης. Όταν εκτιμηθεί η συμπεριφορά της βραχομάζας τότε συστήνονται οι κατάλληλοι τύποι κοχλίων για την ενίσχυση του βράχου. Τα συστήματα ενίσχυσης με κοχλίες χρησιμοποιούνται ειδικά στις θέσεις όπου οι ασταθείς σφήνες ή τα τεμάχια του βράχου, είναι ελεύθερα να πέσουν ή να γλιστρήσουν κάτω από την επίδραση του βάρους τους. Ο σχεδιασμός τους είναι πιο απλός από αυτό των μεταλλικών πλαισίων, για παράδειγμα όταν παρουσιάζεται εκκεντρική φόρτιση.

Σε μια πιο σύνθετη, κατανομή τάσεων στη βραχομάζα, η τοποθέτηση της ενίσχυσης γίνεται πιο περίπλοκη. Η υποστήριξη πρέπει να είναι συμβατή με την απόκριση της βραχομάζας στην αποφόρτιση, δηλαδή με την αποκαλούμενη "καμπύλη αντίδρασης". Εάν οι κοχλίες εγκατασταθούν πριν την εμφάνιση της χαλάρωσης του βράχου, μπορεί αυτοί να

δεχτούν υψηλές τάσεις, ειδικά στις περιπτώσεις που οι τύποι κοχλίων που έχουν επιλεγεί δεν μπορούν να προσαρμοστούν στη σχετική παραμόρφωση. Στην περίπτωση που αγκύρια τοποθετηθούν μετά από την εμφάνιση του μεγαλύτερου μέρους της χαλάρωσης, και δεν είναι αρκετά δύσκαμπτα, εάν η πλαστική παραμόρφωση του βράχου συνεχιστεί μπορεί να μην είναι αποτελεσματική η κοχλίωση. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.6 (Stillborg, 1994).

2.5.2 Αρχές του Σχεδιασμού

Το σύστημα των κοχλίων ενίσχυσης πρέπει να σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιήσει τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από το ανυποστήρικτο βάρος του χαλαρωμένου πετρώματος, καθώς επίσης και εκείνων που προκαλούνται από την ανακατανομή των τάσεων στο πέτρωμα που περιβάλλει μια εκσκαφή. Ο βασικός στόχος στο σχεδιασμό της ενίσχυσης είναι να σταθεροποιηθούν τα τεμάχια του πετρώματος της επιφάνειας και να περιοριστούν οι σχετικές μετατοπίσεις των παρακείμενων πετρωμάτων. Για τα μεγάλα ανοίγματα που απαιτούν μακριά αγκύρια αυτό θα δημιουργήσει έναν περιορισμό στην υποστήριξη. Εκτός από την κατασκευή και τη φέρουσα ικανότητά τους, δεν υπάρχει καμία βασική διαφορά μεταξύ των χαλύβδινων κοχλίων (rockbolts) και των κοχλίων από συρματόσκοινο (cablebolts) με συγκολλητικές ύλες. Ο σχεδιασμός της ενίσχυσης για τη μία περίπτωση ισχύει εξίσου και στην άλλη περίπτωση.



Σχήμα 2.6: Αλληλεπίδραση του πετρώματος με το αγκύριο (Stillborg, 1994)

Γενικά, η σταθερότητα μιας υπόγειας εκσκαφής κοντά στην επιφάνεια, δηλαδή σε περιβάλλον με χαμηλές τιμές τάσεων, εξαρτάται από τις συνθήκες του πετρώματος. Εντούτοις, σε κάποια βάθη, η σχέση μεταξύ της τάσης που ασκείται στο βράχο και της αντοχής του βράχου καθορίζουν τη σταθερότητα της εκσκαφής. Στα βαθιά μεταλλεία, όπου οι τοπικές πιέσεις των πετρωμάτων υπερβαίνουν την αντοχή του βράχου, οι μέθοδοι σχεδιασμού για την υποστήριξη της βραχομάζας είναι λιγότερο αναπτυγμένες από εκείνες που χρησιμοποιούνται για τις κοντινές στην επιφάνεια εκσκαφές με περιβάλλον χαμηλών πιέσεων. Για τις χαμηλές πιέσεις (σε σχέση με την αντοχή του βράχου), οι γεωλογικές δομές στη βραχομάζα καθορίζουν τη σταθερότητα της εκσκαφής. Όσο χαμηλότερες είναι οι πιέσεις στο πέτρωμα, τόσο σημαντικότερες γίνονται οι δομές αυτές για τη σταθερότητα της εκσκαφής. Σε ένα περιβάλλον χαμηλών πιέσεων, καμία ολίσθηση βράχου δεν θα εμφανιστεί. Αφ' ετέρου, οι χαμηλές πιέσεις στα πετρώματα δεν μπορούν να προκαλέσουν αύξηση στην αντοχή των γεωλογικών δομών ή περιορισμό της διάγκωσης της βραχομάζας. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός, η έκταση και ο προσανατολισμός των γεωλογικών δομών που κόβουν το άνοιγμα γίνονται σημαντικοί παράγοντες στην εκτίμηση της έντασης της πλαστικής ζώνης και ως εκ τούτου στην ανάλυση της δομικής σταθερότητας για την ενίσχυση με κοχλίες.

2.5.3 Ανάλυση της Σταθερότητας των Εκσκαφών

Αν και η σταθερότητα μιας υπόγειας εκσκαφής κοντά στην επιφάνεια γενικά ελέγχεται δομικά, ειδικά σε συνθήκες σκληρού πετρώματος, η ανάλυση των τάσεων μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση της σταθερότητας του ανοίγματος. Οι ζώνες γύρω από την εκσκαφή, που ολισθαίνουν κατά μήκος των αδύνατων επιφανειών, και η προκαλούμενη αστάθεια των τεμαχίων του βράχου είναι σημαντικής σπουδαιότητας για το σχεδιασμό και πρέπει να εξεταστούν.

Εξετάζοντας τα τέσσερα παραδείγματα των σχηματισμών που δίνονται στο Σχήμα 2.3 για κάθε τύπο βραχομάζας, η δομική σταθερότητα μιας εκσκαφής μπορεί να αξιολογηθεί με τη χρήση μιας από τις ακόλουθες τρεις προσεγγίσεις:

- Ανάλυση σταθερότητας των περιορισμένων τεμαχίων του βράχου.
- Η έννοια της δοκού ή της πλάκας για τα στρώματα των πετρωμάτων.
- Η σημασία της ασπίδας.

2.5.3.1 Ανάλυση Σταθερότητας των Σφηνών Βράχου

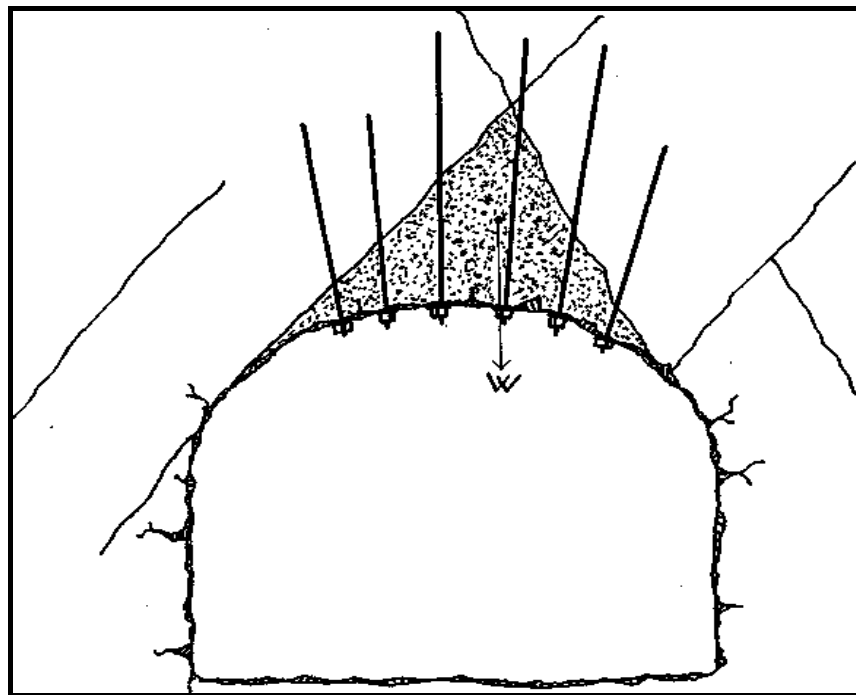
Η ανάλυση σταθερότητας σε περιορισμένα τεμάχια βράχου αναφέρεται στις ασταθείς σφήνες ή τα τεμάχια του βράχου με μικρές διαστάσεις που είναι ελεύθερα να πέσουν ή να γλιστρήσουν κάτω από την επίδραση του βάρους τους.

Ο προσδιορισμός του όγκου μιας χαλαρής σφήνας ή ενός τεμαχίου βράχου παρουσιάζει μία δυσκολία στην εφαρμογή της ανάλυσης στην πράξη. Ο όγκος πρέπει να υπολογιστεί από τη θέση, το μέγεθος και τον προσανατολισμό των δομών που καθορίζουν τα όρια του τεμαχίου.

Για τον προσδιορισμό της μορφής, του όγκου ή του βάρους, καθώς επίσης και της κατεύθυνσης ολίσθησης, η οποία μπορεί να εμφανιστεί, των σφηνών ή των τεμαχίων στη οροφή ή τους τοίχους μιας σήραγγας, συνιστάται η τεχνική στερεογραφικής προβολής που περιγράφεται από τους Hoek and Brown (1980). Μόλις ληφθούν οι σωστές πληροφορίες μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των κοχλιών που απαιτούνται για να στηρίξουν το τεμάχιο. Για το σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια από τις δύο μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η υποστήριξη των τεμαχίων που είναι ελεύθερα να πέσουν. Στη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η υποστήριξη των τεμαχίων που είναι ελεύθερα να γλιστρήσουν (Stillborg, 1994).

Υποστήριξη των σφηνών ή των κυβικών τεμαχίων τα οποία είναι ελεύθερα να πέσουν

Σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση της τριβής των ενώσεων δεν εξετάζεται στο σχεδιασμό του συστήματος υποστήριξης, δεδομένου ότι μόνο το βάρος του χαλαρού βράχου πρόκειται να υποστηριχθεί (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Ενίσχυση σφήνας βράχου που είναι ελεύθερη να πέσει υπό την πίεση του βάρους της (Stillborg, 1994)

Ο προσδιορισμός του μήκους των αγκυρίων πρέπει να βασιστεί στις διαστάσεις του χαλαρού τεμαχίου. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο βαθμό βεβαιότητας μέσα στον οποίο έχει καθοριστεί το μέγεθος των τεμαχίων. Το μήκος τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να εξασφαλίζει ότι, μέσα σε ορισμένα όρια, το τμήμα του κοχλίου που τοποθετείται μέσα στο στερεό βράχο θα είναι σε θέση να υποστηρίξει το βάρος του τεμαχίου για το οποίο σχεδιάστηκε. Αυτό ισχύει και για κοχλίες με συγκολλητικές ύλες και για κοχλίες τριβής. Οι κοχλίες με συγκολλητικό υλικό το τσιμέντο πρέπει να επεκτείνονται σε μήκος 1m περίπου μέσα στο υγιές πέτρωμα. Είναι επίσης σημαντικό να ελεγχθεί ότι το μήκος αυτό είναι ικανοποιητικό για τον εξεταζόμενο τύπο κοχλίου, χρησιμοποιώντας δοκιμές εξόλκευσης, δεδομένου ότι οι τοπικές συνθήκες μπορούν να έχουν επιπτώσεις στο απαιτούμενο μήκος.

Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις όπου τεμάχια βράχου έχουν αστοχήσει, ακόμα κι αν χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με δύο ή και περισσότερο στο σχεδιασμό του συστήματος ενίσχυσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το τεμάχιο, καθώς πέφτει, δεν φορτίζει το σύστημα των αγκυρίων ομοιόμορφα. Μερικά από τα αγκύρια δέχονται υπερβολικές τάσεις και σπάνε. Τα υπόλοιπα αγκύρια δεν μπορούν να υποστηρίξουν το βάρος του τεμαχίου και το τεμάχιο πέφτει.

Αυτές οι αστοχίες υπογραμμίζουν τη σημασία της σωστής εκτίμησης της μορφής και του βάρους των τεμαχίων, καθώς επίσης και του πιθανού τρόπου αστοχίας (Stillborg, 1994).

Για τον υπολογισμό του απαραίτητου αριθμού αγκυρίων ισχύει:

$$N = \frac{W * f}{B} \quad (2.1)$$

όπου:

N = ο αριθμός των αγκυρίων

W = το βάρος της σφήνας

f = ο συντελεστής ασφάλειας, συνήθως $2 \leq f < 5$

B = η μεταφέρουσα ικανότητα του αγκυρίου

Υποστήριξη των σφηνών ή των κυβικών τεμαχίων τα οποία είναι ελεύθερα να ολισθήσουν

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να εξεταστεί η αντίσταση της τριβής των επιφανειών ολίσθησης κατά το σχεδιασμό του συστήματος ενίσχυσης (Σχήμα 2.8). Οι περισσότερες δομές των πετρωμάτων, σκληρά αλλά και μαλακά, έχουν τραχιές και ανώμαλες επιφάνειες επαφής. Εάν οι κοινές επιφάνειες είναι κατάλληλα ενωμένες, η τριβή μπορεί να στηρίξει τις μεγάλες διατμητικές τάσεις. Η αντίσταση της τριβής στη διάτμηση αυξάνεται όσο το φορτίο

αυξάνεται στην κοινή επιφάνεια. Εντούτοις, εάν οι κοινές επιφάνειες δεν συνδέονται κατάλληλα, σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις της τάξης των μερικών χιλιοστών πρέπει να εμφανιστούν πριν επιτευχθεί η μέγιστη αντίσταση της τριβής στην ολίσθηση. Εάν τα εντεταμένα αγκύρια τοποθετούνται κατά προσέγγιση κάθετα στην κοινή επιφάνεια, το προκαλούμενο φορτίο στην κοινή επιφάνεια θα αυξήσει αποτελεσματικά την αντοχή του πετρώματος (Stillborg, 1994).

Για τον υπολογισμό του απαραίτητου αριθμού αγκυρίων ισχύει:

$$N = \frac{W(f \sin \beta - \cos \beta \tan \phi) - cA}{B(\cos \alpha \tan \phi + f \sin \alpha)} \quad (2.2)$$

όπου:

N = ο αριθμός των αγκυρίων

W = το βάρος της σφήνας

f = ο συντελεστής ασφάλειας (συνήθως $1,5 \leq f < 3$)

β = η εμβύθιση της επιφάνειας ολίσθησης

ϕ = η γωνία εσωτερικής τριβής της επιφάνειας ολίσθησης

c = η συνοχή της επιφάνειας ολίσθησης

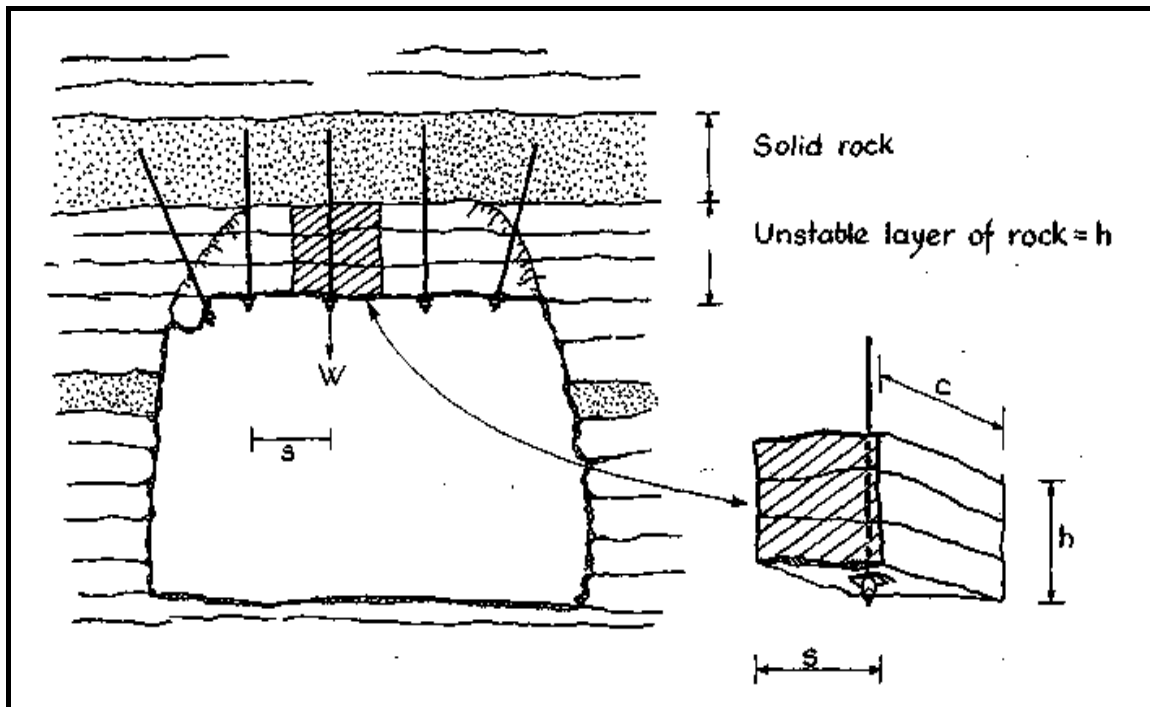
A = ο τομέας της βάσης της επιφάνειας ολίσθησης

B = η φέρουσα ικανότητα του αγκυρίου

α = η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του αγκυρίου και της κάθετης στην επιφάνεια ολίσθησης.

Στην παραπάνω ανάλυση, η γωνία εσωτερικής τριβής, η συνοχή της επιφάνειας ολίσθησης, καθώς επίσης και η φέρουσα ικανότητα του αγκυρίου σε μια ιδιαίτερη κλίση ως προς την επιφάνεια ολίσθησης, είναι ιδιότητες που δύσκολα μπορούν να μετρηθούν. Εάν δεν είναι διαθέσιμα στοιχεία από δοκιμές από μια ιδιαίτερη περιοχή, τα στοιχεία πρέπει να ληφθούν από βιβλιογραφικές αναφορές.

Η τιμή της συνοχής μπορεί να ποικίλει αρκετά. Και εξαρτάται από το υλικό πλήρωσης και την περιεκτικότητά του σε νερό. Μια χαρακτηριστική τιμή της συνοχής για συνδετικό υλικό αποτελούμενο από άργιλο είναι μικρότερη από 1. Συχνά η συνοχή του συνδετικού υλικού τίθεται ίση με μηδέν. Η μηδενική συνοχή συνεπάγεται ότι στον τελικό σχεδιασμό του συστήματος ενίσχυσης απαιτείται ένας μεγαλύτερος συντελεστής ασφαλείας (Stillborg, 1994).



Σχήμα 2.9: Υποστήριξη ασταθούς οριζώντιου στρωματογενούς επιπέδου στο οποίο υπάρχει υπερκείμενο στερεό πέτρωμα (Stillborg, 1994)

Για τον υπολογισμό του βάρους του τεμαχίου του βράχου ισχύει (Stillborg, 1994):

$$W = f * s * c * h * \rho \quad (2.3)$$

όπου:

W = το βάρος του βράχου που υποστηρίζεται από ένα αγκύριο,

f = ο συντελεστής ασφάλειας (συνήθως $1.5 \leq f < 3$),

s = η απόσταση των αγκυρίων, κάθετη στον άξονα της εκσκαφής,

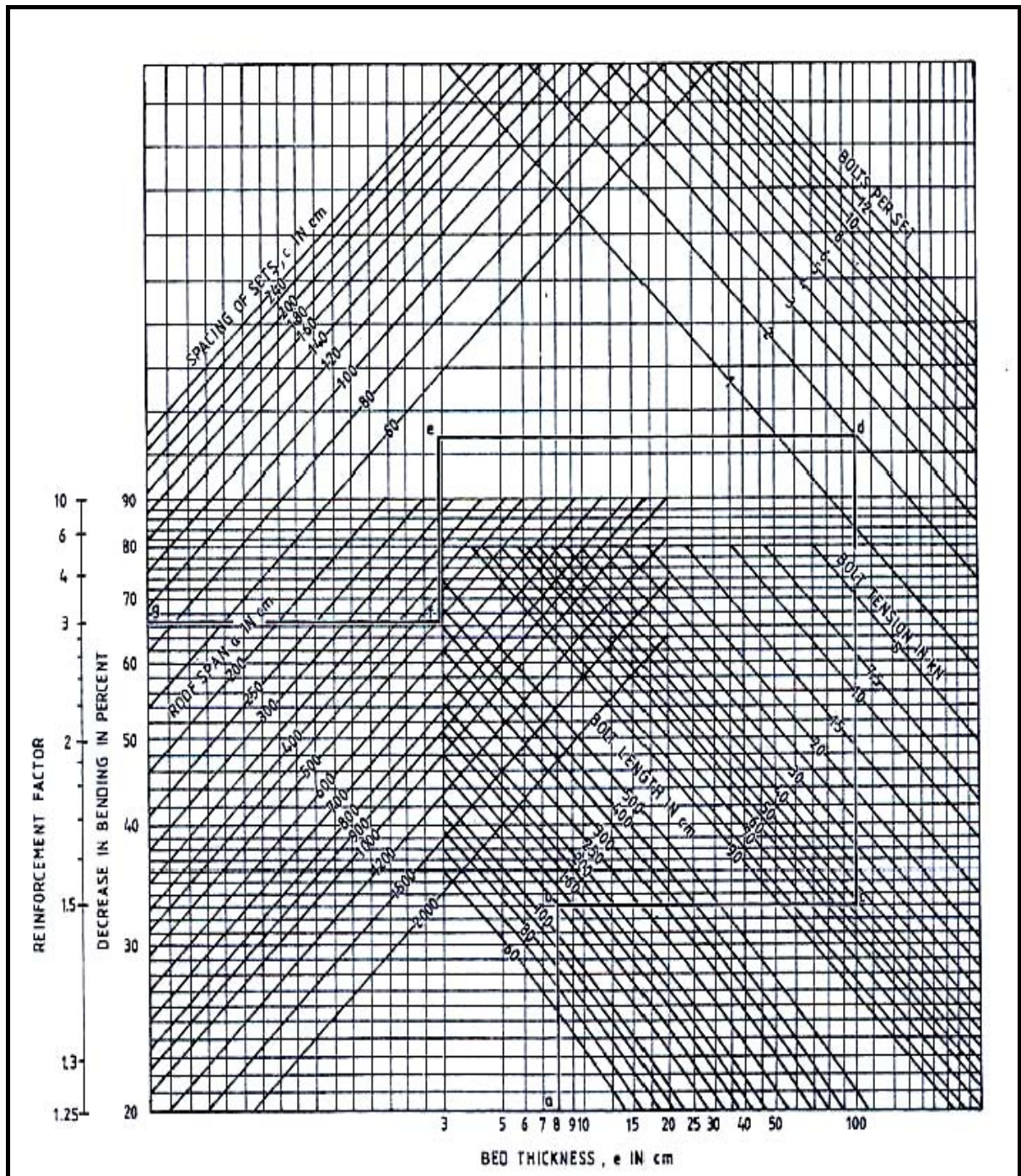
c = η απόσταση των αγκυρίων, κατά μήκος του άξονα της εκσκαφής,

h = το πάχος του ασταθούς στρώματος του βράχου,

ρ = το ειδικό βάρος του πετρώματος.

Η έννοια της δοκού ή της πλάκας για στρωματοειδές πέτρωμα

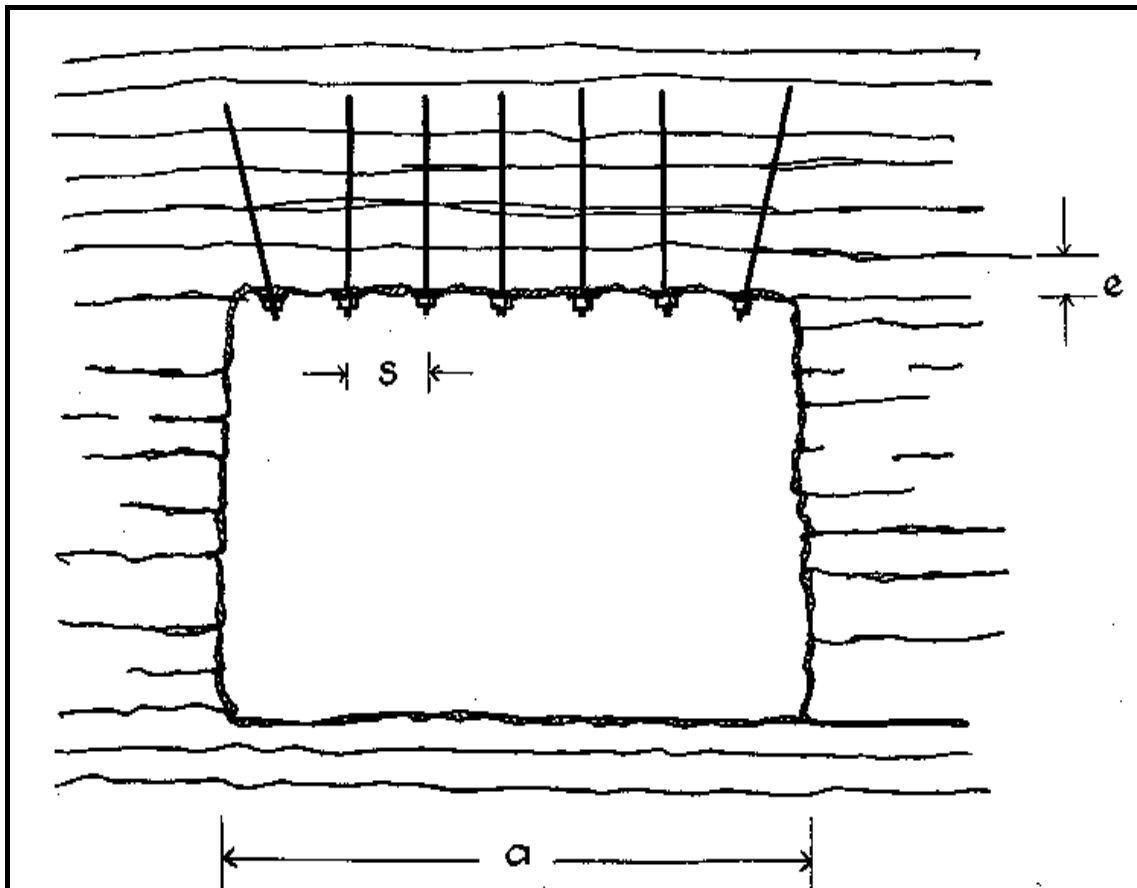
Στα στρωματομένα πετρώματα οριζόντιας διεύθυνσης, τα εντεταμένα αγκύρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναγκάσουν τα διάφορα στρώματα να αλληλεπιδράσουν και με αυτόν τον τρόπο να αυξήσουν τη σταθερότητα της οροφής. Η υποστήριξη οροφής σε τέτοιου είδους πετρώματα περιγράφεται από τον Panek (1964) ο οποίος έχει διατυπώσει μια πρακτική διαδικασία σχεδιασμού για τη χρήση εντεταμένων κοχλιών υπό αυτές τις συνθήκες. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στη χρήση ενός ειδικού νομογράμματος (Σχήμα 2.10) και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (Stillborg, 1994):



Σχήμα 2.10: Νομόγραμμα σχεδιασμού υποστήριξης με κοχλίες για οριζόντια στρωματομένα αδύναμα πετρώματα (Stillborg, 1994)

1. Υπολογισμός του μέσου πάχους, e (Σχήμα 2.11) των μεμονωμένων στρωμάτων του βράχου. Επιλέγεται ένα αγκύριο με μήκος που του επιτρέπει να στηριχθεί σε ένα στρώμα ικανοποιητικού πάχους και αντοχής.
2. Από τις δοκιμές εξόλκευσης καθορίζεται το σωστό σημείο προέντασης

3. Υπολογίζεται ο αριθμός αγκυρίων που απαιτείται συνολικά σε κάθε σειρά κάθετη στον άξονα του ανοίγματος. Εάν στα κενά μεταξύ των αγκυρίων εμφανίζονται ασυνέχειες που είναι πιθανό να προκαλέσουν την πτώση του βράχου, η απόσταση s , μεταξύ των αγκυρίων πρέπει να ρυθμιστεί αναλόγως ($s < 3e$).
4. Επιλέγεται το διάστημα c μεταξύ των αγκυρίων κατά μήκος του άξονα του ανοίγματος. Συνήθως το διάστημα c είναι ίσο με την απόσταση s .
5. & 6. Με τη χρήση των παραπάνω πληροφοριών και γνωρίζοντας την έκταση του ανοίγματος στο διάγραμμα, είναι δυνατό να καθοριστεί ο παράγοντας ενίσχυσης (ο οποίος δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 2). Ο παράγοντας ενίσχυσης αντιστοιχεί στη μείωση του ποσοστού κάμψης της οροφής που προκαλείται από την υποστήριξη του βράχου σε σχέση με το ποσοστό κάμψης της οροφής του μη υποστηριζόμενου βράχου. Για παράδειγμα η τιμή 2 για τον παράγοντα ενίσχυσης αντιστοιχεί σε μια μείωση της κάμψης της οροφής στο μισό, έναντι της ανυποστήρικτης οροφής.

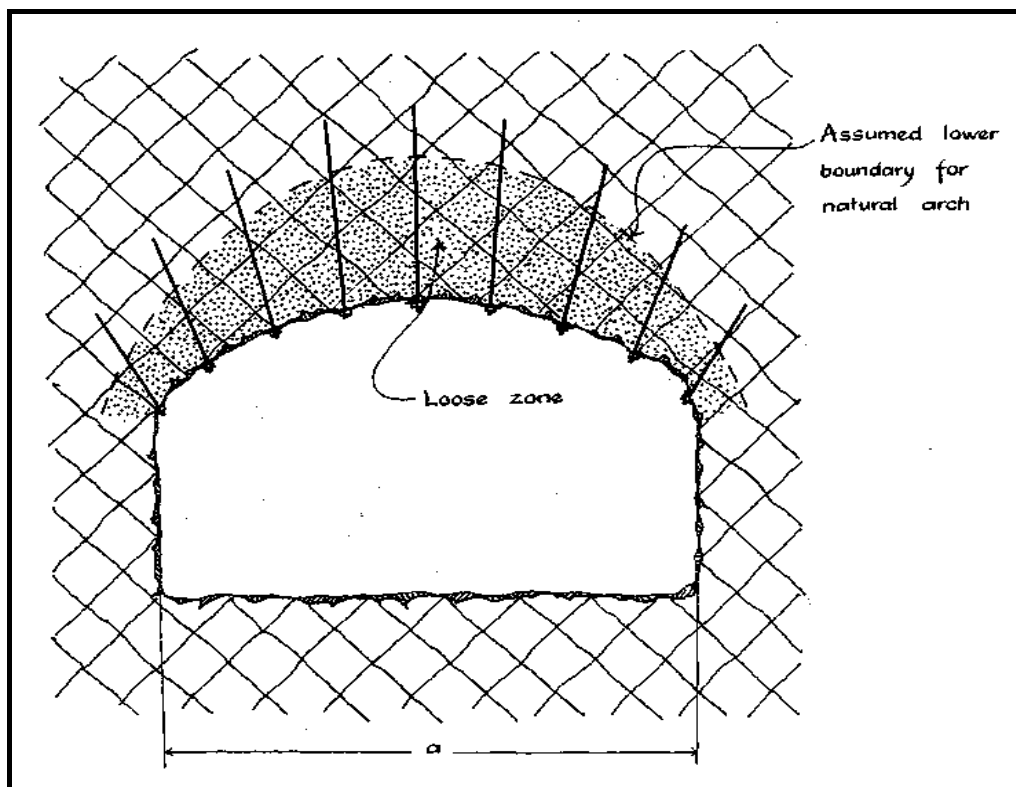


Σχήμα 2.11: Υποστήριξη ασταθούς οριζόντιου στρωματογενούς οροφής η οποία αποτελείται από αδύναμο πέτρωμα με μορφή δοκού ή πλάκας (Stillborg, 1994)

2.5.3.3 Ανάλυση Σταθερότητας της Αψίδας Τάσεων

Εάν σε ένα ακέραιο πέτρωμα εκσκάπτεται ένα άνοιγμα με μια κυρτή οροφή τότε επάνω από την οροφή του ανοίγματος διαμορφώνεται μια φυσική αψίδα τάσεων σε κάποιο βάθος μέσα στο βράχο (Σχήμα 2.12). Ο σχηματισμός της αψίδας είναι αποτέλεσμα της ανακατανομής των τάσεων στο πέτρωμα καθώς διαμορφώνεται το άνοιγμα. Ο βράχος στην αψίδα υποβάλλεται πρώτιστα στις θλιπτικές τάσεις. Η απόσταση μεταξύ του ανώτατου ορίου και του χαμηλότερου ορίου της φυσικής αψίδας εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος στο οποίο εκσκάπτεται το άνοιγμα και το πλάτος του ανοίγματος. Αυτό το φαινόμενο καλείται "φυσική ανάπτυξη αψίδων".

Για να διατηρηθεί η σταθερότητα της φυσικής αψίδας, η "χαλαρή ζώνη" κάτω από την αψίδα, καθώς επίσης και τα τοιχώματα του ανοίγματος πρέπει να σταθεροποιηθούν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση προεντεταμένων ή μη αγκυρίων. Οι κοχλίες τριβής ή οι κοχλίες με συγκολλητικές ύλες που μπορεί να χρησιμοποιούνται, πρέπει να αγκυρωθούν στο υγιές πέτρωμα πάνω από τη φυσική αψίδα (Σχήμα 2.12). έτσι πρέπει να προσδιοριστεί η θέση του χαμηλότερου ορίου της φυσικής αψίδας και ως εκ τούτου να γίνει η εκτίμηση του μήκους των αγκυρίων.



Σχήμα 2.12: Η φυσική αψίδα τάσεων. Η χαλαρωμένη ζώνη κάτω από την αψίδα υποστηρίζεται από κοχλίες που αγκυρώνονται πάνω από την αψίδα (Stillborg, 1994)

Το Νορβηγικό Ίδρυμα για την Τεχνική Ανατίναξης Πετρωμάτων (IFF) έχει προτείνει έναν τύπο για τον υπολογισμό του μήκους των αγκυρίων στο κεντρικό τμήμα του ανοίγματος:

$$L = 1.40 + 0.184\alpha \quad (2.4)$$

όπου α είναι το πλάτος του ανοίγματος, σε μέτρα. Το διάστημα μεταξύ των αγκυρίων καθορίζεται από την πυκνότητα των ασυνεχειών. Προτιμούνται τα μη προεντεταμένα αγκύρια στην συγκράτηση του βράχου, όπου το χαμηλότερο όριο της φυσικής αψίδας είναι πιο στενό στην οροφή του ανοίγματος από ότι στην περίπτωση του ενωμένου βράχου. Τα Swellex ή τα προεντεταμένα αγκύρια που χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν τη "ζώνη χαλάρωσης" κάτω από την φυσική αψίδα, διαμορφώνουν μια τεχνητή αψίδα κοντά στο άνω όριο του ανοίγματος (Σχήμα 2.13) (Stillborg, 1994)

Αυτό χρίζει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τις λιγότερο σταθερές δομές πετρωμάτων, όπου το χαμηλότερο όριο της αψίδας είναι πιο μακριά από την οροφή του ανοίγματος. Η συστολή στο μήκος του κοχλίου Swellex, αλλά κυρίως η επιμήκυνση του χαλύβδινου σωλήνα, όταν διογκώνεται ο κοχλίας, επιβάλλει την ακτινωτή πίεση στον περιβάλλοντα βράχο. Ιδιαίτερα στα πετρώματα με πολλές ασυνέχειες αυτή η ακτινωτή πίεση περιορίζει το βράχο που περιβάλλει τον κοχλία. Τα αποτελέσματα αυτού του περιορισμού είναι πολύ θετικά στο σχηματισμό μιας τεχνητής αψίδας. Αυτή η αντίληψη έρχεται σε αντίθεση με τη χρήση κοχλίων που αγκυρώνονται στη φυσική αψίδα (Σχήμα 2.12). Σε αψίδα με ενίσχυση, η εκσκαφή είναι οριακή κάτω από μια ζώνη υπό τη πίεση υψηλών εφαπτόμενων / περιφερειακών τάσεων. Τα αγκύρια χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την διατμητική αντίσταση των ενώσεων και την ορθή τάση στις ενώσεις. Από πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών, έχει διαπιστωθεί ότι η αναλογία L/s του μήκους των αγκυρίων L , προς την απόσταση μεταξύ των αγκυρίων s , πρέπει να είναι κοντά στο 2. Το διάστημα μεταξύ των αγκυρίων s εξαρτάται από τη χαρακτηριστική απόσταση e των ασυνεχειών. Η ανισότητα $s \leq 3e$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως όριο για το διάστημα s . Η ένταση T , στο αγκύριο πρέπει να βρεθεί μεταξύ των ορίων (Stillborg, 1994):

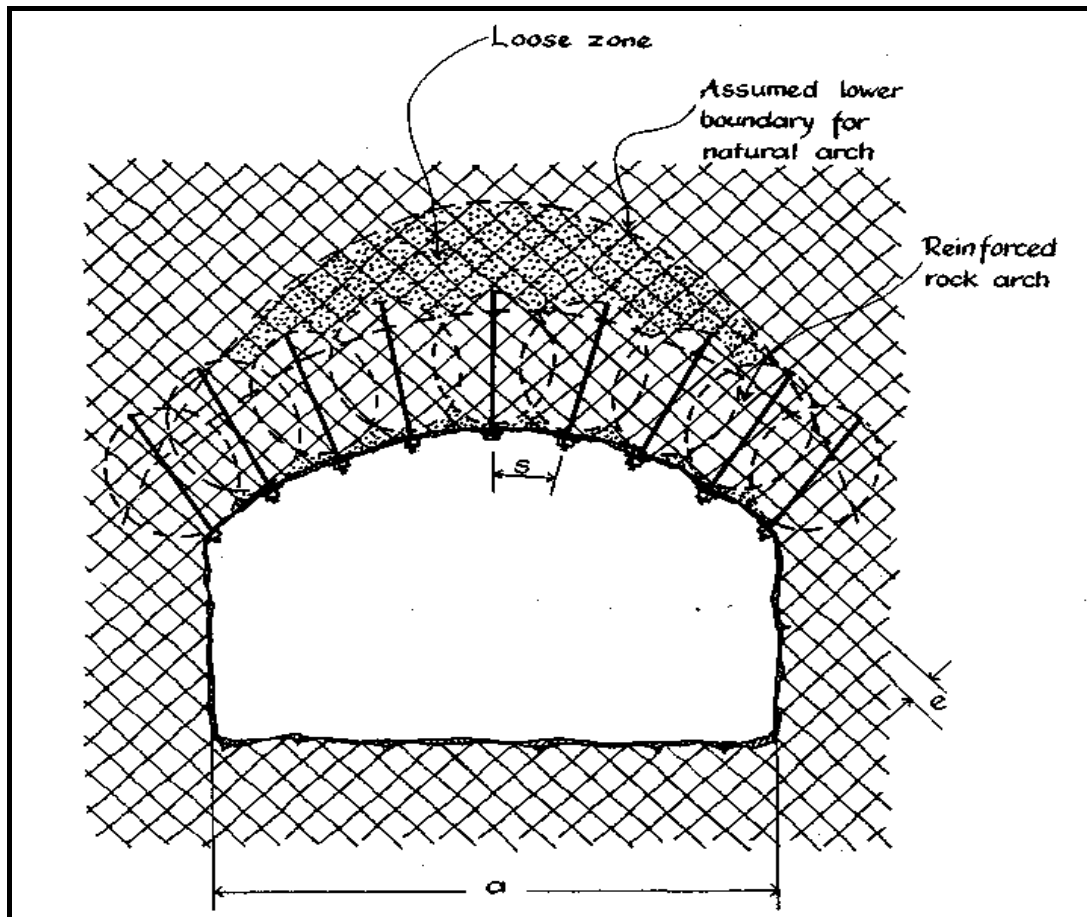
$$0.5B < T < 0.8B \quad (2.5)$$

όπου

T = η εφαρμοζόμενη τάση στον κοχλία

B = η φέρουσα ικανότητα του κοχλίου

Η έννοια της ενίσχυσης της κυρτής οροφής μιας εκσκαφής, για να διαμορφωθεί μια δομικά ικανή αψίδα, είναι θεμελιώδης στο σχεδιασμό της ενίσχυσης πετρωμάτων και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπειρικές μεθόδους σχεδιασμού (Stillborg, 1994).



Σχήμα 2.13: Η φυσική αψίδα τάσεων. Η χαλαρωμένη ζώνη κάτω από την αψίδα υποστηρίζεται από προεντεταμένα αγκύρια. Αυτό δημιουργεί μία τεχνητή αψίδα κοντά στο άνω όριο του ανοίγματος (Stillborg, 1994)

2.6 Παρακολούθηση και Έλεγχος της Λειτουργίας της Κοχλίωσης

Η εφαρμογή της κοχλίωσης της οροφής ως μέθοδος υποστήριξης σε δεδομένη υπόγεια εκσκαφή δεν αποτελεί απλό θέμα. Πέραν των τεχνικών προβλημάτων που πρέπει να επιλυθούν απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να αποφευχθούν λάθη τα οποία μπορούν να οδηγήσουν τους μηχανικούς και το υπόλοιπο προσωπικό σε λανθασμένα συμπεράσματα σχετικά με την επίτευξη της επιδιωκόμενης ασφαλείας.

Όπως έγινε ήδη σαφές για την ολοκλήρωση της κοχλίωσης απαιτούνται τα ακόλουθα βήματα (Οικονομόπουλος, 1989):

- Η μελέτη των χαρακτηριστικών του πετρώματος που υποστηρίζεται και των περιβαλλόντων πετρωμάτων.
- Η επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου κοχλίας και ο καθορισμός των βασικών στοιχείων της κοχλίωσης (μήκος, διάταξη, πυκνότητα, προένταση κλπ.).
- Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κοχλίωσης, ιδιαίτερα κατά την πρώτη

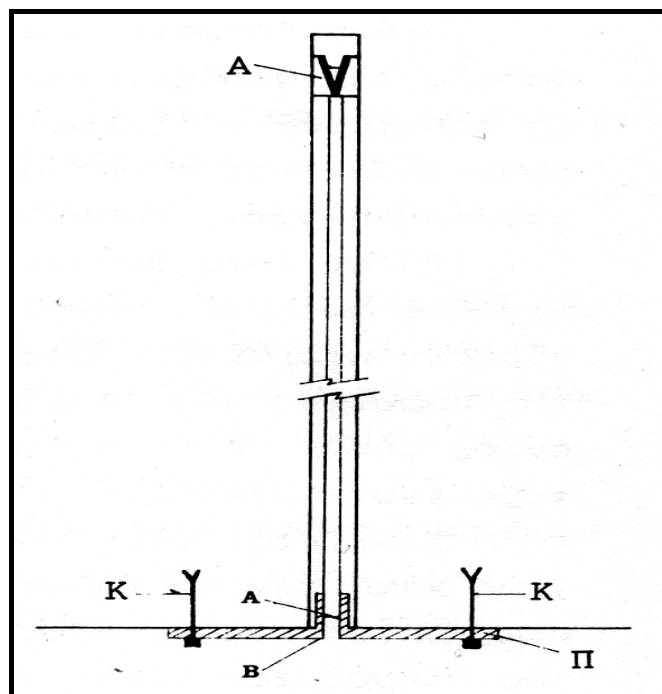
φάση της εφαρμογής της, για την εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων.

Μόλις η μέθοδος αρχίσει να εφαρμόζεται, πρέπει να αρχίσει να παρακολουθείται η συμπεριφορά της κοχλίωσης για την εξαγωγή απαιτητών συμπερασμάτων. Η φάση αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν κανόνες βάσει των οποίων μπορεί να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου με μεγάλη ακρίβεια.

Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να παρακολουθείται αμέσως μετά την τοποθέτηση των αγκυρίων είναι το μέγεθος της διόγκωσης των πετρωμάτων της οροφής, η οποία ουσιαστικά καθορίζει και την παραμόρφωση της. Το μέγεθος αυτό μετράται με μια απλή διάταξη (Σχήμα 2.14) και είναι καθοριστικής σημασίας για την συγκριτική μελέτη καταλληλότητας των διαφόρων τύπων κοχλιών.

Οι εν λόγω μετρήσεις δεν αποτελούν μόνο μέσο επίβλεψης της οροφής, αλλά επιπρόσθετα συμβάλλουν στην έρευνα για τον προσδιορισμό του εκάστοτε βέλτιστου τρόπου κοχλίωσης. Αφ' ετέρου επιτρέπουν την σύγκριση της συμπεριφοράς της υποστήριξης της οροφής σε σχέση με διάφορες άλλες μεθόδους υποστήριξης.

Εκτός όμως από τα προηγούμενα, έλεγχοι και παρατηρήσεις δευτερεύουσας σημασίας, μπορούν να οδηγήσουν σε πολύτιμα συμπεράσματα μέσω των οποίων θα πραγματοποιηθεί η τελειοποίηση του συστήματος της κοχλίωσης της οροφής.



Σχήμα 2.14: Διάταξη για την μέτρηση της ανάπτυξης της οροφής, μέσω της μεταβολής της απόστασης AB. (A = Σημείο αγκύρωσης, K = Μικροί κοχλίες, Π = Πλάκα αναφοράς)

(Οικονομόπουλος, 1989)

Κατά την περίοδο έναρξης των δοκιμών είναι σωστότερο να χρησιμοποιηθούν είτε ειδικές στοές είτε μεμονωμένα τμήματα του ανοίγματος στα οποία δεν κινδυνεύει η ασφάλεια του προσωπικού. Στη συνέχεια, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων και της εμπειρίας που αποκτάται, επεκτείνεται η εφαρμογή της κοχλίωσης και στις υπόλοιπες περιοχές του ανοίγματος. Παράλληλα, επιβάλλεται κατά κανόνα, για λόγους ασφαλείας, η χρήση και άλλων τύπων υποστήριξης, κυρίως ορθοστατών ή μεταλλικών πλαισίων, οι οποίοι μπορούν να αφαιρεθούν ανάλογα με τα αποτελέσματα.

Ο υπεύθυνος μηχανικός οφείλει να αντιληφθεί ότι δεν υπάρχουν περιθώρια αποτυχίας κατά την αρχική φάση της εφαρμογής της κοχλίωσης, δεδομένου ότι, σε αυτή την περίπτωση, δημιουργείται δυσμενές κλίμα σχετικά με την αποτελεσματικότητα του σχεδίου υποστήριξης (Οικονομόπουλος, 1989).

2.7 Αστοχίες κατά την Εφαρμογή της Κοχλίωσης

Στη συνέχεια αναλύονται τα συνηθέστερα περιστατικά αστοχίας, τα οποία παρατηρούνται κατά την εφαρμογή της κοχλίωσης οροφής (Οικονομόπουλος, 1989).

Αστοχία του Κοχλία

Η αστοχία αυτού του τύπου συμβαίνει συνήθως στο τμήμα του κοχλία όπου υπάρχει το σπείρωμα. Σπανιότερα, και ειδικά στους κοχλίες με σφήνα, μπορεί να σημειωθεί αστοχία στο επίπεδο της εγκοπής.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με διάφορα μέτρα, όπως έλεγχος της ποιότητας του χάλυβα και γενικότερα της κατασκευής του κοχλία. Η μεταβολή του μήκους του κοχλία, η μεταβολή του βήματος προχώρησης και η καλύτερη μελέτη της εκάστοτε περίπτωσης οδηγούν στην καλύτερη αλληλεπίδραση της παραμόρφωσης του πετρώματος και την αντίδραση του κοχλία και της πλάκας.

Διέλευση του περικοχλίου μέσα από την πλάκα

Όταν το πέτρωμα παραμορφώνεται και η πλάκα δεν επιδεικνύει ικανοποιητική αντίδραση προς την ανάλογη παραμόρφωση, το περικόχλιο έχει την τάση να διέλθει μέσα από την πλάκα.

Είναι προφανές ότι στην προκειμένη περίπτωση απαιτείται συμμόρφωση προς τις προδιαγραφές κατασκευής της πλάκας και ενδεχομένως αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσής της.

Πτώση της οροφής μεταξύ των κοχλίων

Παρατηρείται συνήθως στις περιπτώσεις όπου η οροφή αποτελείται από ψαθυρό υλικό ή εμφανίζει πολλές ρωγμές. Τότε σχηματίζονται μικροί θόλοι οι οποίοι τείνουν να

αποκαλύψουν τους κοχλίες.

Το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με αύξηση της πυκνότητας της κοχλίωσης, με αύξηση των διαστάσεων των πλακών και με την τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος.

Ολική πτώση της οροφής

Πτώση της οροφής η οποία έχει υποστηριχθεί με κοχλίες παρατηρείται όταν οι ρωγμές του πετρώματος προχωρούν πέρα από τα σημεία αγκύρωσης. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται αύξηση του μήκους των αγκυρίων, επίτευξη επαρκούς προέντασης και σχολαστική τήρηση των κανόνων τοποθέτησης και ελέγχου των αγκυρίων.

Πέρα από τις παραπάνω περιπτώσεις υπάρχουν και άλλα περιστατικά στα οποία μπορεί να παρατηρηθεί αστοχία της κοχλίωσης. Η αποτελεσματική όμως αντιμετώπιση τους εξαρτάται από τη σωστή μελέτη του όλου προβλήματος συναρτήσει των εκάστοτε υπαρχόντων συνθηκών.

Κεφάλαιο 3^ο

Καταγραφή των Κυριότερων Τύπων Αγκυρίων

3.1 Εισαγωγή

Ανάλογα με την κατανομή της εντατικής κατάστασης στα περιβάλλοντα πετρώματα των υπόγειων ανοιγμάτων προκύπτει ότι στην οροφή του ανοίγματος είναι πιθανόν να σχηματίζονται εφελκυστικές ζώνες. Εάν η οροφή αποτελείται από στρωματογενή πετρώματα, τότε κάθε στρώμα λειτουργεί σαν αμφιέριστη δοκός η οποία κάμπτεται σύμφωνα με τις ελαστικές της σταθερές και κατά συνέπεια είναι δυνατόν να αποχωριστεί από τα άλλα στρώματα. Στην περίπτωση που το βέλος κάμψης αυξηθεί υπερβολικά, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αστοχία της δοκού. Όταν ένας κοχλίας αγκυρώνεται σε συνεκτικό πέτρωμα είναι δυνατόν να ελαττώσει ή να απαλείψει τα φαινόμενα αυτά με μηχανισμό παρόμοιο μ' αυτόν που λειτουργεί κατά την υποστήριξη με πλαίσια ή με άλλα συστήματα μεταφοράς φορτίων.

Ένας κλασικός κοχλίας αποτελείται από μια μεταλλική ράβδο, η οποία φέρει στο ένα άκρο της το σύστημα αγκύρωσης και στο άλλο άκρο είναι δυνατόν να τοποθετηθεί περικόχλιο (παξιμάδι) το οποίο αφού έχει συσφιχθεί με ορισμένη ροπή, επιβάλλει μέσω μεταλλικής πλάκας αντίστοιχες τάσεις στο πέτρωμα.

Για την τοποθέτηση ενός κοχλία ακολουθούνται τα εξής στάδια (Αγιουτάντης, 2002):

- η όρυξη διατρήματος κατάλληλου μήκους και κατάλληλης διαμέτρου
- ο καθαρισμός του διατρήματος
- η εισαγωγή του κοχλία και του υλικού αγκύρωσης (εάν προβλέπεται)
- η τοποθέτηση του περικοχλίου και της πλάκας εφαρμογής τάσεων
- η τάνυση του κοχλία.

Οι κοχλίες ανάλογα με την προένταση της μεταλλικής ράβδου διακρίνονται στους προεντεταμένους (rock bolt, rockbolt) και στους μη προεντεταμένους (dowel) και ανάλογα με τον τύπο της αγκύρωσης σε κοχλίες σημειακής και κατανεμημένης (διανεμημένης) αγκύρωσης (Hoek and Brown, 1980).

Η διαφορά ανάμεσα στους προεντεταμένους και μη προεντεταμένους κοχλίες εντοπίζεται στη δυνατότητα εφαρμογής ενεργητικής ή παθητικής υποστήριξης

Οι αγκυρώσεις μπορούν να διαιρεθούν, σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής τους, σε τρεις κύριες κατηγορίες (Aldorf and Exner, 1986):

Κοχλίες (μικρή αγκύρωση), χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη μικρών φορτίων, μεγαλύτερα από 100 kN. Οι κοχλίες τοποθετούνται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Ανάλογα με τον τύπο της αγκύρωσης διακρίνονται σε κοχλίες μηχανικής αγκύρωσης και σε κοχλίες που αγκυρώνονται με συγκολλητικές ύλες.

Στη μηχανική αγκύρωση το τμήμα αγκύρωσης μπορεί να είναι με σπείρωμα (αναπτυσσόμενου κελύφους) ή μπορεί να είναι με μορφή σφήνας. Σε κάθε περίπτωση η αγκύρωση είναι σημειακή. Για αυτό τον λόγο οι αγκυρώσεις θα πρέπει να γίνονται σε συμπαγή πετρώματα. Αγκύρια αυτού του τύπου μπορούν να προενταθούν.

Επίσης, είναι δυνατόν να υπάρξει μηχανική αγκύρωση σ' όλο το μήκος του διατρήματος με διαφορετικό σύστημα αγκύρωσης από το προηγούμενο (αγκύρια τριβής, όπως τα Split Set και τα Swellex).

Στην περίπτωση που οι κοχλίες αγκυρώνονται με συγκολλητικές ύλες γίνεται εκμετάλλευση της συνοχής του υλικού πλήρωσης με τον κοχλία και το πέτρωμα. Το υλικό πλήρωσης μπορεί να είναι είτε με τσιμεντένεμα είτε με ρητίνη. Αυτά τα αγκύρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ασθενή πετρώματα. Η περίπτωση της προέντασης μετά την τοποθέτηση του υλικού πλήρωσης εξαρτάται από την κατασκευή του τμήματος αγκύρωσης.

Μεγάλου μήκους αγκύρια (μεγαλύτερο από 15m). Τα αγκύρια αυτά είναι χρήσιμα για μεταφορά φορτίων μεγαλύτερα από 400 kN. Η αγκύρωση αποτελείται από μια ή περισσότερες ράβδους και έχει ένα τμήμα αγκύρωσης που εισχωρεί μέσα στο πέτρωμα. Μετά την προένταση του αγκυρίου γίνεται τοποθέτηση του τσιμεντενέματος. Ένα μειονέκτημα είναι οι σημαντικές απαιτήσεις σε ελεύθερο χώρο ώστε να μπορέσει το προσωπικό να τα χειριστεί κατάλληλα. Η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με την τοποθέτηση του τμήματος αγκύρωσης χωρίς να εξέλθει το υπόλοιπο από το διάτρημα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη και σε πετρώματα. Το φορτίο της αγκύρωσης φτάνει τα 500 kN.

Αγκύρια με μορφή συρματόσχοινων, στα οποία το φορτίο αγκύρωσης είναι πολύ μεγάλο και φτάνει τα αρκετά MN. Οι αγκυρώσεις κατασκευάζονται από σύρματα ή πολλά καλώδια. Οι αγκυρώσεις με καλώδια έχουν τμήματα αγκύρωσης τα οποία μπορούν να ενταθούν και μετά να τοποθετηθεί το υλικό πλήρωσης. Η διαδικασία της αγκύρωσης και της προέντασης είναι αρκετά πολύπλοκη (Αντωναρίδου, 1998).

3.2 Προεντεταμένοι Κοχλίες Σημειακής Αγκύρωσης

Οι προεντεταμένοι κοχλίες σημειακής αγκύρωσης χρησιμοποιούνται κυρίως στα ορυχεία. Στα υπόγεια τεχνικά έργα χρησιμοποιούνται συνήθως ως συνδυασμός μηχανικής

αγκύρωσης και αγκύρωσης με την προσθήκη υλικού πλήρωσης. Οι κοχλίες με εγκοπή και σφήνα είναι μόνο αποτελεσματικοί σε συμπαγή πετρώματα, και έχουν αντικατασταθεί από τους κοχλίες επεκτεινόμενου κελύφους. Οι κοχλίες αυτού του τύπου μπορούν να προενταθούν στο όριο διαρροής του μετάλλου σε συμπαγή πετρώματα. Εάν υπάρξει τοπική θραύση του πετρώματος στο σημείο αγκύρωσης έχει ως αποτέλεσμα την ολίσθηση του κοχλία σε πιο μαλακά πετρώματα (Hoek and Brown, 1980).

3.2.1 Κοχλίας με Εγκοπή και Σφήνα

Ο κοχλίας με εγκοπή και σφήνα κατασκευάζεται από μαλακό χάλυβα, με ελάχιστη αντίσταση σε θραύση 392MPa - 490MPa. Το ένα άκρο της ράβδου φέρει διαμετρική εγκοπή ανοίγματος 2-3 mm, με μήκος 150 mm. Η εγκοπή δέχεται χαλύβδινη σφήνα που το πάχος στην κεφαλή είναι 16-20 mm (Σχήμα 3.1).

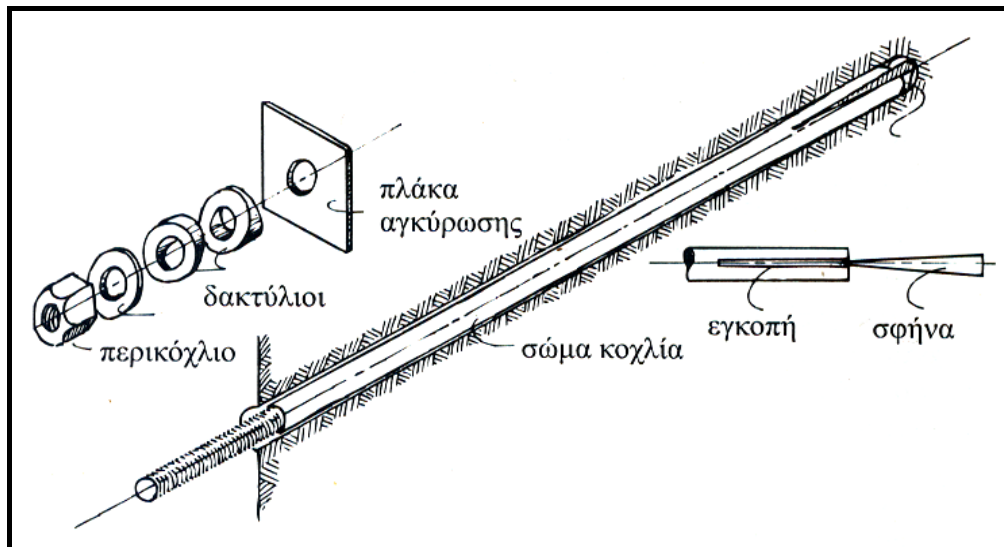
Η κεφαλή της σφήνας έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του διατρήματος, ώστε να επιτευχθεί το άνοιγμα των χειλών της ράβδου που δημιουργήθηκε από την εγκοπή, και τα οποία σε επαφή με το πέτρωμα εξασφαλίζουν την αγκύρωση του κοχλία λόγω δυνάμεων τριβής.

Το άλλο άκρο της ράβδου φέρει σπείρωμα μήκους 150 mm περίπου. Ο κοχλίας συμπληρώνεται με πλάκα διαστάσεων 15*15 ή 20*20 cm και πάχους 5-10 mm και περικόχλιο.

Για την τοποθέτηση του κοχλία απαιτείται η όρυξη διατρήματος με διάμετρο που δεν πρέπει να διαφέρει και πολύ από την διάμετρο της ράβδου. Η διάμετρος της ράβδου κυμαίνεται μεταξύ 22 και 30 mm και το μήκος της από 0.5-2.5 m. Τα παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται από τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αγκύρωσης. Κατά κανόνα αποφεύγεται διάμετρος μικρότερη των 24 mm, γιατί η ράβδος υφίσταται κρούσεις για την σφήνωση της και επομένως υπάρχει κίνδυνος λυγισμού αυτής.

Η διαφορά ανάμεσα στην διάμετρο του διατρήματος και στην διάμετρο της ράβδου θα πρέπει να διατηρείται μεταξύ των 6-8 mm σε σκληρά πετρώματα και μεταξύ των 4-5 mm σε μαλακά πετρώματα.

Επίσης, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην ακριβή όρυξη του απαιτούμενου μήκους του διατρήματος. Σε περίπτωση όρυξης μεγαλύτερου μήκους διατρήματος γίνεται κακή αγκύρωση και τοποθετείται απλώς η πλάκα και συσφίγγεται το περικόχλιο. Εάν αντίθετα το μήκος του διατρήματος είναι μικρό η αγκύρωση μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση περισσότερων πλακών για την σύσφιγξη του περικοχλίου.



Σχήμα 3.1: Κοχλίας σημειακής αγκύρωσης με μεταλλική σφήνα (Hoek and Brown, 1980)

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι μελέτες στα γαλλικά μεταλλεία σιδήρου, οι κοχλίες αυτού του είδους χρησιμοποιούνται σε πετρώματα που το μέτρο ελαστικότητας τους κυμαίνεται μεταξύ 60.000 kp/cm^2 (5.880 MPa) και 500.000 kp/cm^2 (49.000 MPa) (Αντωναρίδου, 1998).

Σε μαλακά πετρώματα η σφήνα εμπνέγεται εντός του πυθμένα του διατρήματος και δεν προκαλεί επαρκές άνοιγμα των χειλών της ράβδου, ενώ αντιθέτως σε σκληρά πετρώματα το άνοιγμα των χειλών επιτελείται πλήρως.

Η ικανότητα του κοχλίας εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο που επιβάλλεται η απαιτούμενη για την αγκύρωση κρούση. Το κρουστικό εργαλείο θα πρέπει να διατηρείται σε καλή κατάσταση λειτουργίας και οι κρούσεις να επιβάλλονται αξονικά και για χρόνο τουλάχιστον 20 δευτερολέπτων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κοχλίων αυτών είναι: α) φθινό σύστημα υποστήριξης, β) απλή διαδικασία τοποθέτησης, γ) πολύ καλή αγκύρωση σε σκληρά πετρώματα με ικανότητα άμεσης προέντασης και δ) αποφεύγεται η απότομη χαλάρωση της αγκύρωσης γιατί ο κοχλίας ολισθαίνει μέσα στο πέτρωμα, ενώ συγχρόνως εξακολουθεί να διατηρεί την ικανότητα του.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι: α) η απαιτούμενη ακρίβεια κατά την όρυξη του διατρήματος, τόσο ως προς το μήκος του, όσο και ως προς την διάμετρό του, β) μικρή επιφάνεια επαφής του κοχλίας με το πέτρωμα και γ) υπάρχει πιθανότητα να συμβεί άμεση ολίσθηση ή αστοχία εάν το σημείο αγκύρωσης δεν είναι κατάλληλο.

Σε μαλακά πετρώματα, η αγκύρωση ολισθαίνει πριν το φορτίο λάβει την επιθυμητή τιμή. Η επιφάνεια έδρασης των της ράβδου δεν εξασφαλίζει επαρκή τριβή με το πέτρωμα

και ο κοχλίας «σχιζεί» εύκολα το πέτρωμα. Μπορεί να συμβεί τοπική αστοχία στο πέτρωμα με αναμενόμενη ολίσθηση του κοχλία όταν το πέτρωμα έχει αντοχή μικρότερη από 10 MPa. Για την αντιμετώπιση αυτού του μειονεκτήματος χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία διάφορες διατάξεις.

Για την σωστή αγκύρωση απαιτείται κατά κύριο λόγο επαρκής κρούση, ο εφελκυσμός που θα ασκηθεί αργότερα είναι λιγότερο απαραίτητος όμως υποβοηθάει στην βελτιστοποίηση της αγκύρωσης (Οικονομόπουλος, 1985).

Σήμερα χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια εξαιτίας της αναξιοπιστίας της αγκύρωσης τους σε μαλακά πετρώματα και για αυτό το λόγο έχουν αντικατασταθεί από τους κοχλίες αναπτυσσόμενου κελύφους. (Hoek and Brown, 1980).

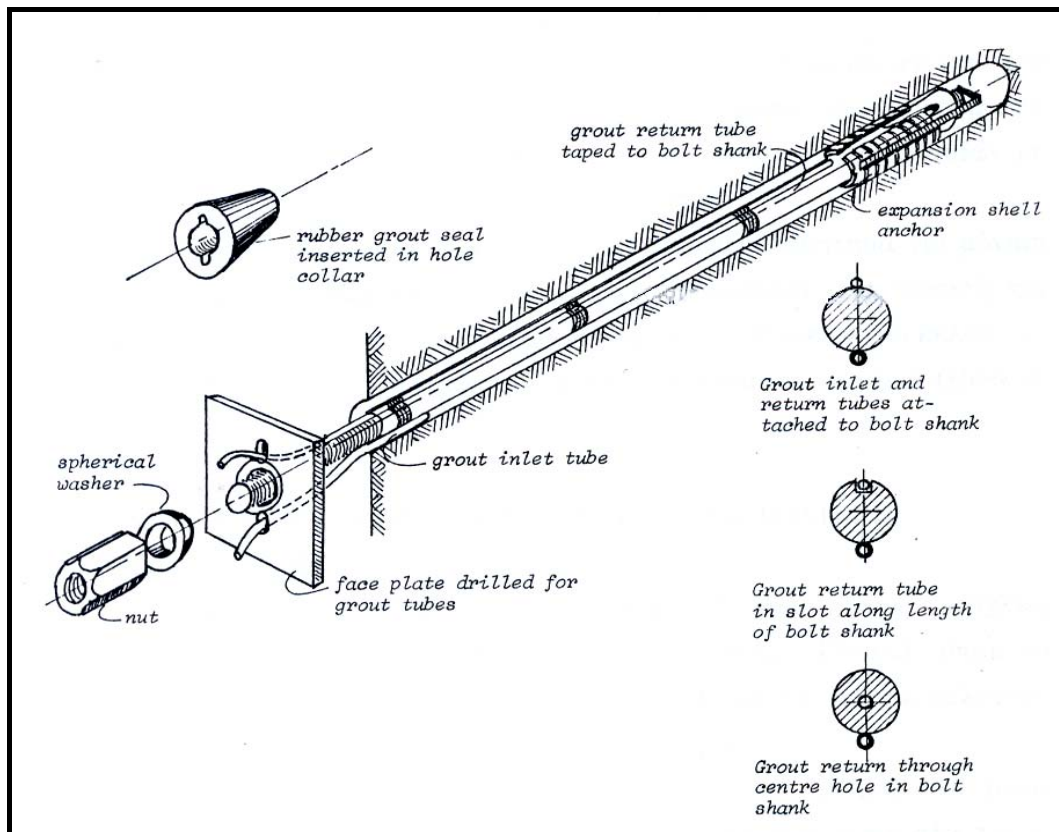
3.2.2 Κοχλίας Διαστολής ή Αναπτυσσόμενου Κελύφους

Οι κοχλίες αναπτυσσόμενου κελύφους χρησιμοποιήθηκαν για να δώσουν μεγαλύτερη αξιοπιστία στην αγκύρωση σε ένα ευρύτερο φάσμα πετρωμάτων σε σχέση με τους κοχλίες με σφήνα (Hoek and Brown, 1980).

Ο κοχλίας αναπτυσσόμενου κελύφους (Σχήμα 3.2) αποτελείται από μια ράβδο ειδικού χάλυβα στο άκρη της οποίας υπάρχει σπείρωμα. Η κεφαλή της ράβδου είναι κωνική ή πυραμοειδής, η οποία ολισθαίνει στο εσωτερικό του κελύφους. Η κεφαλή είναι σταθερά προσαρμοσμένη στην ράβδο ή βιδώνεται σε αυτήν.

Για την ικανοποιητική αγκύρωση του κοχλία διαστολής θα πρέπει να επιτευχθεί «προσκόλληση» του κελύφους στα τοιχώματα του διατρήματος, για αυτό θα πρέπει να ασκηθεί ώθηση από την κεφαλή στο κέλυφος κάθετα στα τοιχώματα. Με την ώθηση επιτυγχάνεται όχι μόνο διείδυση του κελύφους στο πέτρωμα, αλλά και εξαιτίας της τριβής αναπτύσσεται επαρκής πρόσφυση του κοχλία, ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της αγκύρωσης.

Είναι σύνηθες οι κοχλίες αυτοί να συνδυάζονται με κατανεμημένη αγκύρωση από τσιμέντο (grout). Στην περίπτωση αυτή, το αναπτυσσόμενο κέλυφος παραλαμβάνει την αρχική τάνυση, ενώ το τσιμέντο παραλαμβάνει τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την παθητική φόρτιση του κοχλία (Αγιουτάντης, 2002). Υπάρχουν διάφοροι τύποι σωλήνων πλήρωσης οι οποίοι απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2. Η εισαγωγή του υλικού πλήρωσης σταματάει όταν ο αέρας έχει αντικατασταθεί από το υλικό πλήρωσης και όταν αυτό πέφτει από τον σωλήνα επιστροφής.



Σχήμα 3.2: Κοχλίας αναπτυσσόμενου κελύφους (Hoek and Brown, 1980)

Ο κοχλίας αυτός προτιμάται σε περιπτώσεις πετρωμάτων των οποίων το μέτρο ελαστικότητας είναι μικρότερο των 60.000 kp/cm^2 (5880 MPa) ή μεγαλύτερο των 500.000 kp/cm^2 (49.000 MPa), και πολλές φορές χρησιμοποιείται και σε πετρώματα των οποίων το μέτρο ελαστικότητας είναι εντός της περιοχής 60.000 kp/cm^2 (5880 MPa) και 500.000 kp/cm^2 (49.000 MPa). Στους κοχλίες αναπτυσσόμενου κελύφους η μέγιστη ανάπτυξη του κελύφους ποικίλει μεταξύ 10 και 22mm. Δεδομένου ότι για την εισαγωγή του κοχλία στο διάτρημα απαιτείται περιθώριο λίγων χιλιοστών, είναι προφανές ότι η ικανότητα ανάπτυξης του κελύφους μειώνεται. για την επίτευξη ικανοποιητικής αγκύρωσης είναι απαραίτητο να ορύσσονται τα διατρήματα στην ακριβή διάμετρο για την πλήρη εκμετάλλευση της δυνατότητας ανάπτυξης του κελύφους. Το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου συναρτήσεως των χαρακτηριστικών του πετρώματος (Οικονομόπουλος, 1985).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κοχλίων αυτών είναι: α) η πολύ αξιόπιστη αγκύρωση σε συμπαγή πετρώματα, β) μπορεί να επιτύχει υψηλό φορτίο, γ) η απαίτηση ακρίβειας ως προς το μήκος του διατρήματος σε σύγκριση με τους κοχλίες με σφήνα είναι μικρότερη και δ) η ανοχή για την διάμετρο είναι λιγότερη σημαντική.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι: α) το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τους κοχλίες με σφήνα, β) εξαιτίας της ειδικής του μορφής δεν μπορούν να κατασκευαστούν στο ορυχείο όπως συμβαίνει με τους κοχλίες με σφήνα, γ) στην τοποθέτηση απαιτείται έμπειρο προσωπικό και επίβλεψη από τον υπεύθυνο μηχανικό και δ) οι σωλήνες γόμωσης καταστρέφονται συχνά κατά την διάρκεια της τοποθέτησης (Οικονομόπουλος, 1985).

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται πολύ συχνά για μόνιμη υποστήριξη σε υπόγεια τεχνικά έργα όταν γίνεται συνδυασμός σημειακής και κατανεμημένης αγκύρωσης. Ο κοχλίας αναπτυσσόμενου κελύφους, χωρίς την προσθήκη υλικού πλήρωσης, χρησιμοποιείται σε ορυχεία (Hoek and Brown, 1980).

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των κοχλίων αναπτυσσόμενου κελύφους
(Αντωναρίδου, 1998)

Διάμετρος κελύφους (mm)					Διάμετρος διατρήματος (mm)		Μάζα (kg)
16	20	24	26	30	min	max	
Bail Shell							
BS 1631					31	33	18.75
BS 1632					32	35	21
	BM 2033				33	35	48.5
BM 1634					34	37	23.6
BM 1635					35	40	30
	BM 2036				36	40	28
BL 1635					35	40	33
	BL 2036				36	40	32
BL1638					38	43	45.4
	BL 2038				38	43	42
BL 1641					41	44	50.3
	BL 2041				41	44	49
BL 1643					43	48	35
	BL 2043				43	48	51.3
	BL 2050				50	55	68
		BL 2450			50	55	65
			BL 2650		50	55	63
				BL3260	60	65	104.5
Washer Support Shell							
WC 1636					36	40	32
WC 1638					38	41	40.5

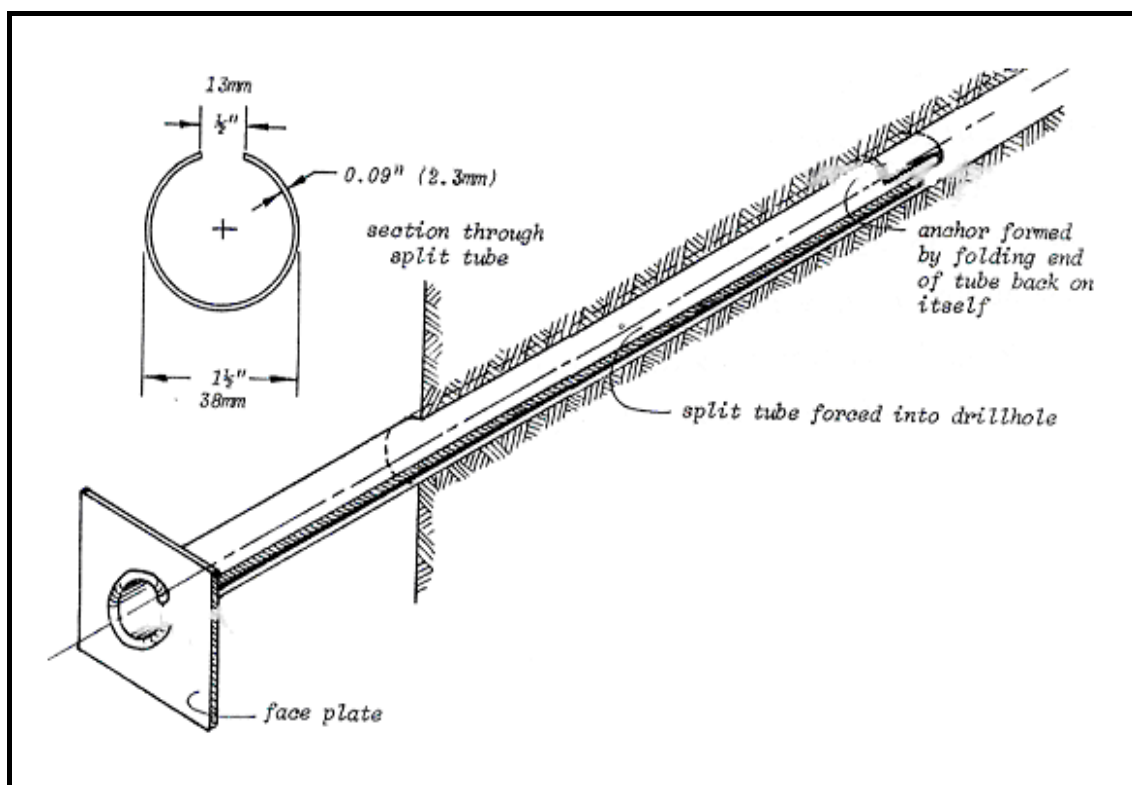
3.3 Μη Προεντεταμένοι Κοχλίες Μηχανικής Αγκύρωσης Πλήρους Επαφής

3.3.1 Μη Προεντεταμένος Διαχωριζόμενος Κοχλίας (Split Set)

Ο κοχλίας Split-Set αποτελείται από τον σωλήνα και την πλάκα (Σχήμα 3.3). Ο χαλύβδινος σωλήνας έχει μία σχισμή κατά μήκος. Η διάμετρος της άκρης του κοχλίας που τοποθετείται στον πυθμένα του διατρήματος είναι μικρότερη, έτσι ώστε να τοποθετηθεί πιο εύκολα ο κοχλίας στο διάτρημα, ενώ στο άλλο άκρο είναι τοποθετημένος ένας μεταλλικός δακτύλιος για να διατηρεί την πλάκα στην θέση της.

Το διάτρημα, το οποίο έχει διάμετρο μικρότερη από αυτήν του κοχλίας Split Set ανοίγεται με μήκος μεγαλύτερο τουλάχιστον κατά 2 in (51mm) από το μήκος του κοχλίας Split Set.

Ο κοχλίας με διάμετρο μεγαλύτερη από αυτήν του διατρήματος τοποθετείται μέσα στο διάτρημα, πιέζεται από αυτό και κλείνει η σχισμή. Η ελαστικότητα του κοχλίας δίνει ένα κυκλικό φορτίο στο πέτρωμα και γενικά μια αντίσταση τριβής που μεταφέρεται από το πέτρωμα στο μέταλλο. Επομένως η διάμετρος του διατρήματος πρέπει να έχει μικρή απόκλιση από τις προδιαγραφές.



Σχήμα 3.3: Μη προεντεταμένος διαχωριζόμενος κοχλίας (Split-Set) (Hoek and Brown, 1980)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κοχλίων αυτών είναι: α) η γρήγορη τοποθέτησή τους, β) είναι φθηνότεροι σε σχέση με τον κοχλία που αγκυρώνεται με την βοήθεια συγκολλητικών υλικών της όμοιας ικανότητας με αυτόν και γ) το φορτίο που αναπτύσσει μεγαλώνει με τον χρόνο.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι α) πρέπει να τοποθετούνται κοντά στο μέτωπο προχώρησης, β) δεν μπορούν να προενταθούν και για αυτόν τον λόγο ενεργούν με την μετακίνηση του πετρώματος, γ) η τοποθέτηση τους μερικές φορές αποτυχαίνει εξαιτίας της κρίσιμης διαμέτρου, δ) σκουριάζουν γρήγορα και παρουσιάζεται πρόβλημα όταν απαιτείται υποστήριξη για μεγάλο χρονικό διάστημα, ε) ο σχεδιασμός τους δεν επιτρέπει την προσθήκη συγκολλητικού υλικού και έτσι αναπτύσσουν μικρές αντοχές, στ) τοποθετούνται στην οροφή όταν το πέτρωμα είναι αυτοϋποστηριζόμενο, ζ) η τοποθέτηση τους γίνεται με αερόσφυρες και έτσι περιορίζεται το μήκος τους και η) συνήθως αστοχούν με ολίσθηση.

Χρησιμοποιούνται σε ορυχεία για την υποστήριξη μικρού φορτίου, και για μικρό χρονικό διάστημα. Η χρήση τους σε υπόγεια τεχνικά έργα είναι πολύ μικρή (Hoek and Brown, 1980).

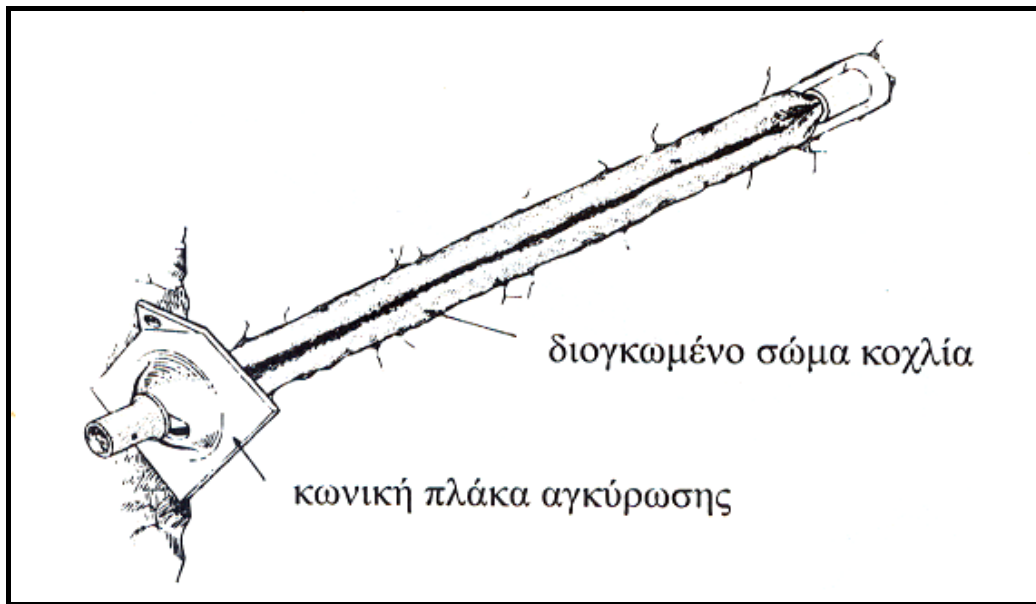
3.3.2 Μη Προενταμένος Σωληνοειδής Κοχλίας (Swellex)

Ο κοχλίας Swellex (Σχήμα 3.4) χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα πετρωμάτων όπως σε πετρώματα με μεγάλες παραμορφώσεις, ή σε πετρώματα που απαιτούν υψηλό φορτίο και σε περιβάλλον διαβρωτικό.

Ο κοχλίας είναι κατασκευασμένος από υψηλής αντοχής και ποιότητας κατασκευής χαλύβδινο σωλήνα, κλειστό στα δύο άκρα του με κατάλληλα πώματα και είναι ειδικά «διπλωμένο», έτσι ώστε η εξωτερική διάμετρος του κοχλίας να είναι μικρότερη από αυτή του διατρήματος εντός του οποίου θα τοποθετηθεί, εντελώς ανεμπόδιστα. Μετά την πλήρη εισαγωγή του κοχλίας Swellex στο διάτρημα, από κατάλληλη αντλία διοχετεύεται νερό υπό υψηλή πίεση (π.χ. 300bar ή 30MPa) στον κοχλία, μέσω ειδικού ελαφρού βραχίονα.

Μέσω της εισπίεσης του ύδατος υψηλής πίεσης στον κοχλία, προκαλείται ταχύτατα η έντονη διόγκωση του, έτσι ώστε αυτός να προσαρμόζεται ισχυρώς και να αγκυρώνεται κάτω από υψηλές τιμές πρόσφυσης επί των τοιχωμάτων και των ανωμαλιών του διατρήματος, καθ' όλο το μήκος του και υπό ομοιόμορφη τάση επί του πετρώματος.

Ο μηχανισμός δράσης του κοχλίας Swellex βασίζεται στην ανάπτυξη ισχυρότατων δυνάμεων τριβής επί της διεπιφάνειας χάλυβα και πετρώματος. Οι ακτινικές δυνάμεις που προκαλούν τις εν λόγω αντιστάσεις τριβής, οφείλονται τόσο στην δυναμική διόγκωση του σωλήνα όσο και των ανάγλυφων παρειών του διατρήματος.



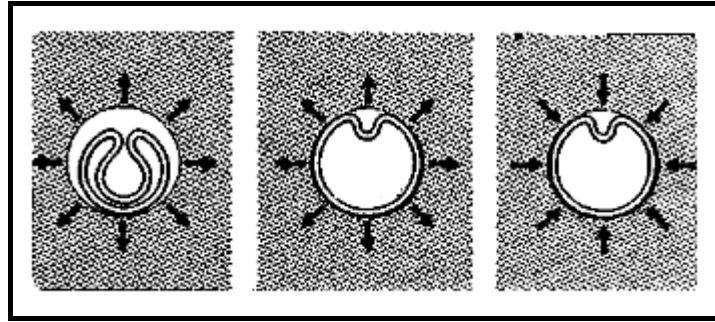
Σχήμα 3.4: Μη προεντεταμένος σωληνοειδής κοχλίας (Swellex) (Stillborg, 1994)

Η αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα, προκαλεί λόγω της διαμήκους μηχανικής συστολής, μείωση του μήκους του, και επομένως η πλάκα συγκράτησης ασκεί πίεσης προς την ελεύθερη εξωτερική επιφάνεια του πετρώματος, γύρω από την περιοχή του στομίου του διατρήματος. Κατά την διάρκεια της προκαλούμενης διόγκωσης ο κοχλίας ασκεί ακτινικές πιέσεις στο πέτρωμα οι οποίες έχουν σταθερή τιμή και είναι ομοιόμορφα κατανομημένες γύρω από τον κοχλίας.

Αμέσως μόλις διακοπεί η εισπίεση του ύδατος υψηλής πίεσης, αυτό διέρχεται από ειδική οπή στο ελεύθερο πόμα του κοχλίας. Τότε το πέτρωμα ασκεί επί του κοχλίας τάσεις αντίδρασης στην προκαλούμενη συμπίεση του, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω την μηχανική συνάφεια του με τον κοχλίας,

Σε χαλαρά και εύθρυπτα πετρώματα απαιτείται συνήθως η χρήση ακριβών και εξωτερικών ειδών υποστήριξης, όπως μεταλλικά πλαίσια και σκυρόδεμα. Όμως οι κοχλίες Swellex χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς σε πολλές σήραγγες σε δύσκολες καταστάσεις πετρωμάτων και το κόστος υποστήριξης μειώθηκε αρκετά. Οι κοχλίες Swellex υποστηρίζουν και βελτιώνουν την μάζα των πετρωμάτων και αυξάνουν την φέρουσα ικανότητα αυτών

Εξαιτίας της μεγάλης πίεσης που εφαρμόζεται για την διόγκωση του κοχλίας είναι δυνατόν να εμφανιστούν ρωγμές στο πέτρωμα στην άκρη του διατρήματος. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται τοποθέτηση ενός μικρού σωλήνα στην άκρη του διατρήματος.



Σχήμα 3.5: Αλληλεπίδραση μεταξύ του κοχλίου Swellex και του πετρώματος (Αντωναρίδου, 1998)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κοχλίων αυτών είναι: α) η άμεση ανάληψη των φορτίων και αυτό προκύπτει από την βασική αρχή του μηχανισμού δράσης του, β) οι οποιεσδήποτε ανωμαλίες της ενδοδιατρηματικής επιφάνειας όχι μόνο δεν επηρεάζουν αλλά και ευνοούν την μηχανική αλληλεμπλοκή του κοχλίου με το πέτρωμα που πρόκειται να υποστηριχθεί, γ) η τοποθέτηση εντός πετρωμάτων με ασθενή φυσικά μηχανικά χαρακτηριστικά συναντά λιγότερη αντίσταση από τα πολύ σκληρά και συμπαγή πετρώματα. Συνεπώς οι ακτινικές δυνάμεις που ασκούνται επί του πετρώματος αυξάνουν την συνοχή των ασυνεχειών του και τις δυνάμεις τριβής μεταξύ των οποιοδήποτε ρωγμών του οδηγώντας τελικά σε συμπίεση και μηχανική ισχυροποίηση του προς υποστήριξη πετρώματος και βέβαια σε αυξημένη φέρουσα ικανότητα αγκύρωσης και δ) η γρήγορη τοποθέτησή τους.

Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι: α) το υψηλό κόστος β) η αντοχή του συστήματος εξαρτάται άμεσα από την αντοχή του σωλήνα λεπτού τοιχώματος γ) δεν χρησιμοποιούνται σε τεκτονισμένα πετρώματα και δ) σκουριάζουν εύκολα εξαιτίας της μη γόμωσης τους.

Η πίεση q που ασκείται από το πέτρωμα στον κοχλίο, αμέσως μετά την τοποθέτησή του υπό τελική πίεση ύδατος p , δίνεται από την ακόλουθη απλοποιημένη σχέση (Αντωναρίδου, 1998):

$$p/q = 1 + 3,2 * 10^{-6} * E_b \quad (3.1)$$

όπου E_b , το μέτρο ελαστικότητας του εκάστοτε πετρώματος.

Αυτή η σχέση καταδεικνύει ότι η ασκούμενη πίεση αντίδρασης από το πέτρωμα στον κοχλίο αυξάνει όσο μικρότερο είναι το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος και γενικότερα οι μηχανικές του ιδιότητες. Έτσι δικαιολογείται και η συχνή χρήση του εν λόγου κοχλίου σε πετρώματα πολύ χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών (Αντωναρίδου, 1998).

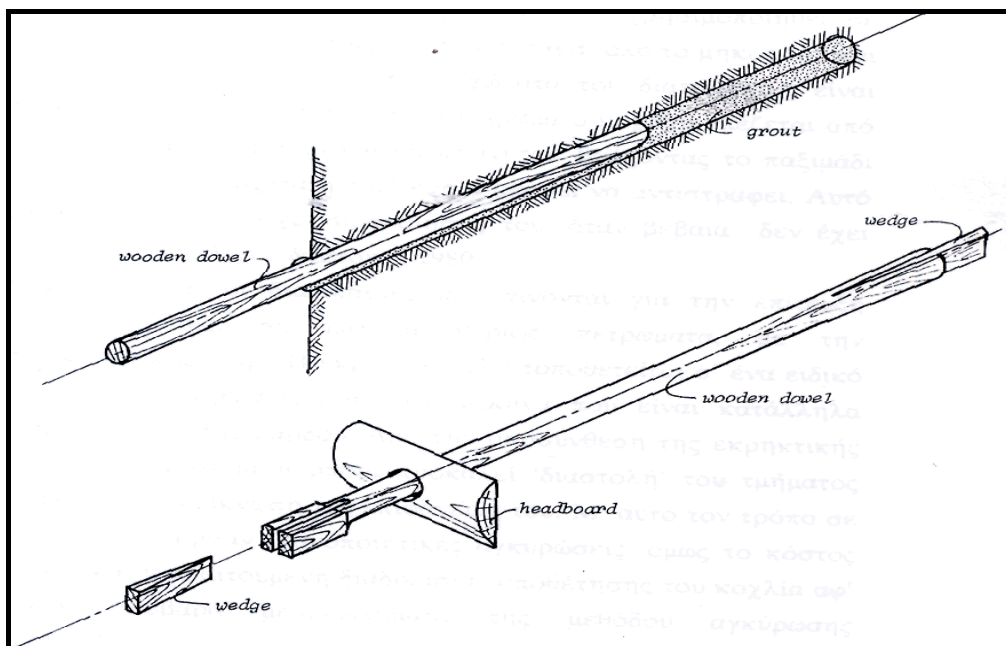
3.3.3 Ξύλινος Κοχλίας

Τοποθετείται στην οροφή σε ορυχεία με άνθρακα, ο οποίος είναι σε φυλλώδη μορφή. Η υγρασία στο πέτρωμα διογκώνει το ξύλο με αποτέλεσμα την καλύτερη επαφή του με το πέτρωμα και την μεταφορά των φορτίων σε αυτό. Η ξύλινη ράβδος μήκους 2 μέτρων και διαμέτρου 40-50 mm τοποθετείται σε διάτρημα διαμέτρου 50-60 mm. Η αγκύρωση επιτυγχάνεται με την βοήθεια δυο σφηνών, και οι εγχοπές χαράζονται με διαφορά 90°, ώστε να αποφεύγεται ενδεχόμενο «σχίσσιμο» της ράβδου (Σχήμα 3.6). Χρησιμοποιήθηκε για να περιορίσει την καταστροφή του μηχανήματος που κόβει τον άνθρακα και τον ιμάντα της ταινίας.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματά τους είναι: α) φτηνοί και απλοί στην κατασκευή τους, β) δεν προκαλεί ζημιά στο μηχανήμα εκσκαφής ζημιά και στον ιμάντα του ταινιόδρομου και γ) δεν μολύνει το μέταλλευμα.

Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι: α) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περιοχές που το φορτίο υποστήριξης είναι μικρό και β) Εξαιτίας της μη προέντασης του θα πρέπει να τοποθετείται κοντά στο μέτωπο (όπου γίνονταν οι μετακινήσεις των πετρωμάτων) (Αντωναρίδου, 1998)

Με την αύξηση του κόστους του ξύλου και εξαιτίας των μειονεκτημάτων του πολύ σπάνια χρησιμοποιείται σήμερα και αναφέρεται μόνο για ιστορικούς λόγους (Hoek and Brown, 1980).



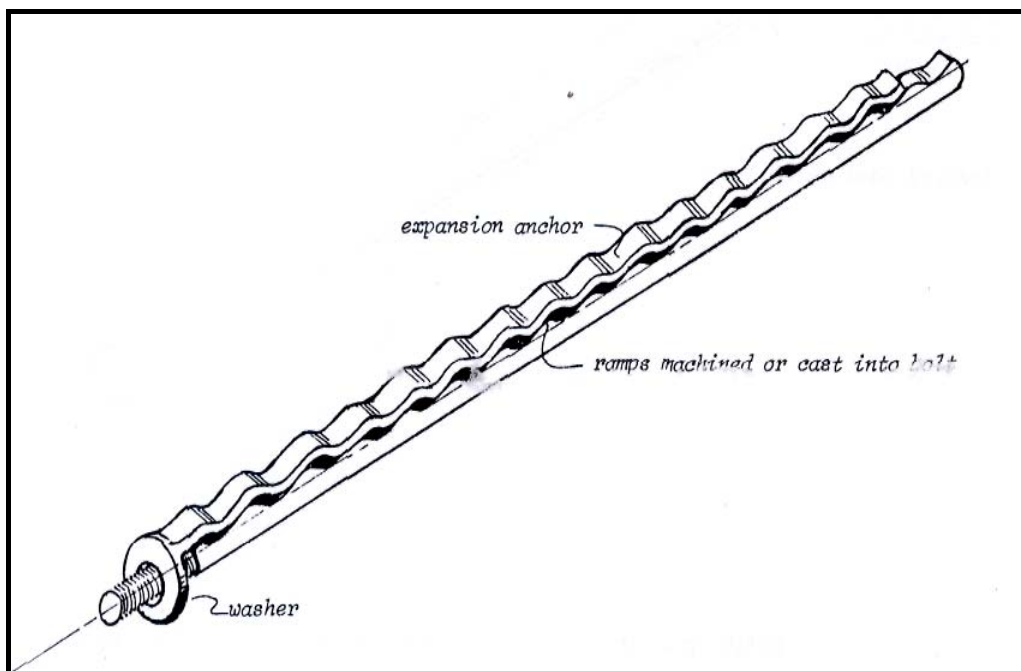
Σχήμα 3.6: Ξύλινος κοχλίας (Hoek and Brown, 1980).

3.3.4 Κοχλίας Τύπου «Worley»

Ο κοχλίας τύπου «Worley» σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί σε ορυχεία άνθρακα (Σχήμα 3.7). Ο κοχλίας αναπτύσσεται σ' όλο το μήκος του και επομένως η επιφάνεια επαφής του με τα τοιχώματα του διατρήματος είναι πολλαπλάσια. Όταν το παξιμάδι δένεται στο σπείρωμα ο κοχλίας πιέζεται από την εξωτερική επιφάνεια του και επεκτείνεται. Βγάζοντας το παξιμάδι και πιέζοντας την άκρη του κοχλία η διαδικασία απορεί να αντιστραφεί. Αυτό δίνει την δυνατότητα της επαναχρησιμοποίησης του, όταν βέβαια δεν έχει καταστραφεί ή σκουριάσει (Hoek and Brown, 1980).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματά τους είναι: α) η αγκύρωση γίνεται σε όλο το μήκος του διατρήματος και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια κατανομή της τάσης όμοια με αυτή των κοχλιών αγκυρωμένων με συγκολλητικές ύλες όμοιας ικανότητας, β) μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί αν δεν απαιτείται η χρήση του στην συγκεκριμένη περιοχή και γ) είναι χρήσιμο σε περιοχές που απαιτείται υποστήριξη για μικρό χρονικό διάστημα κοντά στο μέτωπο προχώρησης.

Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι: α) το κόστος κατασκευής τους, β) χρησιμοποιούνται χωρίς προένταση και γι' αυτό θα πρέπει να τοποθετούνται κοντά στο μέτωπο προχώρησης και γ) είναι χρήσιμοι μόνο για μικρά χρονικά διάστημα επειδή δεν μπορούν να δεχτούν την προσθήκη συγκολλητικού υλικού και να προστατευτούν από την διάβρωση (Αντωναρίδου, 1998)



Σχήμα 3.7: Κοχλίας τύπου «Worley» (Hoek and Brown, 1980)

3.4 Προεντεταμένοι Κοχλίες Κατανεμημένης Αγκύρωσης με Συγκολλητικές Ύλες

Οι κατανεμημένες αγκυρώσεις με συγκολλητικές ύλες έδωσαν νέες διαστάσεις στην τεχνολογία υποστήριξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων στις υπόγειες εκσκαφές. Οι κατανεμημένες αγκυρώσεις με συγκολλητικές ύλες δίνουν μεγάλη αξιοπιστία στην αγκύρωση μαλακών πετρωμάτων, και παρέχουν προστασία στην διάβρωση του μετάλλου. Στους κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με συγκολλητικές ύλες το υλικό συγκόλλησης τοποθετείται είτε σε όλο το μήκος του διατρήματος είτε σε ένα τμήμα του. Η συγκόλληση επιτυγχάνεται είτε με την βοήθεια τσιμέντου είτε με πολυεστερική ρητίνη.

3.4.1 Προεντεταμένος Κοχλίας Κατανεμημένης Αγκύρωσης με Τσιμέντο

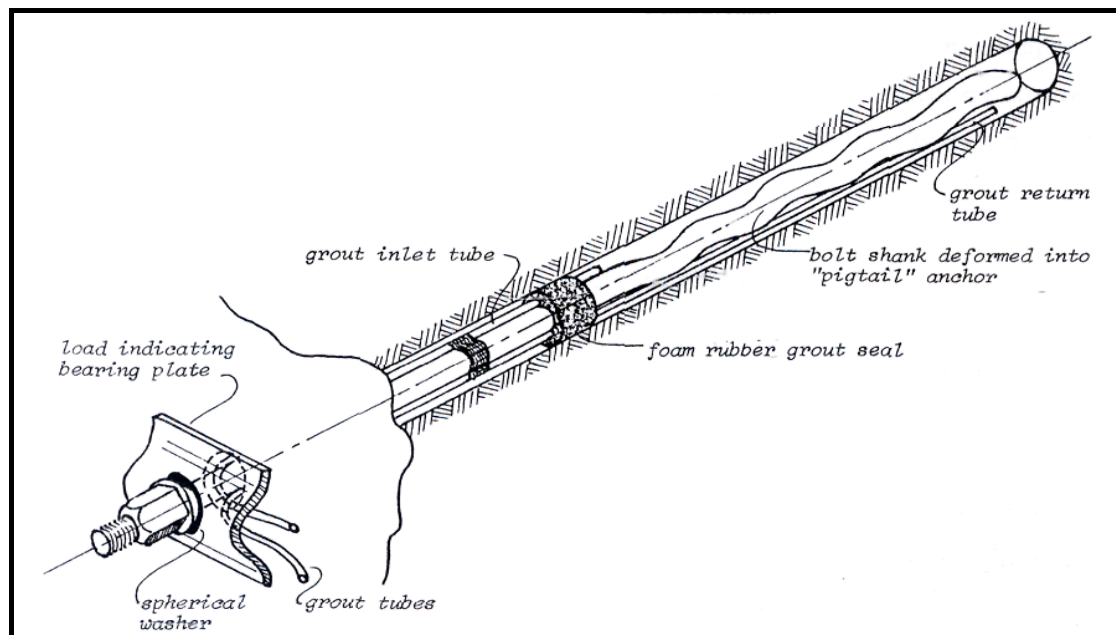
Είναι συνήθως μία χαλύβδινη ράβδος με σπείρωμα και συμπληρώνεται με πλάκα και περικόχλιο (Σχήμα 3.8). Μερικές φορές τοποθετείται εξολοκλήρου μέσα στο διάτρημα. Η προέντασή του σε αυτήν την περίπτωση είναι αδύνατη. Μερικές φορές τοποθετείται βαθύτερα στο διάτρημα και αυτή η διαδικασία γίνεται για αγκυρώσεις στο δάπεδο.

Η υποστήριξη συνδέεται με μία υγρή διαδικασία, καθώς το τσιμέντο πρέπει να αναμιχθεί, να ετοιμαστεί και να χρησιμοποιηθεί μέσα σε μια συγκεκριμένη ώρα, η οποία μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες (Aldorf and Exner, 1986).

Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου:

- Η αγκύρωση επιτυγχάνεται με οργανικό υλικό υποστήριξης
- Το φορτίο του κοχλία δεν απαιτείται να δράσει αμέσως
- Το μήκος του κοχλία φτάνει τα τέσσερα μέτρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τοποθέτηση του κοχλία με τσιμέντο είναι ευκολότερη σε σχέση με τον κοχλία με ρητίνη, στον οποίον απαιτείται περιστροφή για να αναμιχθεί η ρητίνη.

Το μίγμα τσιμέντου νερού εισάγεται εντός του διατρήματος, είτε πριν είτε μετά την τοποθέτηση του κοχλία. Στην δεύτερη περίπτωση, ο σωλήνας τροφοδοσίας του τσιμέντου συγκόλλησης πρέπει να έχει μικρή διάμετρο και συνεπώς το μίγμα θα πρέπει να έχει αυξημένο ποσοστό νερού. Αντίθετα, εάν προηγηθεί η έγχυση της συγκολλητικής ύλης εντός του διατρήματος, ο σωλήνας μπορεί να έχει διάμετρο που να προσεγγίζει τη διάμετρο του διατρήματος, με δυνατότητα χρησιμοποίησης πολύ πιο πυκνού μίγματος. Τέτοιου είδους υλικά συγκόλλησης, αφ' ενός δεν διαφεύγουν με την ίδια ευκολία μέσω ρωγμών και διακένων του πετρώματος, και αφ' ετέρου παρουσιάζουν πολύ λιγότερα προβλήματα ροής εντός του διατρήματος, οδηγώντας σε μειωμένες απώλειες υλικού (Αντωναρίδου, 1998).



Σχήμα 3.8: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με τσιμέντο (Hoek and Brown, 1980)

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της αγκύρωσης με τσιμέντο είναι: α) σχετικά φτηνό σύστημα κοχλίωσης β) δίνει καλά χαρακτηριστικά αγκύρωσης σε ένα ευρύ φάσμα πετρωμάτων και γ) δεν απαιτείται γόμωση του κοχλία για να προστατευτεί από τη διάβρωση.

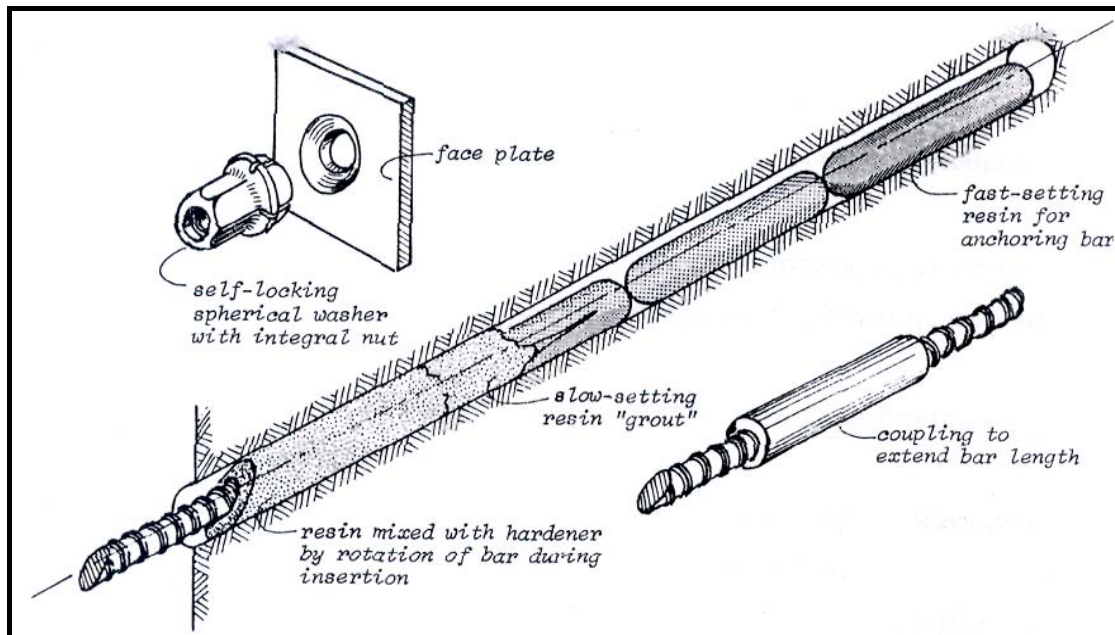
Τα κυριότερα μειονεκτήματά της είναι: α) η απαιτούμενη μεγάλη προσοχή και την διάρκεια της αγκύρωσης και β) ο κοχλίας δεν μπορεί να υποστεί εφελκυσμό μέχρι να γίνει η τοποθέτηση του τσιμέντου και να αναπτυχθούν οι αντοχές του. Οι κοχλίες αυτοί χρησιμοποιούνται για προσωρινή υποστήριξη σε μεταλλεία. Επίσης χρησιμοποιούνται και σε υπόγεια τεχνικά έργα (Hoek and Brown, 1980).

3.4.2 Προεντεταμένος Κοχλίας Κατανεμημένης Αγκύρωσης με Ρητίνη

Ρητίνες είτε διοχετεύονται απ' ευθείας στο πέτρωμα με την μορφή ενέματος, είτε ως συνδετικό υλικό των κοχλίων με τα τοιχώματα του διατρήματος (Οικονομόπουλος, 1985).

Ο κοχλίας με ρητίνη ενεργεί όπως και ο κοχλίας με τσιμέντο. Η διαφορά είναι στο συστατικό που τοποθετείται μέσα στο διάτρημα και στην τεχνολογία της τοποθέτησης τους.

Για να αγκυρωθεί ο κοχλίας σε όλο το μήκος του χρησιμοποιούνται ράβδοι με ραβδώσεις στην επιφάνεια τους. Γίνεται ώθηση και ταυτόχρονη περιστροφή του κοχλία, ώστε να γίνεται ευκολότερα η μίξη της χημικής ουσίας (Σχήμα 3.9), (Aldorf and Exner, 1986).



Σχήμα 3.9: Προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης με ρητίνη (Hoek and Brown, 1980)

Η άκρη του κοχλίας, που, εισέρχεται στο διάτρημα μπορεί να είναι κομμένη είτε κάθετα στο άξονα του είτε πλάγια προς αυτόν.

Η επιλογή του σχήματος προσφέρει την δυνατότητα να δοθούν καλύτερες λύσεις σε μια μεγάλη ποικιλία προβλημάτων όπως:

- Σπάσιμο του περιτυλίγματος που περιεχέει τη ρητίνη
- Περιορισμό της ώθησης, ως αποτέλεσμα της επίδρασης του εμβόλου
- Όταν το άκρο του κοχλίας είναι αμβλύ, γίνεται η πρόσκρουση στο πυθμένα του διατρήματος, και επιτυγχάνεται εγκλωβισμός.

Το σχήμα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε οι κινήσεις περιστροφής οι οποίες είναι αναγκαίες, να εξασφαλίζουν την ορθή μεταβίβαση της δύναμης από το μηχάνημα διάτρησης.

Η φέρουσα ικανότητα των κοχλιών με ρητίνη είναι συνάρτηση της συνοχής του συνδετικού υλικού με το πέτρωμα και τον κοχλία, του μήκους αγκύρωσης και της αντοχής σε εφελκυσμό του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται ο κοχλίας.

Σημειώνεται ότι οι κόκκοι του χαλαζία με τα θραύσματα του γυαλιού και με το περίβλημα του φυσιγγίου εξασφαλίζουν επαρκές ιξώδες, ώστε να εμποδίσουν την ράβδο να ολισθήσει προς τα πίσω πριν την έναρξη πήξης του κονιάματος.

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα η συγκόλληση γίνεται σε ένα τμήμα του διατρήματος συνήθως 30-50 cm. Στην συνέχεια γίνεται συγκόλληση σε όλο το μήκος της

ράβδου με την χρησιμοποίηση περισσότερων φυσισγγίων με μεγαλύτερους χρόνους πήξης και έτσι επιτυγχάνεται πλήρης κατανεμημένη αγκύρωση (Αντωναρίδου, 1998).

Ως συνέπεια της καθολικής πλήρωσης του διατρήματος με τους κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης είναι η αποτελεσματικότερη αντίδραση στις ολισθήσεις των στρωμάτων της οροφής οι οποίες επιτείνονται εξαιτίας των σημειούμενων αποκολλήσεων. Εάν υφίστανται αποκολλήσεις μεταξύ των στρωμάτων θα σημειώνονται και ολισθήσεις, τουλάχιστον στις περιοχές της οροφής που βρίσκονται κοντά στις παρειές της στοάς. Είναι προφανές ότι η αντίδραση στις ολισθήσεις αυξάνει την ακαμψία της οροφής και εμποδίζει τις παραμορφώσεις (Οικονομόπουλος, 1985).

Πρακτικά το μήκος του κοχλία είναι πάνω από 50 cm σε σκληρά πετρώματα, και μπορεί να ξεπεράσει τα 100 cm σε πλαστικά πετρώματα. Η διάμετρός του είναι ίση με αυτήν του διατρήματος, όπου η ελάχιστη είναι 4 με 8 mm.

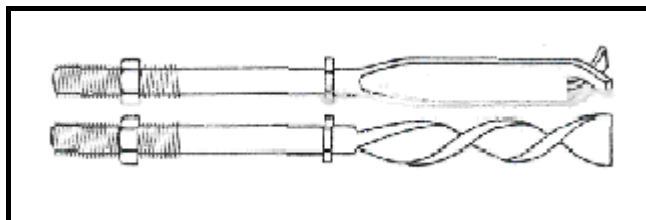
Με την χρήση της ρητίνης επιδιώκεται η επίτευξη μόνιμης αγκύρωσης, ιδιαίτερα σε μαλακά εδάφη, που δεν επηρεάζεται από την ολίσθηση της πλάκας, από την διάβρωση, και από τα αποτελέσματα της αποσάθρωσης του πετρώματος.

Όταν η αγκύρωση με ρητίνη δεν γίνεται σε όλο το μήκος του κοχλία, τότε οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται είναι εφοδιασμένοι με ένα κολάρο, ώστε να μην υπάρξει πιθανότητα διαρροής της ρητίνης (Σχήμα 3.10).

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτού του κοχλία είναι: α) η πολύ υψηλή αντοχή και β) μπορεί να προσαρμόζεται σε μαλακά πετρώματα.

Τα κύρια μειονεκτήματά του είναι: α) η πολύπλοκη διαδικασία της τοποθέτησης τους σε σχέση με τον κοχλία με σφήνα και με διαστολή, β) το μεγάλο κόστος της ρητίνης και γ) υπάρχει πρόβλημα στο χρόνο ζωής του ειδικά σε ζεστά κλίματα.

Χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις που το κόστος είναι λιγότερο σημαντικό σε σχέση με την ταχύτητα και την αξιοπιστία (Hoek and brown, 1980).



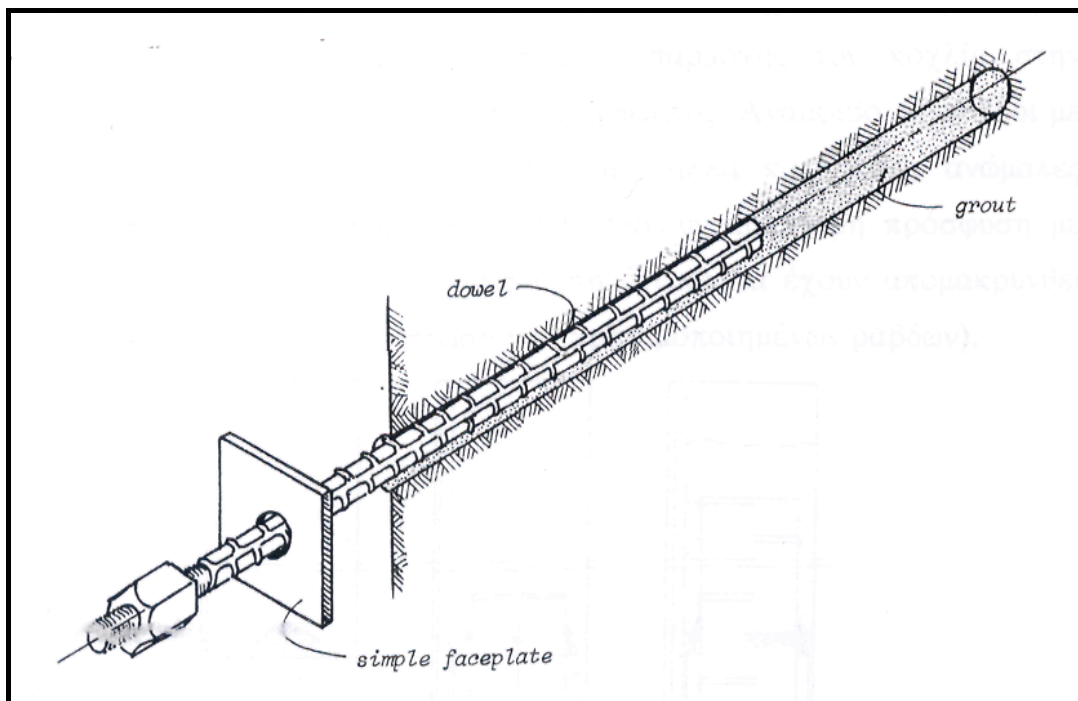
Σχήμα 3.10: Μορφή κοχλίων για σημειακή γόμωση (Aldorf and Exner, 1986)

3.5 Μη Προεντεταμένοι Κοχλίες με Συγκολλητικές Ύλες

3.5.1 Χαλύβδινος Κοχλίας

Το υλικό πλήρωσης εισέρχεται μέσα στο διάτρημα με μια ελαφριά αντλία. Η ράβδος εισέρχεται μέσα στο διάτρημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Για την κοχλίωση οροφής ο κοχλίας διατηρείται στην θέση του με την βοήθεια μιας ξύλινης ή μεταλλικής σφήνας που τοποθετείται στο στόμιο του διατρήματος. Η πλάκα ή το παξιμάδι μπορούν και να μην χρησιμοποιηθούν (Hoek and Brown, 1980).

Κοινό χαρακτηριστικό των τεχνικών κοχλίωσης με ανόργανες συγκολλητικές ύλες που αναφέρθηκαν είναι η μεγάλη ελευθερία επιλογής του τύπου και των μηχανικών ιδιοτήτων της ράβδου που θα χρησιμοποιηθεί, προς την κατεύθυνση της καλύτερης δυνατής προσαρμογής του κοχλία στην αναμενόμενη συμπεριφορά της μάζας του πετρώματος. Αναμφίβολα, ράβδοι με επιφανειακές ανάγλυφες νευρώσεις, σπείρωμα, αλλά και ακόμα ανώμαλες οξειδωμένες παράπλευρες επιφάνειες, επιτυγχάνουν καλύτερη πρόσφυση με την συγκολλητική ύλη, υπό την προϋπόθεση ότι πρώτα έχουν απομακρυνθεί τυχόν λιπαντικές ουσίες (σε περίπτωση ήδη χρησιμοποιημένων ράβδων).



Σχήμα 3.11: Μη προεντεταμένος κοχλίας κατανεμημένης αγκύρωσης (Hoek and Brown, 1980)

3.5.2 Κοχλίας Τύπου «Perfo»

Αποτελείται από ένα διάτρητο, κατά μήκος, μεταλλικό σωλήνα ο οποίος είναι χωρισμένος σε δυο ημικυλινδρικά τμήματα. Η διάμετρος του σωλήνα είναι μικρότερη από αυτή του διατρήματος. Πριν την τοποθέτηση, τα δυο τμήματα πληρώνονται με συγκολλητική ύλη (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12) και κατόπιν ενώνονται μεταξύ τους και προσδένονται με μαλακό σύρμα. Ο πληρωμένος με το συνδετικό υλικό σωλήνας εισάγεται στο διάτρημα και δέχεται ευθύς αμέσως, στο εσωτερικό του, μεταλλική ράβδο η οποία με την κίνηση της αναγκάζει το συγκολλητικό υλικό να διέλθει μέσα από τις οπές και να πληρώσει τα κενά μεταξύ του σωλήνα και των παρειών του διατρήματος.

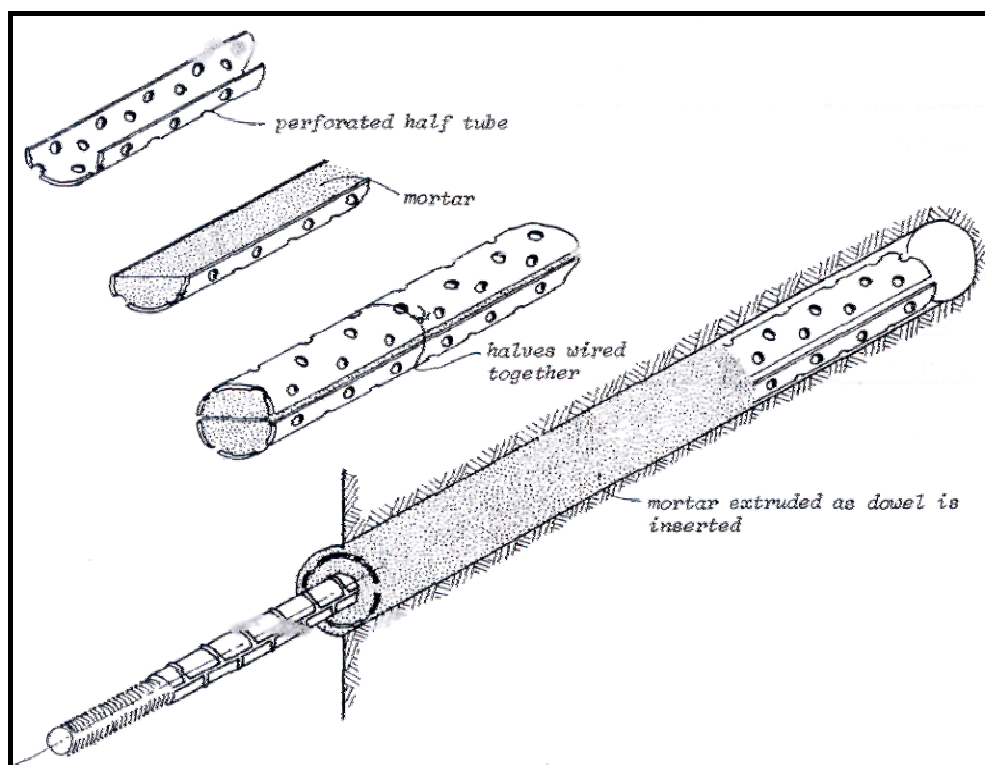
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κοχλιών αυτών είναι: α) η απλότητα και η αποτελεσματικότητα, αν εφαρμόζονται σε μεγέθη που ταιριάζουν αυστηρά, β) προσφέρουν κάποια πλεονεκτήματα τεχνικής φύσης που δεν συναντώνται σε οποιαδήποτε άλλη τεχνική αγκύρωσης, και αφορούν δυο δευτερεύοντες ρόλους που παίζει ο σχετικός διάτρητος σωλήνας. Αφ' ενός, παρεμποδίζει την ροή του υλικού συγκόλλησης εκτός του διατρήματος και την ενδεχόμενη διαρροή του μέσω πάσης φύσεως οδών διαφυγής εντός του πετρώματος και αφ' ετέρου, αυξάνει περαιτέρω την αντοχή του όλου συστήματος σε εφαιπόμενικές εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες μπορούν να θραύσουν το υλικό συγκόλλησης και να οδηγήσουν είτε σε αστοχία είτε σε διάβρωση του κοχλία, γ) δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη αντλίας για την έκχυση του συνδετικού υλικού και δ) κοχλίας μικρού μήκος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φορμάρει τις αγκυρώσεις των Προεντεταμένων κοχλιών (Αντωναρίδου, 1998).

Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι είναι αρκετά ακριβό σύστημα αγκύρωσης συγκριτικά με τους κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης όμοιας ικανότητας.

Το σύστημα αυτό είναι ευρέως διαδεδομένο στην Σκανδιναβία αλλά σε άλλες περιοχές χρησιμοποιείται ελάχιστα (Hoek and Brown, 1980).

Πίνακας 3.2: Οι διαστάσεις και οι ανοχές στις διαμέτρους του σωλήνα, της ράβδου και του διατρήματος (Hoek and Brown, 1980)

Διάμετρος ράβδου		Διάμετρος διατρήματος		Διάμετρος σωλήνα	
$\frac{3}{4}$ in	19 mm	$1\frac{1}{4}$ in	32 mm	$1\frac{1}{16}$ in	27 mm
1 in	25 mm	$1\frac{1}{2}$ in	38 mm	$1\frac{1}{4}$ in	32 mm
$1\frac{1}{8}$ in	29 mm	$1\frac{3}{4}$ in	44 mm	$1\frac{1}{2}$ in	38 mm
$1\frac{1}{4}$ in	32 mm	2 in	51 mm	$1\frac{1}{4}$ in	44 mm
$1\frac{3}{8}$ in	35 mm	$2\frac{1}{4}$ in	57 mm	2 in	51 mm



Σχήμα 3.12: Κοχλίας τύπου «Perfo» (Hoek and Brown, 1980)

3.5.3 Κοχλίας Κατασκευασμένος από Διαφορετικό Υλικό

Εκτός από τον χαλύβδινο κοχλία είναι δυνατόν να κατασκευαστεί και πλαστικός, ξύλινος, γυάλινος κοχλίας ή συνδυασμός αυτών. Αυτός ο κοχλίας χρησιμοποιείται για προσωρινή υποστήριξη του μετώπου ή για την υποστήριξη του δαπέδου του ανοίγματος. Η υποστήριξη αυτού του είδους μπορεί να γίνει σε θέσεις που το τμήμα υποστήριξης του ανοίγματος θα κατεδαφιστεί σε μια μεταγενέστερη φάση. Έτσι η χρήση του κοχλία με μέταλλο μπορεί να προξενήσει ζημιές στο μηχάνημα εκσκαφής. Ο κοχλίας πληρώνεται με το συγκολλητικό υλικό με τον ίδιο τρόπο όπως ο χαλύβδινος κοχλίας. Ομοίως γίνεται και η τοποθέτηση του κοχλία που κατασκευάζεται από γυαλί. Για την δυνατότητα προέντασης του κοχλία, κατασκευάζονται κοχλίες στους οποίους το κομμάτι που έχει το σπείρωμα αποτελείται από μέταλλο. Ο κοχλίας έχει διάμετρο 18mm, μήκος 1.5 έως 6 m και το επιφερόμενο φορτίο είναι μεγαλύτερο από 150 kN (Aldorf and Exner, 1986).

3.6 Αγκύρια με Μορφή Συρματόσκοινων

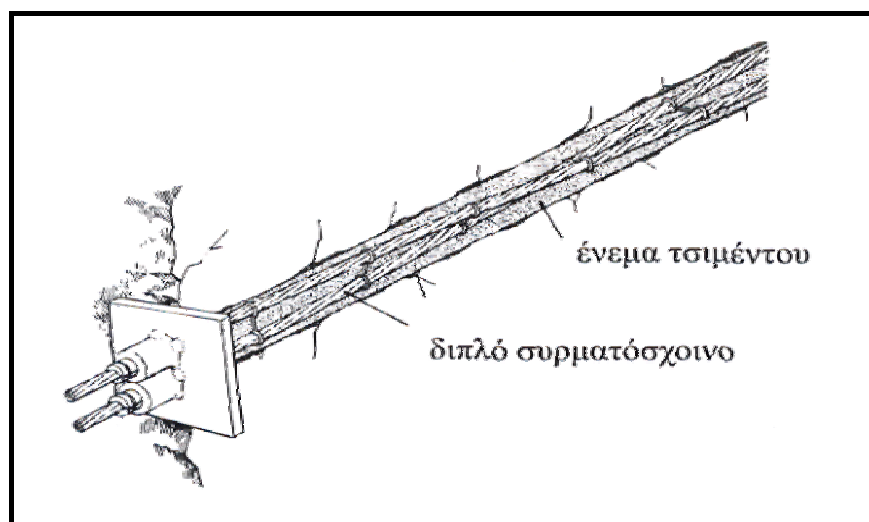
Σε αυτό τον τύπο κοχλία η συμβατική ράβδος έχει αντικατασταθεί από ένα ή δυο τεμάχια χαλύβδινου συρματόσχοινου διαμέτρου 15-30 mm, αντοχής περίπου 1800 Nt/mm² (MPa). Ο κοχλίας με συγκολλητική ύλη τσιμέντο (Σχήμα 3.13), μπορεί να αναλάβει πολύ υψηλά φορτία, για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε διαβρωτικό περιβάλλον υπό μικρό

κόστος, αφού μπορούν να χρησιμοποιούνται και μεταχειρισμένα συρματόσχοινα. Η όλη διαδικασία είναι εκμηχανισμένη και γίνεται αξιοποίηση του ισχυρού πλεονεκτήματος της αυξομείωσης των μηκών των διατρημάτων ανάλογα με τις επί τόπου ανάγκες.

Τα αγκυριζόμενα με συγκολλητικές ύλες συρματόσχοινα, χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση των πάσης φύσεως δομικών έργων πάνω από εκατό χρόνια (προεντεταμένοι τένοντες). Στον μεταλλευτικό χώρο εισήλθαν την τελευταία εικοσαετία με την διαφορά ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν προεντείνονται και δεν συνοδεύονται από επιπρόσθετους μηχανισμούς (π.χ πλάκες, αγκυροκεφαλές, κυλίνδρους, σφήνες κ.α.). Τα πλεονεκτήματα των κατανεμημένων αγκυρώσεων με συρματόσχοινα αξιοποιούνται σε πολλαπλάσιο βαθμό με την χρησιμοποίηση των ειδικών μηχανοκίνητων φορείων κοχλίωσης, τα οποία διενεργούν διάτρηση, τσιμέντωση και τοποθέτηση του χαλύβδινου σχοινιού σε ελάχιστο χρόνο σχεδόν αυτόματα, απαιτώντας μόνο έναν χειριστή.

Η χρήση των κοχλίων με συρματόσχοινο, ιδιαίτερα στα μεταλλεύτηκα έργα έχει αποδώσει σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία πολύ σημαντικά αποτελέσματα προς την κατεύθυνση της αυξημένης σταθερότητας των περιβαλλόντων στις υπόγειες εκσκαφές πετρωμάτων. Έχουν αναφερθεί, πολλές εφαρμογές για την εσωτερική ισχυροποίηση των οροφών και των παρειών των κενών μετώπων σε μεταλλεία με μεθόδους διαδοχικών ορόφων με κενά μέτωπα, κοπών και λιθογομώσεων, θαλάμων και στύλων, ενώ πολύ περισσότερες είναι οι περιπτώσεις εφαρμογών σε μόνιμα έργα εξυπηρέτησης των εκμεταλλεύσεων.

Η ορθά σχεδιασμένη κοστολόγηση και μελετημένη εφαρμογή των αγκυρώσεων με συρματόσχοινα ώθησε την ανάπτυξη μεθόδων εκμεταλλεύσεως μεγάλης κλίμακας, με κενά



Σχήμα 3.13: Μη προεντεταμένος κοχλίας από συρματόσχοινο (Stillborg, 1994)

μέτωπα εντυπωσιακών διαστάσεων, τα περιβάλλοντα πετρώματα των οποίων είναι συνήθως προενισχυμένα και οδήγησε σε ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά απόληψης. Σε μεθόδους εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα, αναφέρονται ορύξεις στοών περί του προς εκμετάλλευση κοιτάσματος με την τοποθέτηση συρματόσχοινων μήκους έως και 40m σε ακτινικές διατάξεις, ενώ σε μεθόδους με ανερχόμενες κοπές και λιθογομώσεις τοποθετούνται συρματόσχοινα μήκους έως και τετραπλάσιου του ύψους της βαθμίδας κοπής, ώστε να χρειάζεται υποστήριξη μετά από 3 ή 4 βήματα εκμετάλλευσης.

Τα συρματόσχοινα χαρακτηρίζονται από αυξημένη ευκαμψία ως προς την ανταπόκριση τους κατά των πάσης φύσεως και διευθύνσεως φορτίσεως και συνεπώς είναι πλέον κατάλληλα σε περιπτώσεις που ο χρόνος αυτοϋποστήριξης του πετρώματος επιτρέπει να συμβεί κάποια παραμόρφωση στη μάζα του πετρώματος.

Σε άλλου τύπου εφαρμογές, κατά τις οποίες διενεργείται και προένταση, η αποτελεσματικότητα των αγκυρώσεων αυτού του τύπου εκτιμάται από τον επιτυγχανόμενο περιορισμό της τάσης του πετρώματος για παραμόρφωση (Αντωναρίδου, 1998).

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων με συρματόσχοινο (Αντωναρίδου, 1998)

Όριο θραύσης	3000 N/mm ² (MPa)
Όριο ελαστικότητας	125N/mm ² (MPa)
% Επιμήκυνση	2.4
Πυκνότητα	1250 kg/m ³
Όριο θλίψης (πλάγιο)	150N/mm ² (MPa)
Διατμητικό φορτίο	45N/mm ² (MPa)
Λόγος Poisson	0.38
Συντελεστή: θερμικής διαστολής	-1.8*10 ⁻⁶ /°K
Ηλεκτρική αντίσταση (στον αέρα)	7*10 ¹⁵ Ohm*cm
Ηλεκτρική αντίσταση (κορεσμένο στο νερό)	7*10 ⁷ Ohm*cm

Πίνακας 3.4: Διαστάσεις αγκυρίων με συρματόσχοινα (Agarree) (Αντωναρίδου, 1998)

Τύπος νημάτων	Σχήμα	Διαστάσεις (mm)	Διατομή (mm ²)
f 100000	Ορθογωνικό	20*1.5	11.1
f 200000	Ορθογωνικό	20*3.0	22.2
f 400000	Ορθογωνικό	20*6.0	44.4
f 100000	Κυκλικό	D. 5.0	11.1
f 200000	Κυκλικό	D. 7.5	22.2

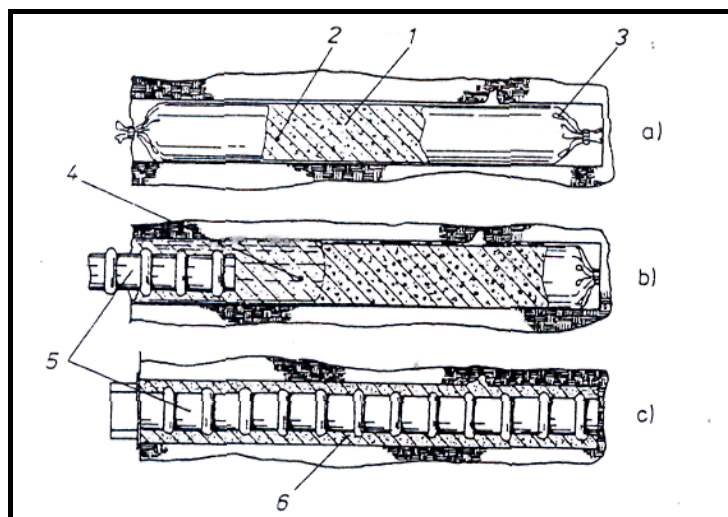
3.7 Υλικά Πλήρωσης

Πλήρωση με τσιμέντο

Η χρήση των μερικώς ή πλήρως συγκολλημένων κοχλιών ήταν και παραμένει μια συνεχής και εξελικτική διαδικασία, η οποία όμως υπέστη ουσιαστική επανάσταση με την αλματώδη ανάπτυξη των πολυεστερικών ρητινών. Παραμένει όμως ουσιώδες το πρόβλημα του κόστους αγοράς τους, το οποίο επιβαρύνει σημαντικά την εντατική και εκτεταμένη χρήση αυτών των τύπων κοχλιών σε υπόγεια έργα όπου απαιτούν αρκετά μεγάλες ποσότητες αυτών.

Μια εναλλακτική λύση παρέχεται από την πλευρά της χρησιμοποίησης ανόργανων συγκολλητικών υλών. Το τσιμέντο κατέχει την κύρια θέση μεταξύ αυτών, αν και η αδυναμία άμεσης ανάληψης φορτίου παραμένει ως ουσιαστικό μειονέκτημα, το οποίο όμως αντιμετωπίζεται με την χρήση τσιμέντου ταχείας πήξης ή πρόσθετων επιταχυντικών ουσιών (Αντωναρίδου, 1998). Επίσης η υποστήριξη των κοχλιών με τσιμέντο έχει συνδεθεί με υγρή διαδικασία, καθώς το τσιμέντο πρέπει να αναμιχθεί, να ετοιμαστεί και να χρησιμοποιηθεί μέσα σε μια συγκεκριμένη ώρα, το οποίο μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες (Aldorf and Exner, 1986). Παρ' όλα αυτά το τσιμέντο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υλικό συγκόλλησης κυρίως για μόνιμες υποστηρίξεις τεχνικών έργων, ενώ παράλληλα η εφαρμογή του συνεχώς διευρύνεται και στα υπόγεια ορυχεία.

Από εκτεταμένες πειραματικές δοκιμές έχει αποδειχθεί ότι βελτιωμένα κι εξελιγμένα μίγματα ανόργανων συγκολλητικών υλικών, προσεγγίζουν τις ικανότητες αγκύρωσης των πολυεστερικών ρητινών. Δεδομένου δε ότι το κόστος τους είναι ελάχιστο, η προσπάθεια τελειοποίησης τους συνεχίζεται κυρίως προς την κατεύθυνση της μείωσης του απαιτούμενου χρόνου ανάληψης πλήρους φορτίου και του πληρέστερου ελέγχου ποιότητας του μίγματος που αποτελούν και τα κυριότερα μειονεκτήματα των ανόργανων συγκολλητικών υλικών. Για παράδειγμα στη συγκολλητική ύλη που αποτελείται από τσιμέντο που έχει ως βάση το γύψο (τσιμέντο Airtrol) και είναι συσκευασμένη σε φυσίγγια όμοια με αυτά των ρητινών το απαιτούμενο νερό εμπεριέχεται σε μικρά κέρινα σφαιρίδια που είναι διασκορπισμένα μέσα στην μάζα του τσιμέντου (Αντωναρίδου, 1998). Η μέθοδος έχει πολύ μικρό κόστος, είναι απλή στην τοποθέτηση με μικρό χρόνο και τέλος αναπτύσσει υψηλή αντοχή. Η απαιτούμενη ποσότητα του νερού για την επίτευξη ικανοποιητικής υγρασίας, για την τοποθέτηση του κοχλία είναι το 33% του βάρους του τσιμέντου. Ο χρόνος πήξης μπορεί να είναι από 2 έως 10 λεπτά. Το περιγραφόμενο σύστημα είναι όμοιο με αυτό των κοχλιών με ρητίνη, όμως το κόστος είναι χαμηλότερο (Σχήμα 3.14) (Aldorf and Exner, 1986).



Σχήμα 3.14: Τοποθέτηση κοχλίας με την χρήση τσιμέντου Airtrol: α), β), γ) Διαδικασία τοποθέτησης, 1=Τσιμέντο, 2=Νερό σε μικροκάψουλες, 3=Συσκευασία, 4=Υγρό μίγμα, 5=Κοχλίας, 6=Στερεοποιημένο μίγμα (Aldorf and Exner, 1986).

Η εταιρία Williams κατασκευάζει το τσιμέντο S5Z Wil-X cement grout, το οποίο παρασκευάζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM 845-76T και χρησιμοποιείται για την πλήρωση των κοχλίων όταν γίνεται η μίξη με άμμο ή με χαλίκι. Έχει μεγάλο χρόνο ζωής όταν διατηρείται ξηρό. Τα χαρακτηριστικά του είναι (Αντωναρίδου, 1998):

- Χρόνος πήξης: Αρχική τοποθέτηση 45 λεπτά, τελική τοποθέτηση 10 ώρες.
- Δοκιμή αντοχής: 3 μέρες σε υγρό περιβάλλον / 4 μέρες στο νερό = 2800psi (19 MPa). Όταν η μίξη γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες η αντοχή κυμαίνεται, από 6000 με 9000psi (41-61 MPa) (εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που περιέχει).

Οι αντοχές του φαίνονται στον πίνακα 3.5.

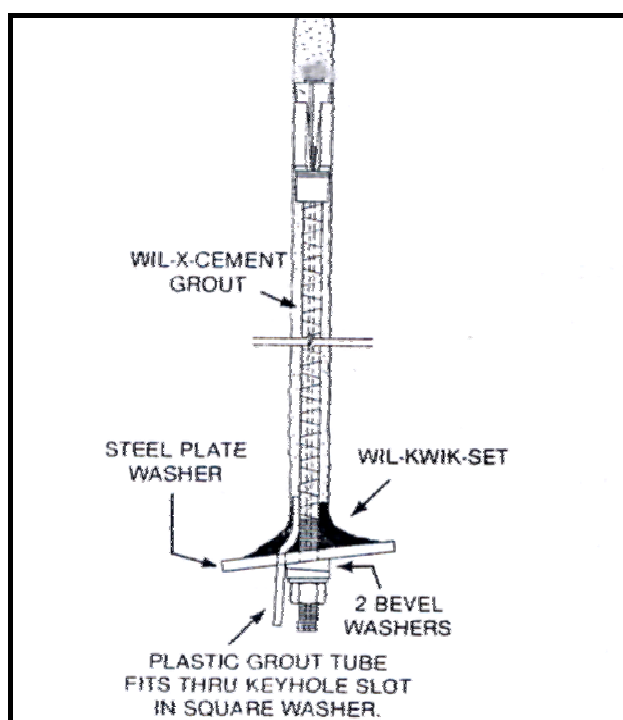
Η ίδια εταιρία επίσης κατασκευάζει και το τσιμέντο S4Z kwik-set, το οποίο πήζει πολύ γρήγορα με αρχικό χρόνο 3 έως 5 λεπτά. Η βασική του χρησιμότητα είναι να διατηρεί τον πλαστικό σωλήνα αναρρόφησης στην θέση του και να σφραγίσει την είσοδο του διατρήματος γύρω από τον κοχλία με κενό πυρήνα. Η μίξη του τσιμέντου με το νερό γίνεται μέχρι να γίνει μια πλαστική μαζα και να μπορεί να αποκτήσει μορφή σφαιριδίων πάχους 4 έως 6" in. Γίνεται τοποθέτηση του σωλήνα γόμωσης στα τοιχώματα του διατρήματος, έπειτα τοποθετείται το τσιμέντο S4Z kwik-set γύρω από το κοχλία και τον σωλήνα. Τοποθετείται η πλάκα και γίνεται σύσφιξη αυτής. Ο κοχλίας μπορεί αμέσως να υποστεί εφελκυσμό και να προστεθεί το τσιμέντο Wil-X cement grout. Οι αντοχές του τσιμέντου S4Z -kwil-set φαίνονται στον πίνακα 3.6 (Αντωναρίδου, 1998).

Πίνακας 3.5: Αντοχές τσιμέντου S5Z Wil-X cement grout (Αντωναρίδου, 1998)

Θλιπτική αντοχή (70 °F, ξηρό περιβάλλον) 0,4 αναλογία νερού / τσιμέντου		
Χρόνος	psi	MPa
1 μέρα	1.800	12,4
3 μέρες	4.000	27,5
7 μέρες	6.000	41,4

Πίνακας 3.6: Αντοχές τσιμέντου S4Z kwil-set (Αντωναρίδου, 1998)

Θλιπτική αντοχή (70 °F, ξηρό περιβάλλον)		
Χρόνος	psi	MPa
1 ώρα	600	4,1
1 μέρα	3.000	20,7
7 μέρες	5.000	34,5



Σχήμα 3.15: Απεικόνιση κοχλία με την χρησιμοποίηση του τσιμέντου S4Z kwil-set (Αντωναρίδου, 1998)

Πλήρωση με ρητίνη

Η χρήση των πολυεστερικών ρητινών για την επίτευξη καλής αγκύρωσης, αντιδιαβρωτικής προστασίας και σχεδόν άμεσης ανάληψης φορτίων, αποτελεί μία από τις καλύτερες τεχνικές λύσεις σε περιπτώσεις που εναλλακτικά συστήματα κοχλίωσης δεν

παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, παρά το μεγαλύτερο κόστος των υλικών αυτών. Με τις συνεχείς εξελίξεις από τις κατασκευάστριες εταιρίες, υπάρχουν στο εμπόριο οι συνήθεις ρητίνες που επιτυγχάνουν ικανότητα αγκύρωσης ίση με 300 kp/cm μήκους συγκόλλησης σε λιγότερο από 30 δευτερόλεπτα καθώς και ρητίνες υπερταχείας πήξεως οι οποίες φτάνουν τα 225 kp/cm σε λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα.

Μια από τις τελευταίες εξελίξεις σε αυτήν την κατηγορία κοχλιώσεων αποτελεί ο κοχλίας με εποξειδική ρητίνη αντί της πολυεστερικής. Το κύριο πλεονέκτημα έγκειται στην βελτιωμένη προσκόλληση της ρητίνης και την καλύτερη προσαρμογή της με τις παρειές του διατρήματος. Σημαντικής έκτασης έρευνα διεξάγεται, προκειμένου να διαπιστωθεί η δυνατότητα αποτελεσματικής χρήσης εποξειδικών ρητινών στις κοχλιώσεις, (Αντωναρίδου, 1998). Η ρητίνη που τοποθετείται στο διάτρημα διατίθεται σε αμπούλες με περιτύλιγμα πλαστικού.

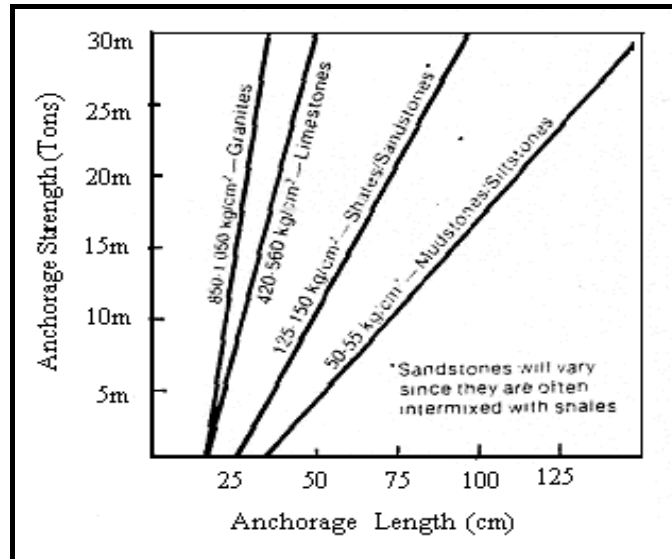
Η ρητίνη αποτελείται από το βασικό συστατικό πολυεστερική ρητίνη και έναν καταλύτη. Το κάθε υλικό είναι τυλιγμένο με λεπτό πλαστικό φιλμ και εσωκλείονται στο ίδιο φιλμ. Μερικές φορές για την πλήρωση χρησιμοποιείται και χαλαζίας. Η τυπική σύνθεση της ρητίνης είναι η παρακάτω (Biron and Arioglu, 1982):

1. α) Πολυεστέρας ρητίνης, 28,5 %, β) συμπλήρωμα 66 % και γ) επιταχυντής 0,5%
2. Καταλύτης

Το συμπλήρωμα μπορεί να είναι οποιοδήποτε θρυμματισμένο πέτρωμα και χρησιμοποιείται για να μειώσει την συρρίκνωση, καθώς και το ποσοστό της ρητίνης για λόγους οικονομίας. Ο επιταχυντής χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την μίξη της ρητίνης με τον καταλύτη.

Όταν γίνεται η μελέτη της αντοχής της ρητίνης δυο σημαντικά στοιχεία θα πρέπει να μελετηθούν. Το πρώτο είναι η αντοχή του πετρώματος, καθώς τα πιο ασθενή πετρώματα απαιτούν περισσότερη ρητίνη. Το άλλο στοιχείο είναι το μήκος του κοχλία που θα γομώσει η ρητίνη. Η σχέση αυτών των παραμέτρων φαίνεται στο Σήμα 3.16. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι το φορτίο είναι γραμμική συνάρτηση του μήκους γόμωσης του κοχλία. Αποδεικνύεται ότι το φορτίο αγκύρωσης είναι 1.7 έως 3 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με το φορτίο αγκύρωσης με μηχανικό τρόπο.

Το φορτίο εξαρτάται από την θλιπτική αντοχή του πετρώματος. Η διάμετρος του διατρήματος επηρεάζει το φορτίο αγκύρωσης, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος τόσο μεγαλύτερη η περιοχή επαφής. Θα πρέπει να γίνουν in situ δοκιμές ώστε να υπολογιστούν οι πραγματικές απαιτήσεις (Biron & Arioglu, 1982).



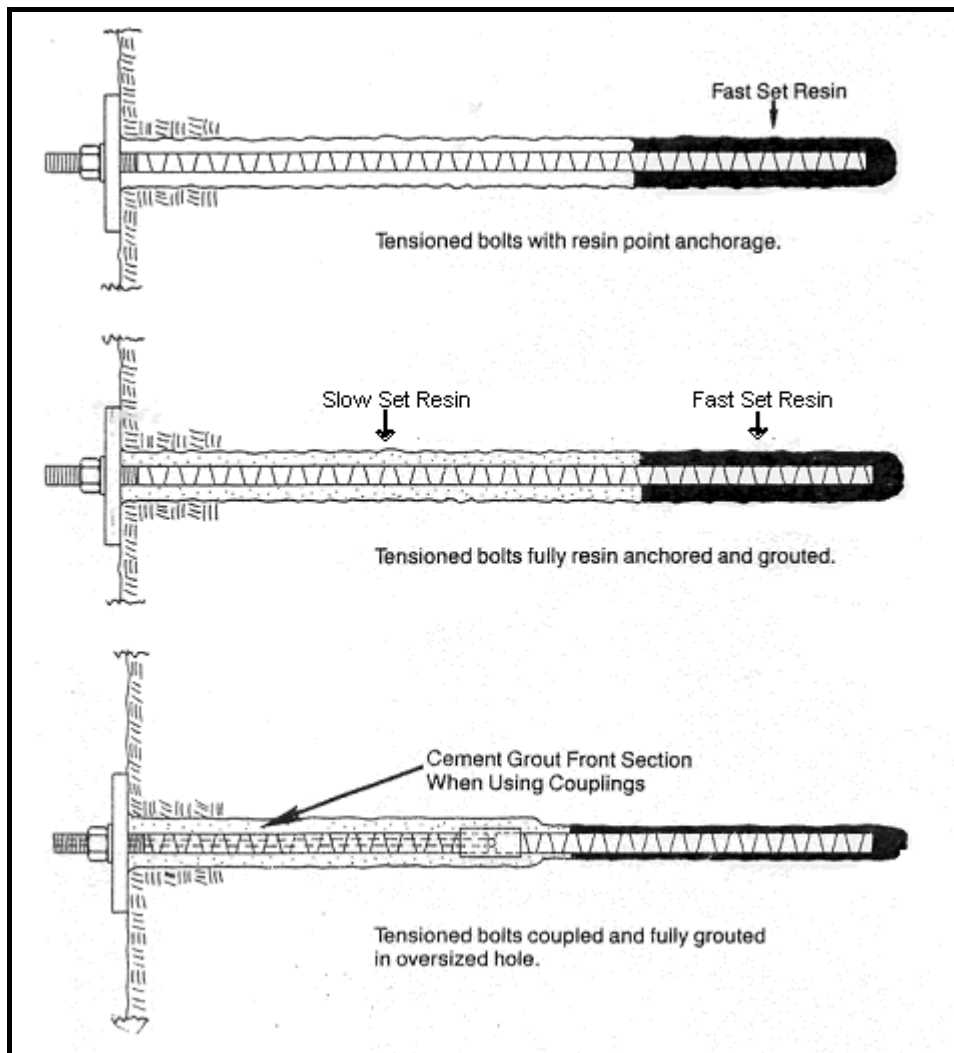
Σχήμα 3.16: Σχέση του μήκους της αγκύρωσης με την αντοχή του κοχλίου ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος που τοποθετείται ο κοχλίας (Αντωναρίδου, 1998)

Όταν η αγκύρωση ολοκληρώνεται με προένταση του κοχλίου (Σχήμα 3.17), τότε θα πρέπει να χρησιμοποιείται η ρητίνη που στερεοποιείται γρήγορα στο πίσω μέρος του διατρήματος. Το μπροστινό μέρος του διατρήματος μπορεί να μείνει ανοιχτό όταν πρόκειται για προσωρινή υποστήριξη, ή να τοποθετηθεί ρητίνη που έχει μεγάλο χρόνο στερεοποίησης ή ακόμα και να τοποθετηθεί τσιμέντο, ανάλογα με την περίπτωση. Όταν η αγκύρωση γίνεται χωρίς προένταση του κοχλίου (Σχήμα 3.18) θα πρέπει να χρησιμοποιείται ρητίνη με τον ίδιο χρόνο στερεοποίησης σε όλο το μήκος του διατρήματος.

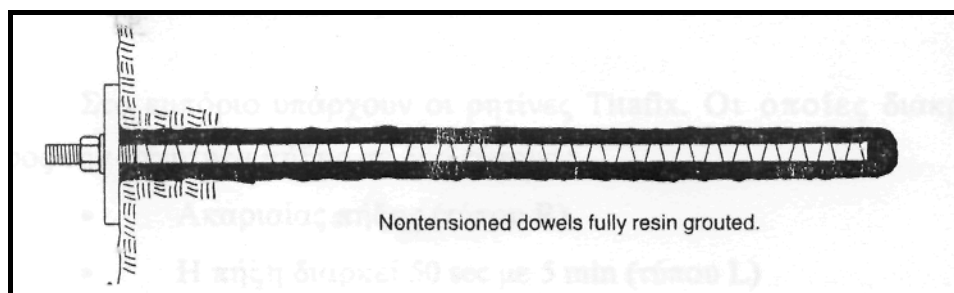
Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των ρητινών είναι (Αντωναρίδου, 1998):

- Χρόνος εργασιμότητας (gel time) είναι το χρονικό διάστημα μετά την μίξη των συστατικών της ρητίνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (εισπιαστεί). Μπορούν να γίνουν μικρές ρυθμίσεις στον κοχλίο κατά την διάρκεια αυτού του διαστήματος.
- Χρόνος στερεοποίησης (cure time) είναι το χρονικό διάστημα από την στιγμή που η ρητίνη έχει αποκτήσει την μορφή τζελ και έχει αρχίσει να στερεοποιείται μέχρι να αποκτήσει το 90% της τελικής της αντοχής.
- Χρόνος προέντασης ή ολοκλήρωσης αγκύρωσης είναι ο υπόλοιπος χρόνος που απαιτείται αφότου η ρητίνη έχει αρχίσει να στερεοποιείται μέχρι την ολοκλήρωση της προέντασης

Το υλικό πλήρωσης είναι έτοιμο μετά την ανάμιξη. Ο χρόνος πήξης είναι συνήθως 20 έως 30 sec. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την σύσταση του κολλοειδούς, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τις προδιαγραφές του κατασκευαστή (Αντωναρίδου, 1998).



Σχήμα 3.17: Τοποθέτηση κοχλία με ρητίνη όταν γίνεται προένταση του κοχλία
(Αντωναρίδου, 1998)



Σχήμα 3.18: Τοποθέτηση κοχλία με ρητίνη όταν δεν γίνεται προένταση του κοχλία
(Αντωναρίδου, 1998)

Οι ρητίνες Titafix διακρίνονται ως προς την ταχύτητα πήξης σε δυο τύπους:

- Ακαριαίας πήξης (τύπου R)
- Η πήξη διαρκεί 50 sec με 5 min (τύπου L)

Ο κοχλίας πρέπει να φτάσει μέχρι τον πυθμένα του διατρήματος, διαφορετικά η μίξη της ρητίνης δεν θα γίνει.

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαμέτρων διατρήματος και κοχλία θα πρέπει να είναι 6 έως 9 mm, και μεταξύ διατρήματος και ρητίνης 3 έως 6 mm.

Για τον υπολογισμό της ποσότητας της ρητίνης, της διατομής της, και το συνολικό μήκος της, που απαιτείται χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις (Αντωναρίδου, 1998):

$$V=L*(D-d)*(D+d)*0.9 \quad (3.2)$$

$$C=T^2*\pi/400 \quad (3.3)$$

$$I_t=V/C \quad (3.4)$$

Όπου:

- D η διάμετρος του διατρήματος (mm)
- d η διάμετρος του κοχλία (mm)
- L το μήκος του διατρήματος (m)
- I_t το συνολικό μήκος της ρητίνης στο διάτρημα (cm)
- V ο όγκος της ρητίνης (cc)
- T η διάμετρος της ρητίνης (mm)
- C η διατομή της ρητίνης (cm²)

Για τον υπολογισμό του μήκους του κάθε τεμαχίου ρητίνης διαιρείται το συνολικό μήκος με τον αριθμό των τεμαχίων που πρόκειται να τοποθετηθούν.

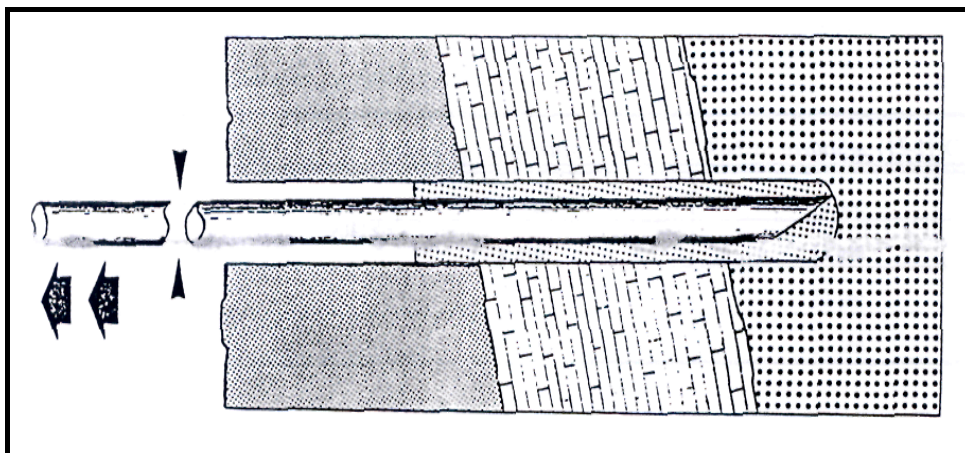
Η διάρκεια ζωής της ρητίνης εξαρτάται από την έλλειψη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστατικών. Η εγγύηση ποιότητας της ρητίνης είναι ένας χρόνος, αν αποθηκευτεί σε περιβάλλον με θερμοκρασία 20°C (66°F), ενώ αν η θερμοκρασία είναι 40°C (104°F) τότε η διάρκεια ζωής της ρητίνης είναι 6 μήνες.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ρητίνης είναι τα εξής (μπορούν να διατεθούν και ρητίνες με μεγαλύτερες ή και με μικρότερες αντοχές) (Αντωναρίδου, 1998):

Κατά τις δοκιμές ο ρυθμός φόρτισης ήταν 4 MPa/sec.

- Όριο εφελκυσμού 25 MPa
- Όριο θλίψης 130 MPa
- Διατμητική αντοχή 65 MPa,
- % Επιμήκυνση 2.5

Δοκιμές που έγιναν επί τόπου, σε γρανίτες με διάμετρο διατρήματος 32 mm, και διάμετρο κοχλία 25mm (αντοχής 25 τόνους), στο 96 % των περιπτώσεων ο κοχλίας έσπασε σε μήκος 200mm αγκύρωσης (Σχήμα 3.19). Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η ρητίνη αντέχει 100 τόνους ανά μέτρο (Αντωναρίδου, 1998).



Σχήμα 3.19: Απεικόνιση αστοχίας κοχλία με διάμετρο διατρήματος 32 mm, και διάμετρο κοχλία 25mm (αντοχής 25 τόνους), σε γρανιτικά πετρώματα, όταν το μήκος αγκύρωσης είναι 200 mm (Αντωναρίδου, 1998)

Οι ρητίνες Fasloc οι οποίες διατίθενται από την εταιρία ELEBOR διακρίνονται ως προς την ταχύτητα πήξης στους τύπους που φαίνονται στον πίνακα 3.7 (Αντωναρίδου, 1998).

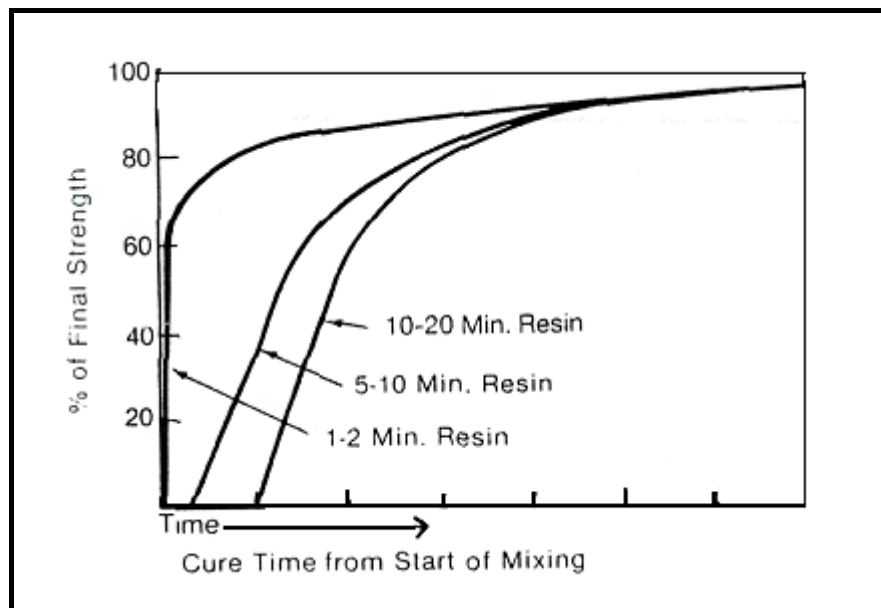
Οι ρητίνες Fasloc είναι διαθέσιμες στις ακόλουθες διαμέτρους: 19mm, 23mm, 25mm, 29mm, 32mm, 35mm, και στα ακόλουθα μήκη : 380mm, 400mm, 450mm, 500mm, και άλλα μήκη τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Στο Σχήμα 3.20 φαίνεται το χρονοδιάγραμμα της αντοχής των ρητινών Fasloc.

Για μεγαλύτερο χρόνο ζωής οι ρητίνες θα πρέπει να αποθηκεύονται μακριά από τον ήλιο σε κανονική θερμοκρασία και σε χώρο ο οποίος αερίζεται. Ο χρόνος ζωής αυξάνεται όταν η θερμοκρασία αποθήκευσης είναι μεταξύ 78 έως 80 °F. Πρέπει να μην αποθηκεύεται για μεγάλο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία πάνω από 85°F (Αντωναρίδου, 1998).

Πίνακας 3.7: Τύποι ρητινών Fasloc ως προς την ταχύτητα πήξης και ο κωδικός χρώματός τους (Αντωναρίδου, 1998)

Κωδικός χρώματος	Χρόνος εργασιμότητας (20°C)	Χρόνος ανάμιξης (15-21°C)
Κόκκινο	30 sec	10 sec
Πράσινο	1 min	15 sec
Μπλε	2 min	20 sec
Κίτρινο	5-10min	20 sec



Σχήμα 3.20: Χρονοδιάγραμμα της αντοχής των ρητινών Fasloc (Αντωναρίδου, 1998)

Κεφάλαιο 4^ο

Εφαρμογή των Αριθμητικών Μεθόδων στην Γεωμηχανική

4.1 Εισαγωγή

Γεωμηχανικά προβλήματα νοούνται τα προβλήματα που εξετάζουν τη συμπεριφορά των γεωυλικών κάτω από διάφορες επιδράσεις, όπως παραδείγματος χάριν μεταβολές του εντατικού ή και του παραμορφωσιακού πεδίου, ροή υγρών, θραύση, κλπ. Η μελέτη της συμπεριφοράς των διαφόρων γεωυλικών ανάγεται αφενός μεν στην εύρεση της κατάλληλης διαδικασίας επίλυσης των αντίστοιχων προβλημάτων, αφετέρου δε στην αξιολόγηση των επιτυγχανόμενων λύσεων.

Η όρυξη υπόγειων ανοιγμάτων, η εκσκαφή πρανών καθώς και μια σειρά τεχνικών έργων προκαλεί σημαντικές αλλαγές στο εντατικό πεδίο των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Για την κατανόηση και την αντιμετώπιση των φαινομένων που προκαλούνται από την δημιουργία τέτοιων έργων είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, τάσεων, μετατοπίσεων και ανοιγμένων παραμορφώσεων στα γεωυλικά κάτω από δεδομένες συνθήκες.

Τα τελευταία χρόνια μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης. Σήμερα υπάρχει πληθώρα μεθόδων για την αριθμητική επίλυση των προβλημάτων ελαστικότητας - πλαστικότητας σε ομογενή, ανοιομογενή, ισότροπα, ανισότροπα, συνεχή και ασυνεχή υλικά (Αγιουτάντης, 2002).

4.2 Μέθοδοι για την Επίλυση των Γεωμηχανικών Προβλημάτων

Το βασικό αντικείμενο της Γεωμηχανικής είναι η μελέτη της αντοχής και των παραμορφώσεων ενός ιδεατού απλοποιημένου υλικού πού παριστάνει το πραγματικό πέτρωμα με την πιστότερη δυνατή ακρίβεια, κάτω από συνθήκες φόρτισης και συνθήκες στα όρια πού ορίζονται από το είδος και τα δεδομένα κάθε προβλήματος.

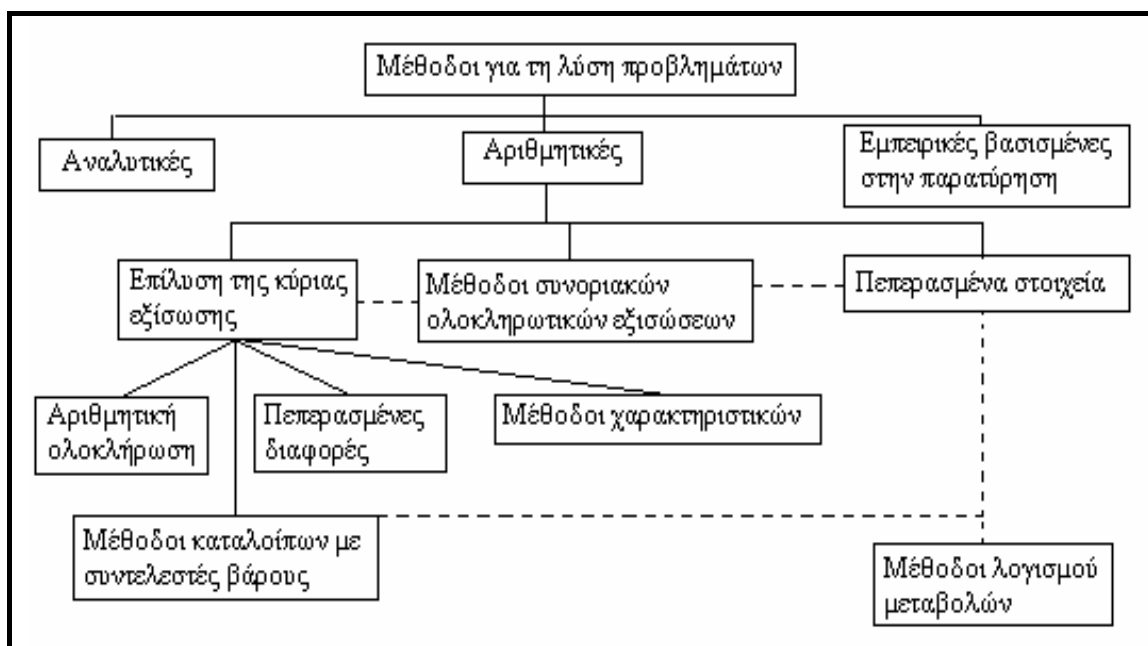
Οι μέθοδοι για την επίλυση των προβλημάτων χωρίζονται στις εξής τρεις ομάδες:

1. Τις αναλυτικές μεθόδους
2. Τις αριθμητικές μεθόδους
3. Τις εμπειρικές μεθόδους

Οι αναλυτικές και οι αριθμητικές ακολουθούν παρόμοια υπολογιστική πορεία που διαιρείται σε δύο κύρια τμήματα. Στο πρώτο τμήμα γίνεται η κατανόηση και η ανάλυση του φυσικού προβλήματος και στη συνέχεια η μόρφωση του μαθηματικού μοντέλου που παριστάνει κατά το δυνατό καλύτερα το φυσικό πρόβλημα. Στο δεύτερο επιλύεται το μαθηματικό πρόβλημα που έχει συνήθως τη μορφή μιας ή περισσότερων διαφορικών εξισώσεων ως προς ορισμένες ανεξάρτητες μεταβλητές που συνήθως είναι μία ή περισσότερες διαστάσεις x, y, z ή ο χρόνος t . Η διαφορά των δύο μεθόδων βρίσκεται στη λύση του μαθηματικού μέρους, στο οποίο χρησιμοποιείται αναλυτική μεθοδολογία ή εφαρμόζεται κάποια αριθμητική τεχνική. Μέχρι σήμερα έχουν βρεθεί αναλυτικές λύσεις μόνο για περιορισμένο αριθμό διαφορικών εξισώσεων στις οποίες πρέπει απαραίτητα να καταλήγει το φυσικό πρόβλημα για να υπάρχει αναλυτική λύση.

Οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται στην παρατήρηση και στη συστηματική μελέτη μεγάλου αριθμού περιπτώσεων οι οποίες συχνά οδηγούν, με τη βοήθεια της στατιστικής, στην εκτίμηση κάποιας εμπειρικής σχέσης. Υπάρχουν όμως ακόμη πολλές ολοκληρωμένες εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού, όπως π.χ. υπολογισμού θεμελιώσεων ή υπολογισμού ωθήσεων. Πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι οι εμπειρικές μέθοδοι δίνουν ικανοποιητικές απαντήσεις σε πολλά προβλήματα παρ' όλη την απλότητα και την ευκολία εφαρμογής τους.

Σε αυτή την άποψη θα πρέπει να προστεθεί ότι η εφαρμογή τέτοιων σχέσεων και μεθόδων πρέπει να γίνεται με προσοχή αφού αποδειχθεί ότι η περίπτωση που μελετάται είναι αντίστοιχη με εκείνες στις οποίες βασίσθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις.



Σχήμα 4.1: Παρουσίαση του συνόλου των αριθμητικών μεθόδων (Βαλαλάς, 1985)

Στο Σχήμα 4.1 δίνεται εκτός από τις τρεις ομάδες μεθόδων που αναφέρθηκαν μια περισσότερο συστηματική και λεπτομερή ανάλυση των διαφόρων αριθμητικών μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία.

Από όλες αυτές, η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων και η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών είναι οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες. Η βασική αρχή των περισσότερων αριθμητικών μεθόδων είναι η αρχή της διακεκριμμενοποίησης. Πιο απλά διακεκριμμενοποίηση είναι η διαδικασία με την οποία το πρόβλημα, το οποίο μελετάται σε μια σημαντική περιοχή, διαιρείται κατάλληλα σε μικρά στοιχεία. Κατά περίπτωση η διακεκριμμενοποίηση είναι δυνατό να έχει διαφορετικές μορφές. Για παράδειγμα στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων η περιοχή που μελετάται διασπάται σε γεωμετρικά στοιχεία μικρών διαστάσεων σε αντίθεση με την πραγματικότητα όπου είναι συνεχής (Βαλαλάς, 1985).

4.3 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

4.3.1 Γενικά

Ένας μηχανικός στην προσπάθειά του να κατανοήσει τα προβλήματα αναλύει το σύστημα στα στοιχεία του και έτσι η συμπεριφορά του καθενός ξεχωριστά είναι πιο εύκολα κατανοητή και στη συνέχεια συνθέτοντας και θεωρώντας ολόκληρο το σύστημα μελετά την γενική συμπεριφορά.

Στις Μεθόδους των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.), ο υπό μελέτη χώρος διαιρείται σε επιμέρους τμήματα (πεπερασμένα στοιχεία). Ο αριθμός των διαστάσεων των στοιχείων αυτών (π.χ. μονοδιάστατα, δισδιάστατα, κλπ) είναι συνήθως αντίστοιχος με τον αριθμό των διαστάσεων του υπό μελέτη χώρου. Για παράδειγμα, η συμπεριφορά μίας επιφάνειας μελετάται με τη χρήση δισδιάστατων στοιχείων. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η διάσταση του στοιχείου διαφέρει από τη διάσταση του χώρου όπως για παράδειγμα η μελέτη ενός τρισδιάστατου δικτυώματος με μονοδιάστατα στοιχεία, ή η χρήση μονοδιάστατων στοιχείων σε ένα δισδιάστατο πρόβλημα.

Το κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους και το κάθε ένα μπορεί να έχει περισσότερους από τους ελάχιστους κόμβους (Πίνακας 4.1). Η συμπεριφορά του κάθε στοιχείου περιγράφεται μέσα από διαφορικές εξισώσεις. Εξασφαλίζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας και ισορροπίας μεταξύ των στοιχείων αυτών, μπορεί να ληφθεί μία μοναδική λύση από το γραμμικό σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (Becker, 1992, Hoek et al., 1991).

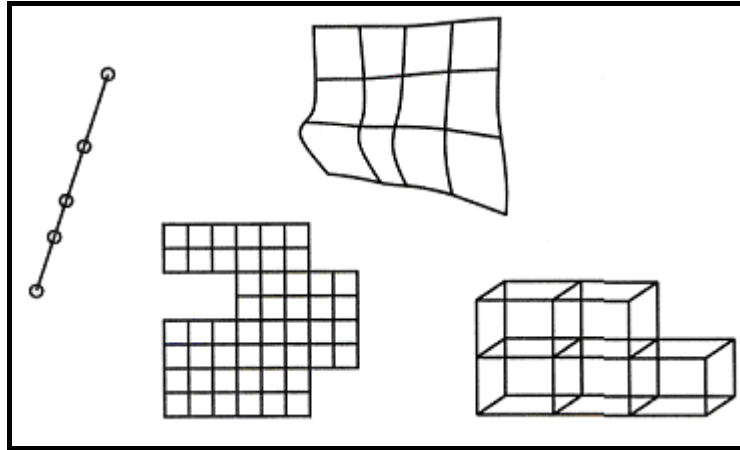
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικοί τύποι στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

Διάσταση στοιχείου	Τύπος στοιχείου	Ελάχιστος αριθμός κόμβων	Εναλλακτικοί αριθμοί κόμβων
1	ράβδος	2	3,4, ...
2	τρίγωνο	3	6, ...
2	τετράπλευρο	4	5,6,8,9,...
3	πυραμίδα	4	10, ...
3	τριγωνικό πρίσμα	6	13,15, ...
3	παραλληλεπίπεδο	8	20, ...

Η εφαρμογή της Μ.Π.Σ. σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης των υλικών) σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Desai, 1979):

- διαίρεση του πεδίου που εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα ή καμπύλα τμήματα (Σχήμα 4.2)
- επιλογή των καταλλήλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο
- προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανοιγμένη παραμόρφωση με τη μετατόπιση (strain - displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανοιγμένη παραμόρφωση (stress - strain), ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και άγνωστο μέγεθος
- κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equations)
- υπέρθεση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών
- υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου
- υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανοιγμένες παραμορφώσεις, τάσεις, κλπ)
- αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Σημειώνεται ότι τα στάδια αυτά είναι γενικά και αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τη Μ.Π.Σ (Αγιουτάντης 2002).



Σχήμα 4.2: Διαίρεση πεδίου (Αγιουτάντης, 2002)

Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των στοιχείων που επιλέγονται για την περιγραφή του ενιαίου σώματος, η ζητούμενη άγνωστη μεταβλητή θεωρείται ότι επιδρά σε κάθε στοιχείο με κάποιο προκαθορισμένο τρόπο. Η κατανομή της άγνωστης μεταβλητής δια μέσου του σώματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά εάν το σώμα έχει διακριτοποιηθεί με τον κατάλληλο τρόπο. Η κατανομή των μεταβλητών σε κάθε στοιχείο ορίζεται από μαθηματικές σχέσεις όπως είναι οι τριγωνομετρικές και οι πολωνυμικές συναρτήσεις. Οι πολωνυμικές χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερη κλίμακα γιατί ο μαθηματικός τους χειρισμός είναι απλός και εύχρηστος και μπορούν να αποδώσουν με αρκετή ακρίβεια τις μετατοπίσεις των κόμβων (Fagan, 1992).

Την διαδικασία της διακριτοποίησης ακολουθεί ο υπολογισμός των εξισώσεων ισορροπίας που διέπουν το κάθε στοιχείο με βάση τη μέθοδο των μετατοπίσεων και έτσι σχηματίζεται ένα σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό περιγράφει τη συμπεριφορά όλων των στοιχείων του σώματος και κατά συνέπεια τη συμπεριφορά όλου του σώματος. Το σύστημα αυτών των εξισώσεων έχει την γενική μορφή:

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\} \quad (4.1)$$

όπου:

$[K]$ = ένας τετραγωνικός πίνακας, (μητρώο ακαμψίας) του σώματος,

$\{U\}$ = το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων στους κόμβους και

$\{F\}$ = το διάνυσμα που περιγράφει τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους.

Λύνοντας την εξίσωση (4.1) ως προς το διάνυσμα των μετατοπίσεων προκύπτουν οι τιμές των αγνώστων μεταβλητών. Πριν όμως πραγματοποιηθεί η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας και η επίλυση της εξίσωσης, πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα.

Στα προβλήματα τάσεων η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών εμποδίζει το σώμα να συμπεριφέρεται σαν στερεό οπότε και να μετατοπίζεται κατά την εφαρμογή δυνάμεων. Η λύση της εξίσωσης (4.1) δεν είναι μια απλή διαδικασία. Η δυσκολία έγκειται στον μεγάλο αριθμό εξισώσεων που απαιτούνται για την περιγραφή του μεγάλου αριθμού κόμβων. Για παράδειγμα κάποια σώματα για να περιγραφούν σωστά χρειάζονται αρκετές χιλιάδες εξισώσεις. Είναι επομένως κατανοητό ότι η αναστροφή του μητρώου ακαμψίας δεν είναι απλή διαδικασία. Τα τελευταία χρόνια με την τεχνολογική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, τη διαδεδομένη χρήση τους και τη δημιουργία ειδικών μαθηματικών λογισμικών πακέτων η επίλυση αυτών των εξισώσεων γίνεται σε ικανοποιητικά χρονικά όρια (Fagan 1992).

Μετά από τη λύση της εξίσωσης (4.1) και άρα τον υπολογισμό των αγνώστων μετατοπίσεων για κάθε κόμβο, είναι εύκολος ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων στους κόμβους των στοιχείων. Από τον υπολογισμό των αγνώστων μετατοπίσεων γίνεται ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των τάσεων σε όλο το σώμα (Fagan 1992).

Στη συνέχεια θα δοθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή της μεθόδου με ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο χρήσης της από τους μηχανικούς και λιγότερο στις μαθηματικές αρχές που διέπουν τη μέθοδο. Αξίζει να αναφερθεί ότι το μαθηματικό υπόβαθρο των πεπερασμένων στοιχείων είναι τεράστιο και είναι αδύνατο να περιγραφεί με λεπτομέρεια αλλά αυτό δεν υπάγεται στο αντικείμενο αυτής της μελέτης. Σκοπός είναι να δοθούν κάποιες βασικές αρχές για την χρήση της μεθόδου και να γίνει μια προσπάθεια έτσι ώστε ο αναγνώστης να μην χρειαστεί να ανατρέξει σε διάφορα βοηθήματα για να κατανοήσει κάποιες βασικές έννοιες. Η μαθηματική ανάλυση της μεθόδου σε βάθος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε αυτούς που ασχολούνται με τον προγραμματισμό και την εξέλιξή της.

4.3.2 Διαδικασία της Μεθόδου

Η διαδικασία που ακολουθείται σε μια ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κάποιο λογισμικό πακέτο αποτελείται από τα εξής στάδια (Spyrakos, 1996):

- Την **προ-επεξεργασία**, η οποία αποτελεί το βασικότερο μέρος του ορισμού, από το χρήστη, των παραμέτρων της ανάλυσης. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η διακριτοποίηση και η δημιουργία του προς ανάλυση μοντέλου. Γίνεται η εισαγωγή των εξισώσεων που διέπουν τους κόμβους, με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν και τέλος εισάγονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και οι συνοριακές συνθήκες.

- Την **επεξεργασία**, που αποτελεί το μαθηματικό μέρος της μεθόδου και εκτελείται κυρίως από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια του λογισμικού. Στο στάδιο αυτό γίνεται ο υπολογισμός των μητρώων και των διανυσμάτων κάθε στοιχείου χωριστά και στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύνδεση των επιμέρους πινάκων και διανυσμάτων, ώστε να δημιουργηθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν όλο το μοντέλο. Από τις εξισώσεις αυτές δημιουργείται το μητρώο ακαμψίας και τα διανύσματα όλου του μοντέλου. Στη συνέχεια εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες που επιδρούν στο μοντέλο και στο τελευταίο μέρος του σταδίου πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων και η εύρεση των άγνωστων μεταβλητών στους κόμβους.
- Την **μετα-επεξεργασία**, κατά την οποία γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να παρασταθούν στο μοντέλο οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, τόσο με αριθμητικές τιμές όσο και με γραφικές παραστάσεις.

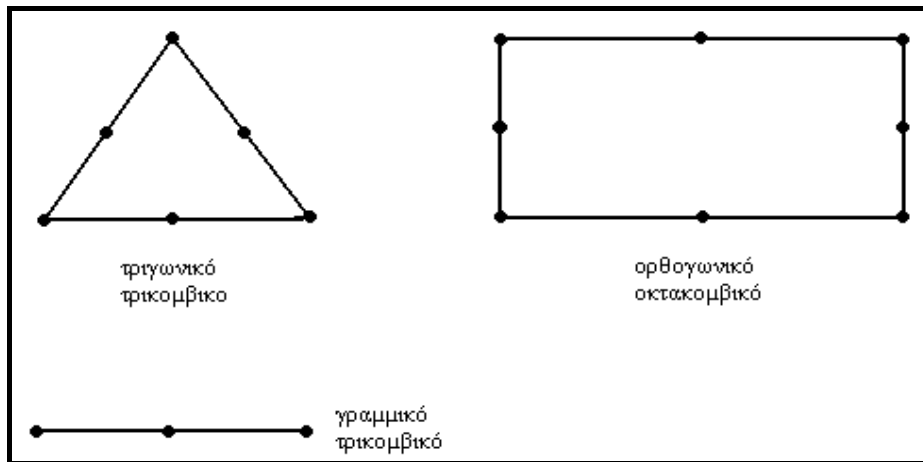
4.3.3 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση αποτελεί το πρώτο βήμα στην διαδικασία ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αφού είναι γνωστή η γεωμετρία του προς ανάλυση μοντέλου. 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 δια μέσου του σώματος.

Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμο ή καμπύλο τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους, κόμβους (nodes) του πλέγματος ή καννάβου της διακριτοποίησης του προβλήματος (grid or mesh).

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου 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 υπάρχουν παραπάνω κόμβοι που περιγράφουν ένα στοιχείο, όπως τριγωνικά και εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, κλπ (Σχήμα 4.3).

Ουσιαστικά, σε κάθε κόμβο αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν το αίτιο και αποτέλεσμα.



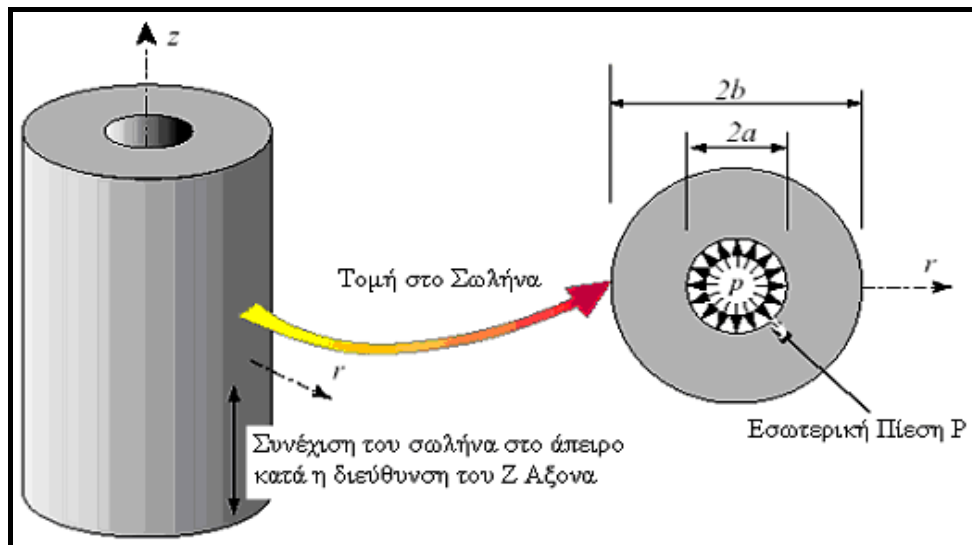
Σχήμα 4.3: Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ενός στοιχείου αναφέρεται στο σύνολο των αγνώστων μεταβλητών που αντιστοιχούν σε κάθε στοιχείο. Επίσης, τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η συμπεριφορά και κατ' επέκταση οι ιδιότητες τους με τα μεγέθη που αντιστοιχούν στους κόμβους τους. Έτσι, ένα γραμμικό στοιχείο, το οποίο ουσιαστικά παριστάνει μία ράβδο με τις κατάλληλες ιδιότητες (με ή χωρίς μάζα) 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 μηχανικής, 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 κατά τρεις στις τρεις διαστάσεις. Στις γεωτεχνικές εφαρμογές, είναι συνήθης η χρήση τριγωνικών ή τετραπλευρικών (επίπεδων) στοιχείων.

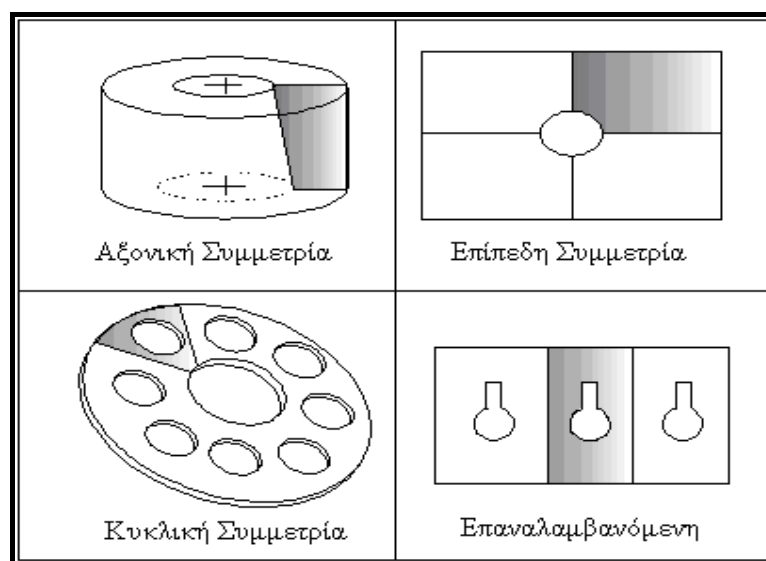
Πολλές φορές για λόγους απλότητας και ευκολίας, προβλήματα τριών διαστάσεων ανάγονται σε προβλήματα δύο διαστάσεων με μικρή μείωση της ακρίβειας της ανάλυσης. Αν η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε κάποιο σώμα μπορούν να παρασταθούν σε ένα επίπεδο τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δύο 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 δεν μεταβάλλονται σημαντικά, τότε η ανάλυση αυτών μπορεί να γίνει με την θεώρηση επίπεδης τάσης ή επίπεδης παραμόρφωσης (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Απλοποίηση γεωμετρίας από τρισδιάστατη σε δισδιάστατη για εξοικονόμηση χρόνου επίλυσης (Felippa, 2003)

Εκτός από τη γεωμετρική απλοποίηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποιο σώμα μπορεί να γίνει και απλοποίηση λόγω συμμετρίας. Υπάρχουν κυρίως τέσσερα είδη συμμετρίας που συναντώνται στα προβλήματα μηχανικής, η αξονική, η επίπεδη, η κυκλική και η επαναλαμβανόμενη (Σχήμα 4.5). Αν η γεωμετρία του σώματος και οι εξωτερικοί παράγοντες, όπως είναι τα φορτία, που δέχεται το σώμα παρουσιάζουν κάποιο από τα παραπάνω είδη συμμετρίας, υπάρχει η δυνατότητα λύσης μέρους του σώματος που παρουσιάζει συμμετρία και όχι ολόκληρου του σώματος. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο μέρος του σώματος που αναλύεται ώστε πραγματικά να αντικατοπτρίζεται η συμμετρία του ολόκληρου σώματος (Fagan 1992).



Σχήμα 4.5: Είδη συμμετρίας (Fagan, 1992)

4.3.4 Χαρακτηριστικά της Διαίρεσης του Πεδίου

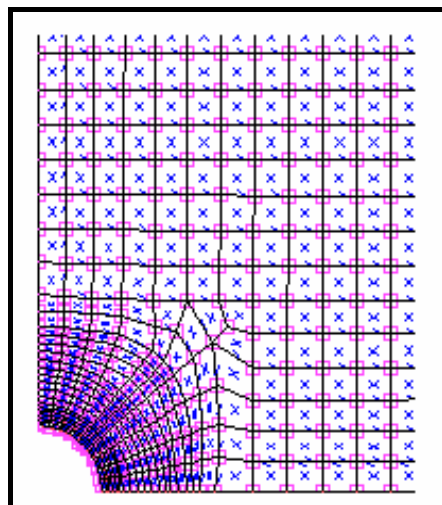
Ο σημαντικότερος παράγοντας για την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με τη Μ.Π.Σ. είναι η κατάλληλη διαίρεση του σώματος σε επιμέρους τμήματα. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- η επιλογή της γεωμετρικής μορφής των στοιχείων
- η επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου και άρα των βαθμών ελευθερίας κάθε στοιχείου
- η επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου
- η επιλογή της πυκνότητας του καννάβου

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι η χρησιμοποίηση μικρότερων στοιχείων εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών.

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 βαθμοί ελευθερίας ενός στοιχείου με την προσθήκη περισσότερων κόμβων, όπως για παράδειγμα η χρήση τετραπλευρικού στοιχείου με οκτώ κόμβους.

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. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η μεταβαλλόμενη διακριτοποίηση του μέσου, στην περίπτωση προσομοίωσης κυκλικού ανοίγματος.



Σχήμα 4.6: Μεταβαλλόμενη γεωμετρία στοιχείων

Η επιλογή των συναρτήσεων που εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών (π.χ. μετατοπίσεων) σε κάθε στοιχείο συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους, συνδέεται άμεσα με την επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς, αλλά και με τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται συναρτήσεις μορφής (Αγιουτάντης, 2002).

4.4 Οι συναρτήσεις Μορφής

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων λειτουργεί θεωρώντας μια γνωστή κατανομή διαμέσου κάθε στοιχείου για τις άγνωστες μεταβλητές. Οι εξισώσεις που ορίζουν την προσεγγιστική κατανομή των μεταβλητών ονομάζονται συναρτήσεις μορφής και μπορούν να διατυπωθούν με οποιαδήποτε μαθηματική μορφή. Στην πράξη όμως χρησιμοποιείται η πολωνυμική. Η επιλογή αυτή είναι αρκετά δημοφιλής λόγω της ευκολίας του μαθηματικού χειρισμού της. Η μορφή αυτή είναι αρκετά απλή για να παραγωγηθεί και να ολοκληρωθεί. Επίσης η ακρίβεια της ανάλυσης μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του βαθμού των πολωνυμικών συναρτήσεων.

Είναι φανερό ότι όσο υψηλότερου βαθμού είναι τα πολώνυμα τόσο περισσότερο η ανάλυσή πλησιάζει την πραγματική λύση. Όμως με η αύξηση του βαθμού του πολωνύμου αυξάνει και τον αριθμό των υπολογισμών που πρέπει να πραγματοποιηθούν για να αναλυθεί το μοντέλο. Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί ότι η ανάλυση στοιχείου που περιγράφεται με πολώνυμο δευτέρου βαθμού απαιτεί τριπλάσιο υπολογιστικό χρόνο από ότι ένα γραμμικά ορισμένο στοιχείο.

Για τον λόγο αυτό πολλές φορές προτιμάται η χρήση πυκνότερου πλέγματος στοιχείων με εξισώσεις χαμηλού βαθμού, από ότι αραιότερο πλέγμα στοιχείων με εξισώσεις μεγαλύτερου βαθμού (Desai 1986, Fagan 1992).

Η μετατόπιση σε κάθε κόμβο ενός στοιχείου εκφράζεται ως συνάρτηση των γενικευμένων συντεταγμένων (δηλαδή συντεταγμένων των κόμβων και τιμών στους κόμβους). Για ένα στοιχείο με δυο κόμβους η μετατόπιση εκφράζεται ως εξής:

$$u=a_1+a_2y \quad (4.2)$$

όπου τα a_1 και a_2 περιέχουν τις μετατοπίσεις, καθώς και τις συντεταγμένες των κόμβων 1 και 2. Αν στην παραπάνω σχέση αντικατασταθούν τα διανύσματα u και y με τις επιμέρους συνιστώσες τους, τότε προκύπτει:

$$u_1=a_1+a_1y_1 \quad (4.3)$$

$$u_2=a_1+a_2y_2 \quad (4.4)$$

και επομένως:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{q\} = [A]\{a\} \quad (4.5)$$

όπου $\{q\}$ είναι το διάνυσμα των αγνώστων μετατοπίσεων, $[A]$ είναι ο πίνακας με τις συντεταγμένες του στοιχείου και $\{a\}$ οι άγνωστοι συντελεστές. Επιλύοντας προκύπτει:

$$\{a\} = [A]^{-1} \{q\} \quad (4.6)$$

επομένως

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{y_2 u_1 - y_1 u_2}{l} \\ a_2 &= \frac{-u_1 + u_2}{l} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.2) προκύπτει:

$$\{u\} = [\Phi]\{a\} \Rightarrow \{u\} = [\Phi][A]^{-1}\{q\} \Rightarrow \{u\} = [N]\{q\} \quad (4.8)$$

όπου $[N] = [\Phi][A]^{-1}$, δηλαδή

$$u = \sum_{i=1}^n u_i N_i \quad (4.9)$$

που είναι μια έκφραση της μετατόπισης για ένα στοιχείο ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους (Αγιουτάντης, 2002).

Για τα δισδιάστατα στοιχεία οι ενέργειες που έχουν γίνει για την σύνδεση αιτίου-αποτελέσματος συνοψίζονται παρακάτω, ενώ για τρισδιάστατα στοιχεία οι ενέργειες είναι παρόμοιες:

Η μετατόπιση σε κάθε σημείο ενός στοιχείου με τέσσερις κόμβους εκφράζεται ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους $\{u_i\}$ από τη σχέση:

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 + N_4 u_4 \quad (4.10)$$

Οι καταστατικές εξισώσεις συμπεριφοράς παρίστανται από σχέσεις της μορφής:

$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}) \quad (4.11)$$

το οποίο μπορεί να γραφεί υπό μορφή πινάκων ως εξής:

$$\{\sigma\} = [E] \{\epsilon\} \quad (4.12)$$

όπου ο πίνακας $[E]$ παριστάνει ένα γενικευμένο μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού. Η δυναμική ενέργεια κάθε στοιχείου προκύπτει σαν άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας, καθώς και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο στοιχείο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Δυναμική Ενέργεια} = \text{Εσωτερική Ενέργεια} - \text{Έργο Δυνάμεων}$$

Οι εξωτερικές δυνάμεις ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Δυνάμεις πεδίου (π.χ. βαρυτικές)
- Τάσεις (π.χ. υδροστατική)
- Σημειακές δυνάμεις

Η σχέση η οποία συνδέει τη δύναμη $\{F\}$ που δέχεται κάθε κόμβος και την μετατόπιση $\{q\}$ που υφίσταται, δηλαδή το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι:

$$\{F\} = [K] \{Q\} \quad (4.13)$$

Η διαστάσεις του διανύσματος $\{F\}$ για κάθε στοιχείο εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου και από τον βαθμό ελευθερίας του κάθε κόμβου. Για δισδιάστατα τετράπλευρα στοιχεία προκύπτει ότι υπάρχουν συνολικά οκτώ βαθμοί ελευθερίας.

Η φυσική σημασία του μητρώου $[K]$ δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 4.7, όπου οι συντελεστές του μητρώου, K_{ij} αποτελούν ισοδύναμες σταθερές ιδεατών ελατηρίων τα οποία συνδέουν τους κόμβους (βαθμούς ελευθερίας) του στοιχείου μεταξύ τους. (Αγιουτάντης, 2002).

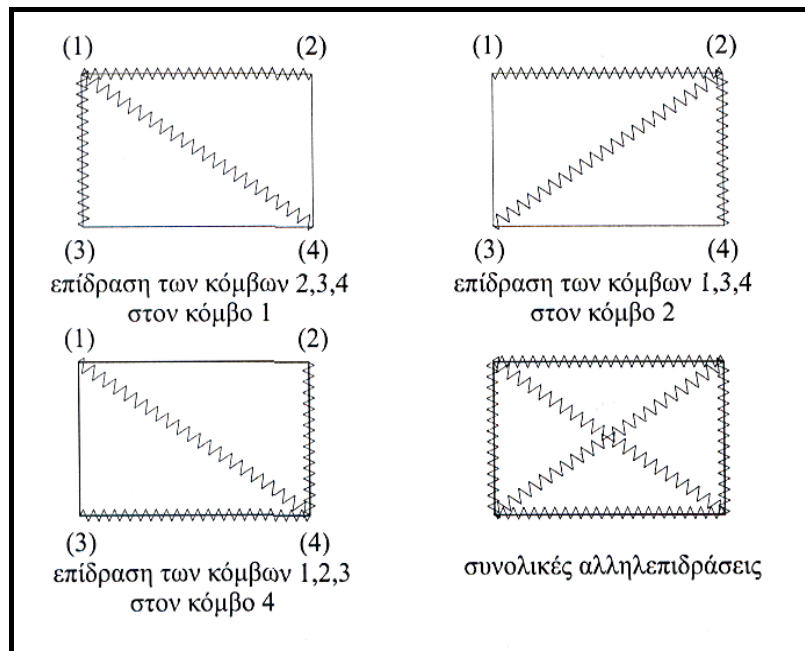
4.5 Επιβολή των Συνοριακών Συνθηκών

Μετά από τη φάση κατά την οποία οι καταστατικές εξισώσεις των στοιχείων έχουν δημιουργηθεί και έχουν συσχετισθεί, για το σχηματισμό του συστήματος των εξισώσεων όλου του μοντέλου και για να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα πρέπει να ενσωματωθούν και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο σώμα. Το σύστημα των εξισώσεων δεν είναι δυνατόν να λυθεί χωρίς την εφαρμογή τους γιατί τότε το μητρώο ακαμψίας δεν μπορεί να αντιστραφεί. Δηλαδή οι συνοριακές συνθήκες είναι περιοριστικές δυνάμεις, υπεύθυνες για την ισορροπία του σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

Η φυσική σημασία τις αδυναμίας αντιστροφής του μητρώου ακαμψίας χωρίς την εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στα προβλήματα τάσεων, είναι η ανεξέλεγκτη κίνηση με τη μορφή άκαμπτου σώματος. Παράδειγμα ελλιπούς περιορισμού αποτελεί η τρισδιάστατη ανάλυση όπου ένας κόμβος ορίζεται ώστε να μην μπορεί να μετακινηθεί προς καμία διεύθυνση. Το μοντέλο όμως μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον κόμβο αυτό.

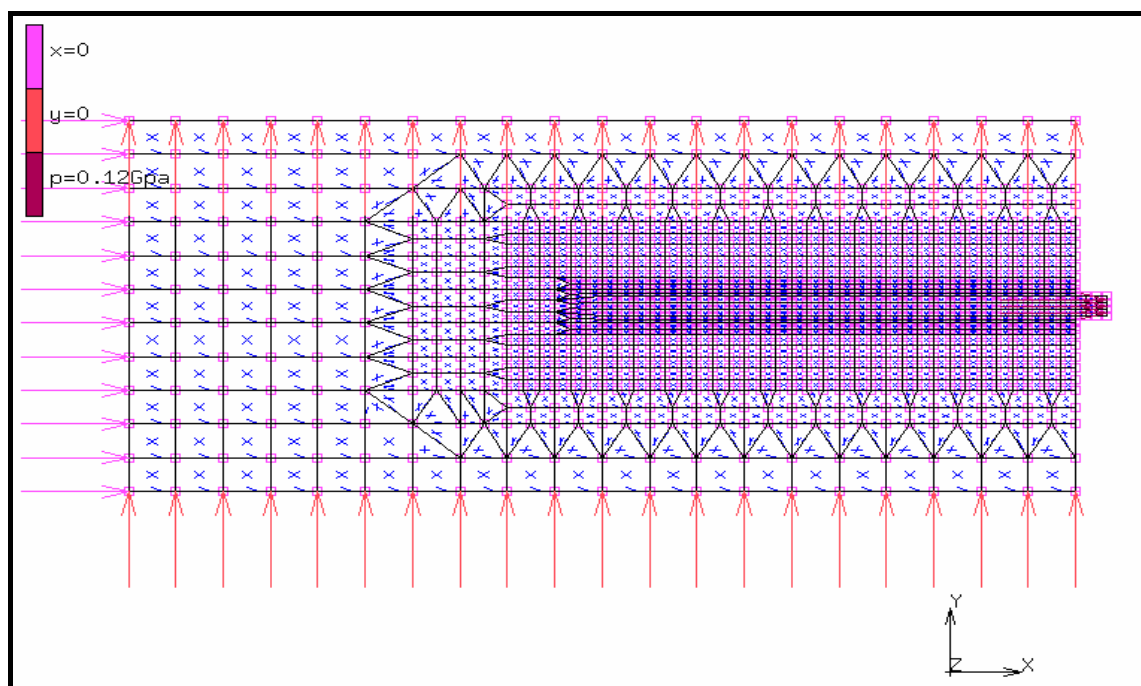
Η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου που αντιπροσωπεύει το υλικό είναι δυνατόν να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

- Επιβολή δυνάμεων πεδίου στη μάζα του στοιχείου
- Επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου
- Επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου
- Επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου



Σχήμα 4.7: Φυσική σημασία μητρώου ακαμψίας τετραπλευρικού στοιχείου (Αγιουτάντης, 2002)

Όλες οι δυνάμεις (πεδίου, επιφανειακές ή κομβικές) πρέπει να αναλυθούν κατάλληλα σε κομβικές, οι οποίες συμμετέχουν στην επίλυση του προβλήματος. Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες κατά την προσομοίωση φόρτισης μοντέλου σε δύο διαστάσεις, όπου με την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών μπορεί να αξιοποιηθεί και η συμμετρία του ορθογωνικού μοντέλου (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.8: Συνοριακές συνθήκες κατά τη φόρτιση μοντέλου σε δύο διαστάσεις

Όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών:

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες και είναι γνωστές ως συνθήκες Neumann.
- Ο προσδιορισμός και των δύο παραπάνω παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.

Στην περίπτωση των προβλημάτων ελαστικότητας, οι γεωμετρικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής (Αγιουτάντης, 2002):

$$\begin{aligned} u_x &= u_0 \\ u_y &= v_0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

όπου:

u_x, u_y = οι μετατοπίσεις στους κόμβους

u_0, v_0 = οι αντίστοιχες συνιστώσες μετατοπίσεων που επιβάλλονται στον κόμβο

Οι φυσικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής (Αγιουτάντης, 2002):

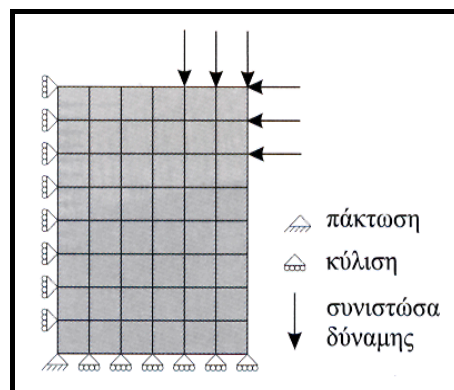
$$\begin{aligned} f_x &= f_0 \\ f_y &= w_0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Όπου:

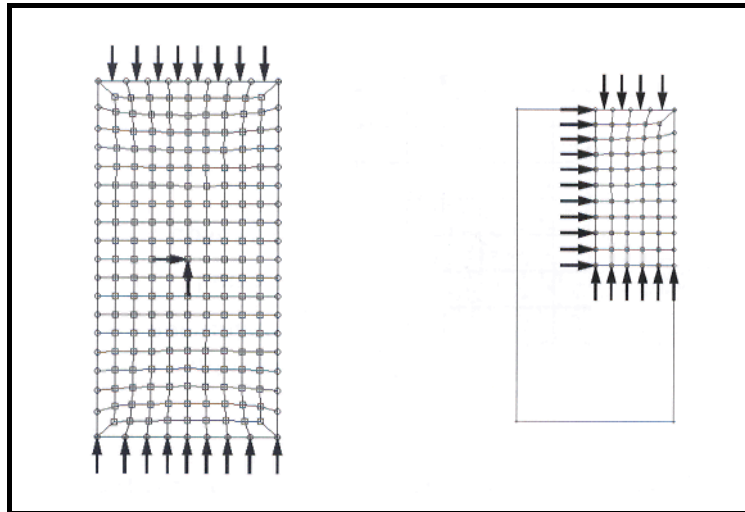
f_x, f_y = οι κομβικές δυνάμεις

f_0, w_0 = οι αντίστοιχες συνιστώσες που επιβάλλονται στον κόμβο.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται ο τυπικός συμβολισμός των συνοριακών συνθηκών. Με την αξιοποίηση της συμμετρίας ενός προβλήματος και την κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών (Σχήμα 4.10) είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των κόμβων ενός προβλήματος και επομένως να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.9: Συμβολισμός συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002)



Σχήμα 4.10: Συνοριακές συνθήκες και αξιοποίηση συμμετρίας επίπεδου μοντέλου

4.6 Τύποι Προβλημάτων

Τα προβλήματα, τα οποία μπορούν να επιλυθούν με τις αριθμητικές μεθόδους υπάγονται σε τρεις κύριες κατηγορίες (Αγιουτάντης, 2002):

- προβλήματα συνοριακών τιμών (boundary value problems). Σε αυτή την περίπτωση δίνεται η κατάσταση του πεδίου με τη μορφή συνοριακών συνθηκών στα όρια του πεδίου και ζητείται η επίλυση του προβλήματος για όλο το πεδίο ή για συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια κλασική μέθοδο για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων.
- προβλήματα αρχικών τιμών (initial value problems). Σε αυτή την περίπτωση δίνονται οι αρχικές τιμές (αρχικές συνθήκες) ενός προβλήματος και ζητείται να υπολογιστεί η κατάσταση του μετά από ορισμένο χρόνο ή ορισμένη μεταβολή της κατάστασης του. Σε αυτή την κατηγορία προβλημάτων ανήκουν και τα δυναμικά προβλήματα, τα οποία εξετάζονται σε στάδια, με την έννοια ότι οι αρχικές τιμές ενός σταδίου (n) είναι οι τιμές που προέκυψαν από την επίλυση του προηγούμενου σταδίου ($n-1$).
- μικτά προβλήματα (initial – boundary value problems). Αυτή η περίπτωση προβλημάτων είναι μια μικτή περίπτωση των δύο προηγούμενων περιπτώσεων.

4.7 Μοντέλα Συμπεριφοράς Υλικών

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού, καθώς και η σωστή επιλογή των τιμών των παραμέτρων (π.χ. το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson) του μοντέλου αυτού, αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση της συμπεριφοράς φυσικών υλικών.

Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό δεν θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών σε μια, ή περισσότερες διαστάσεις. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται γραμμικά και ισότροπα, όπως δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Αγιουτάντης, 2002):

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right] \quad (4.16)$$

όπου:

- σ_{ij} = ο τανυστής των τάσεων που υποδεικνύει την εντατική κατάσταση στο σώμα [MPa],
- E = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού [MPa],
- ν = ο λόγος Poisson του υλικού,
- ε_{ij} = ο τανυστής των παραμορφώσεων,
- δ_{ij} = ο μοναδιαίος τανυστής (δέλτα του Kronecker).

Για την περίπτωση της παραμόρφωσης σε μια διάσταση, είναι:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.17)$$

όπου:

- σ = η τάση που επιβάλλεται στο υλικό [MPa],
- E = το μέτρο ελαστικότητάς του [MPa],
- ε = η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό επιδέχεται.

Εκτός από αυτά, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν άλλα καταστατικά μοντέλα συμπεριφοράς, όπως μοντέλα μη ισοτροπικής (ορθοτροπικής ή ανισοτροπικής) ελαστικής συμπεριφοράς, καθώς και μοντέλα μη ελαστικής συμπεριφοράς. Επίσης, καθώς η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί συνεχή αλλά διακριτά τμήματα του σώματος, είναι δυνατόν να οριστούν διαφορετικές ιδιότητες υλικού σε διάφορα σημεία του σώματος (Αγιουτάντης, 2002).

Ελαστική Συμπεριφορά σε δυο Διαστάσεις

Ο προσδιορισμός της εντατικής κατάστασης ενός σώματος για τις περισσότερες εφαρμογές είναι ένα δύσκολο τρισδιάστατο πρόβλημα. Σε αρκετές όμως περιπτώσεις προβλημάτων που εξετάζονται από τη Μηχανική Πετρωμάτων (π.χ. υποστήριξη στοών, εντατική κατάσταση πρανών, θεμελιώσεις), το γεωμετρικό σχήμα του σώματος και ο τρόπος φόρτισής του επιτρέπουν τη μελέτη του σε δύο διαστάσεις (x, y). Στις επόμενες παραγράφους εξετάζεται η θεώρηση της επίπεδης τάσης (plane stress), και της επίπεδης

παραμόρφωσης (plane strain), όπου ένα σώμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε διαζονική ή επίπεδη εντατική κατάσταση. Στις δύο αυτές θεωρήσεις, οι μόνες σημαντικές τάσεις και παραμορφώσεις είναι αυτές που ανήκουν στο επίπεδο (x, y) και εκφράζονται από τις σχέσεις (Αγιουτάντης, 2002):

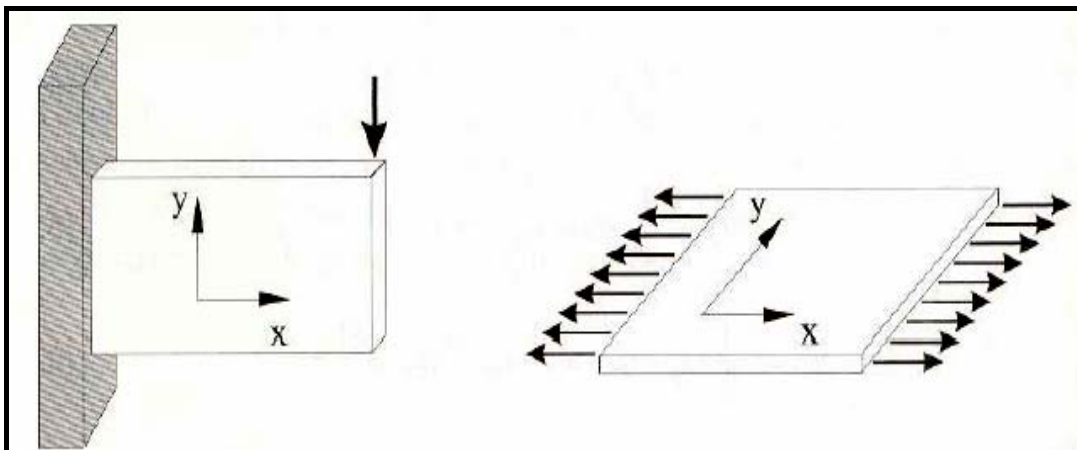
$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{και} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

Θεώρηση Επίπεδης Τάσης

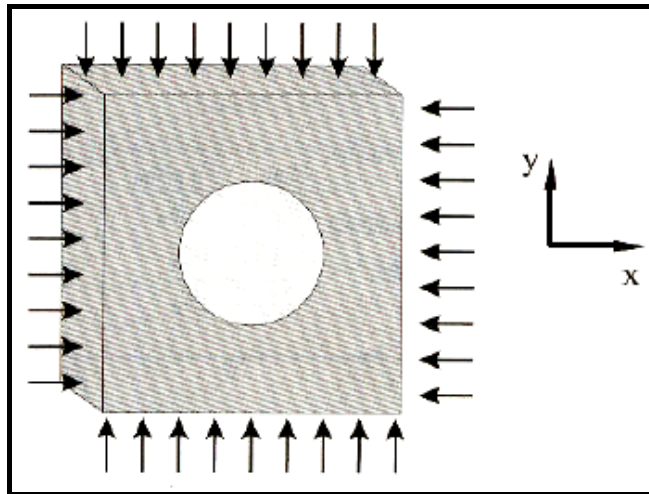
Στην περίπτωση που η τρίτη διάσταση (z) ενός σώματος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις άλλες δύο (π.χ. λεπτή επίπεδη πλάκα) και τα φορτία που δέχεται το σώμα ανήκουν στο επίπεδο των δύο σημαντικών διαστάσεων (επίπεδο x, y), μπορεί να θεωρηθεί ότι οι συνιστώσες τάσης κατά τον τρίτο άξονα είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με τις συνιστώσες κατά το επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 4.11). Η θεώρηση αυτή ονομάζεται θεώρηση της επίπεδης τάσης ή επίπεδης έντασης. (Αγιουτάντης, 2002).

Θεώρηση Επίπεδης Παραμόρφωσης

Στην περίπτωση που η τρίτη διάσταση (z) ενός σώματος δεν είναι μικρή, σε σύγκριση με τις άλλες δύο (x, y) όπως θεωρήθηκε προηγουμένως, και τα φορτία που δέχεται το σώμα είναι πάνω στο επίπεδο (x, y), τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα του διανύσματος μετατοπίσεων (u) είναι μηδενική κατά την τρίτη διάσταση ($u_z = 0$ και επομένως $\varepsilon_z = 0$) (Σχήμα 4.12), καθώς επίσης ότι τα διανύσματα μετατόπισης στο επίπεδο (x, y) είναι ανεξάρτητα από την τρίτη διάσταση, δηλαδή $u_x = f(x,y)$ και $u_y = f(x,y)$. Η θεώρηση αυτή ονομάζεται θεώρηση της επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002).



Σχήμα 4.11: Παραδοχή επίπεδης τάσης (Αγιουτάντης, 2002)



Σχήμα 4.12: Παραδοχή επίπεδης παραμόρφωσης (Αγιουτάντης, 2002)

4.8 Εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων σε γεωυλικά

Η μελέτη της συμπεριφοράς των γεωυλικών μετά τη μεταβολή του αρχικού εντατικού πεδίου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα, λόγω του ότι τα υλικά αυτά συμπεριφέρονται περισσότερο ως ασυνεχή, ανομοιογενή και ανισότροπα, παρά ως συνεχή, ομογενή και ισότροπα μέσα. Ανάλογα με το πρόβλημα που εξετάζεται σε κάθε περίπτωση, ορισμένοι παράγοντες είναι δυνατόν να έχουν μεγαλύτερη ή μικρότερη επίδραση στον υπολογισμό ή στην εκτίμηση της συμπεριφοράς των γεωυλικών. Με το διαχωρισμό των παραγόντων αυτών σε περισσότερο ή λιγότερο σημαντικούς, είναι δυνατή η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επεξεργασίας του προβλήματος, η οποία θα δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για δεδομένες συνθήκες, όπως γεωμετρία, γεωλογία, αρχικές τάσεις, τρόπο φόρτισης κ.α.

Η πλειοψηφία των αριθμητικών μεθόδων όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, απαιτεί τη διαίρεση του μέσου σε επιμέρους τμήματα, το κάθε ένα από τα οποία θεωρείται ότι έχει γνωστή γεωμετρία και γνωστές παραμέτρους συμπεριφοράς. Η λύση του προβλήματος προκύπτει από την επίλυση ενός γραμμικού ή μη γραμμικού συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων, στο οποίο συμμετέχουν όλα τα επιμέρους τμήματα του μέσου.

Τα γεωλογικά υλικά, κάτω από την επίδραση εντατικών πεδίων μπορούν να αντιδράσουν με τους εξής τρόπους (Αγιουτάντης, 2002):

- Τμήματα του ακέραιου υλικού είναι δυνατόν να παραμορφωθούν ελαστικά κάτω από συγκεκριμένο εντατικό πεδίο και στη συνέχεια όταν οι τάσεις αυξηθούν είναι δυνατόν να επέλθει διαρροή (πλαστική συμπεριφορά) ή ψαθυρή αστοχία του υλικού.

- Τυχόν ασυνέχειες του υλικού είναι δυνατόν να διευρυνθούν, να κλείσουν ή να ολισθήσουν.
- Τμήματα του υλικού είναι δυνατόν να μετατοπισθούν είτε γραμμικά είτε στροφικά.

Με τις αριθμητικές μεθόδους μπορούν να μελετηθούν προβλήματα που με άλλες μεθόδους δεν είναι εύκολο να αναλυθούν. Τα προβλήματα αυτά είναι τα εξής (Αγιουτάντης, 2002):

- Η παρουσία ρηγμάτων, ασυνεχειών, διακλάσεων και άλλων τέτοιων μορφολογικών χαρακτηριστικών στα πετρώματα.
- Η παρουσία κατεύθυνσης και προσανατολισμού της αντοχής και της αστοχίας σε πετρώματα.
- Η προσομοίωση των φάσεων εκσκαφής και τοποθέτησης των διαφόρων ειδών υποστήριξης.
- Η εφαρμογή κατάλληλων καταστατικών μοντέλων συμπεριφοράς του ερπυσμού του πετρώματος, της υποστήριξης, της σκληρότητας του εκτοξευμένου σκυροδέματος κλπ.
- Η επίδραση της πίεσης των πόρων.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίλυση των γεωμηχανικών προβλημάτων εξαρτάται από τη φυσική και μαθηματική παράσταση του κάθε προβλήματος. Οι κύριες παράμετροι που υπεισέρχονται στην κατάστρωση του πρότυπου συμπεριφοράς του υλικού αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για γραμμικά ελαστικά υλικά. Σήμερα όμως γίνεται εφαρμογή της μεθόδου και σε μη γραμμικά υλικά. Η μελέτη προβλημάτων αυτού του τύπου επιχειρείται συνήθως με τις εξής τεχνικές (Βαλαλάς, 1981):

- Βήμα προς βήμα υπολογιστική πορεία, κατά την οποία γίνεται η διαίρεση του συνολικού φορτίου σε μικρά βήματα φόρτισης και η διαδοχική εφαρμογή τους έτσι ώστε το τελικό φορτίο να είναι ίσο με το άθροισμα τους. Στη διάρκεια κάθε βήματος το μητρώο ακαμψίας παραμένει σταθερό, ενώ μπορεί να αλλάζει από το ένα βήμα στο άλλο, με αποτέλεσμα το μη γραμμικό πρόβλημα να μετασχηματίζεται ουσιαστικά σε μια σειρά γραμμικών προβλημάτων.
- Επαναληπτική υπολογιστική πορεία, κατά την οποία γίνεται η θεώρηση από τον πρώτο υπολογιστικό κύκλο του συνολικού φορτίου και της αρχικής ακαμψίας που οδηγεί στον υπολογισμό σημαντικά λανθασμένων μετατοπίσεων. Οι πρώτες μετατοπίσεις αντιστοιχούν σύμφωνα με την πραγματική μη γραμμική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων σε ένα τμήμα του συνολικού φορτίου. Στο δεύτερο υπολογιστικό

κύκλο και σε κάθε επόμενη, εκτιμάται από τα αποτελέσματα του προηγούμενου, το απαιτούμενο συμπληρωματικό φορτίο και το νέο μητρώο ακαμψίας και υπολογίζονται στη συνέχεια οι αντίστοιχες πρόσθετες μετατοπίσεις. Η υπολογιστική πορεία συνεχίζεται έως ότου οι φθίνουσες με τη διαδοχή των κύκλων πρόσθετες μετατοπίσεις να πάρουν σημαντικά μικρές τιμές.

- Μικτή υπολογιστική πορεία, κατά την οποία γίνεται συνδυασμός των δυο προηγούμενων και οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια με μεγαλύτερο όγκο υπολογισμών.

4.9 Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων

Από τη στιγμή που όλες οι εξισώσεις λυθούν αρχίζει η διαδικασία της ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αποδειχθεί αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα λόγω του τεραστίου όγκου τιμών που εξάγονται από την επίλυση του μοντέλου. Τα σημερινά λογισμικά πακέτα διαθέτουν αρκετές λειτουργίες ώστε η διαδικασία αυτή να γίνεται αρκετά πιο εύχρηστη και γρήγορη.

Τα περισσότερα λογισμικά πακέτα διαθέτουν διαγράμματα ισότιμων καμπυλών για τις διάφορες μεταβλητές που μελετούνται. Επίσης είναι εφικτή η πραγματοποίηση διαγραμμάτων των μεταβλητών σε τομές του μοντέλου που ο μελετητής ορίζει. Μια άλλη πολύ σημαντική λειτουργία είναι δυνατότητα κίνησης (animation) του μοντέλου ανάλογα με τα φορτία που επιβάλλονται ώστε να είναι ευκολότερη η κατανόηση της συμπεριφοράς του σώματος.

Κεφάλαιο 5^ο

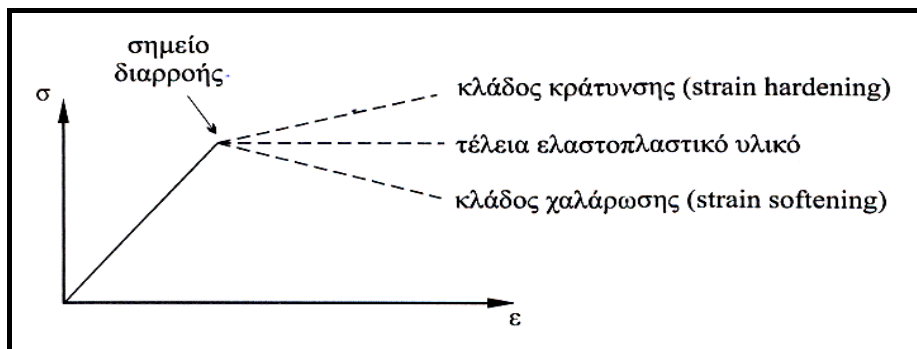
Ελαστοπλαστικά Μοντέλα και Κριτήρια Αστοχίας Mohr-Coulomb

5.1 Εισαγωγή

Ένα από τα διάφορα αντικείμενα μελέτης της Γεωμηχανικής είναι και η συμπεριφορά των διαφόρων γεωυλικών στις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να είναι ελαστική ή μη ελαστική. Η μη ελαστική συμπεριφορά περιλαμβάνει τρεις κύριες κατηγορίες, την πλαστική, την ελαστοπλαστική και την βισκοελαστική συμπεριφορά.

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από έναν γραμμικά ή μη γραμμικά ελαστικό κλάδο, και έναν πλαστικό 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 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) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 (Αγιουτάντης, 2002).

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια να παρατεθούν οι διαφορές στη συμπεριφορά των ελαστοπλαστικών γεωυλικών, για της περιπτώσεις που χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb και το παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, για την περίπτωση διαξονικής φόρτισης όταν μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας E και η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ του υλικού. Η εφαρμογή των κριτηρίων αυτών γίνεται μέσω του προγράμματος MARC.



Σχήμα 5.1: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά (Αγιουτάντης, 2002)

Έτσι για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των δύο κριτηρίων πραγματοποιείται μοντελοποίηση δοκιμών με διαστάσεις 100 mm ύψος και 50 mm διάμετρο στο λογισμικό πρόγραμμα MARC σε δύο διαστάσεις και με θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Ο τρόπος φόρτισης επιτυγχάνεται με προσδιορισμό μετατόπισης και το πλευρικό φορτίο σε κάθε περίπτωση είναι 1MPa.

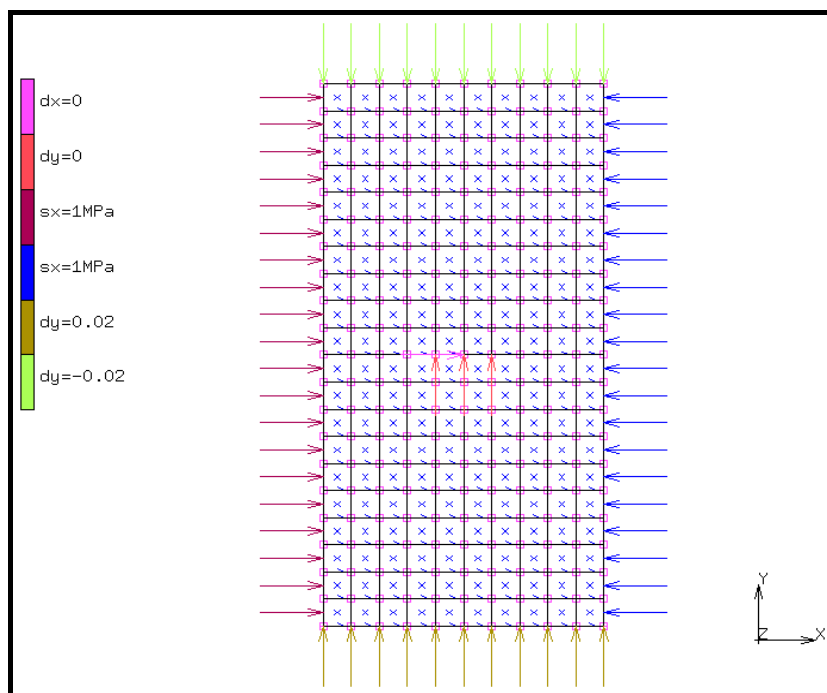
Το μέτρο ελαστικότητας και η γωνία εσωτερικής τριβής είναι δύο από τις σημαντικότερες παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά των γεωυλικών. Για το λόγο αυτό γίνεται μοντελοποίηση και εξετάζονται τα αποτελέσματα για υλικά με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής και σταθερή συνοχή 2MPa. Οι παράμετροι και οι ιδιότητες των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω γραφικών παραστάσεων σε άξονες τάσης-παραμόρφωσης. Η επιλογή αυτή των αξόνων οφείλεται στο γεγονός ότι το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση και άρα είναι ένα πολύ καλό μέτρο σύγκρισης. Ένας άλλος λόγος είναι το γεγονός ότι η τάση και η παραμόρφωση που αναπτύσσονται σε ένα υλικό δίνουν αρκετές και ικανοποιητικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του.

Οι συνοριακές συνθήκες και για τις δύο περιπτώσεις (γραμμικό και παραβολικό) φαίνονται στα Σχήματα 5.2 και 5.3. Το πλευρικό φορτίο επιβάλλεται με έλεγχο φορτίου και το κατακόρυφο φορτίο με έλεγχο μετατόπισης και μεταβάλλονται γραμμικά σε 20 βήματα.

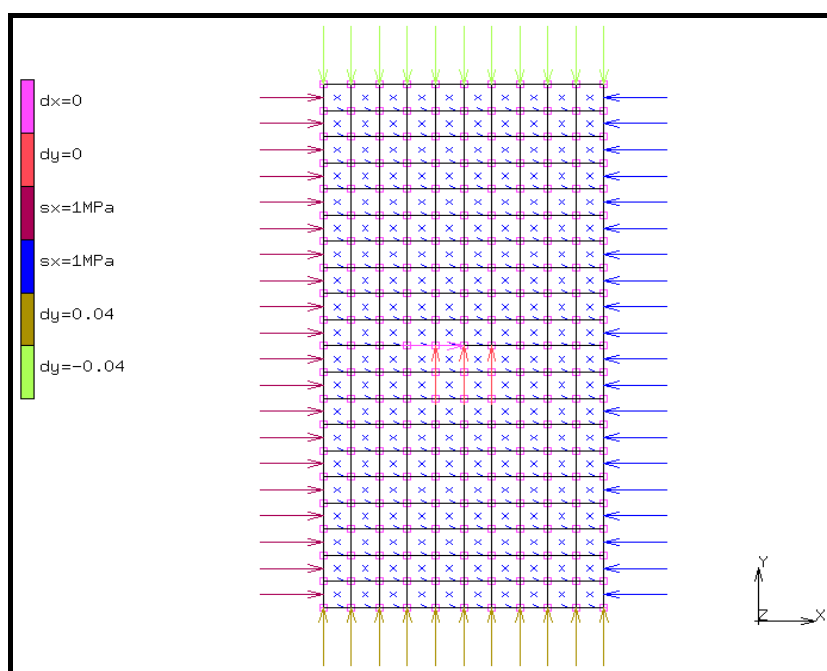
Πίνακας 5.1: Παράμετροι και ιδιότητες των μοντέλων

					Γραμμικό Mohr-coulomb		Παραβολικό Mohr-Coulomb	
Λόγος Poisson	Μέτρο ελαστικ.	Αντοχή	Γωνία εσ. τριβής	Συνοχή		Σημείο διαρροής		Σημείο διαρροής
ν	E (GPa)	C ₀ (MPa)	ϕ (deg)	C (MPa)	α	$\bar{\sigma}$ (MPa)	β	$\bar{\sigma}$ (MPa)
0.25	25	5.71	20	2.00	0.112	5.532	0.0186	3.462
0.25	25	6.93	30	2.00	0.160	4.993	0.0267	3.460
0.25	25	8.57	40	2.00	0.201	4.311	0.0335	3.458
0.25	50	5.71	20	2.00	0.112	5.532	0.0186	3.462
0.25	50	6.93	30	2.00	0.160	4.993	0.0267	3.460
0.25	50	8.57	40	2.00	0.201	4.311	0.0335	3.458
όπου: $\alpha = \sqrt{\frac{\sin \phi^2}{9 + 3 \sin^2 \phi}}$ και $\beta = \frac{\alpha}{\sqrt{3(3c^2 - \alpha^2)}}$ συντελεστές.								



Σχήμα 5.2: Συνοριακές συνθήκες για τα μοντέλα με $E=50\text{GPa}$

Όπως είναι αναμενόμενο στην περίπτωση που το μέτρο ελαστικότητας είναι 25GPa το υλικό δέχεται μικρότερες τάσεις, από ότι στην περίπτωση με μέτρο ελαστικότητας 50GPa , για τις ίδιες μετατοπίσεις, άρα και για τις ίδιες παραμορφώσεις. Για αυτό το λόγο στις περιπτώσεις που το μέτρο ελαστικότητας είναι 25GPa η φόρτιση στον κατακόρυφο άξονα αυξάνεται και οι συνοριακές συνθήκες διαμορφώνονται όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Συνοριακές συνθήκες για τα μοντέλα με $E=25\text{GPa}$

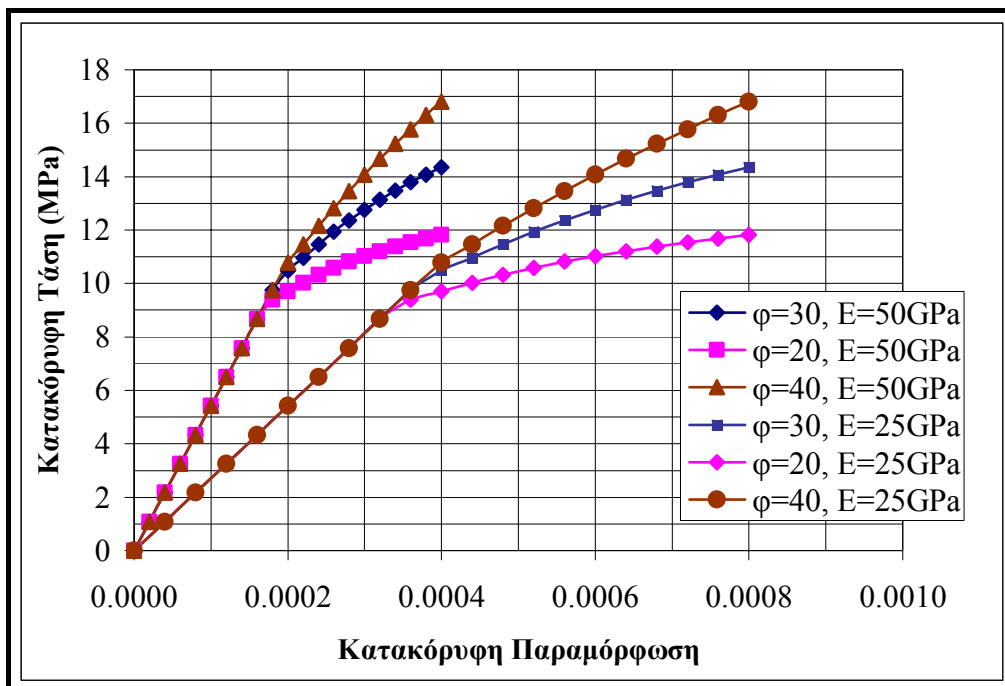
5.2 Μελέτη του Γραμμικού Κριτηρίου Mohr-Coulomb

Ελαστοπλαστική συμπεριφορά σε αυτή την περίπτωση απεικονίζεται στο διάγραμμα σ-ε από έναν γραμμικά ελαστικό κλάδο και έναν πλαστικό κλάδο. Στην περίπτωση που εξετάζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, οι δύο αυτοί κλάδοι εμφανίζονται να επηρεάζονται ανάλογα με τις παραμέτρους του υλικού.

Ο ελαστικός κλάδος του σχήματος 5.4 δεν επηρεάζεται από τη γωνία εσωτερικής τριβής, ενώ αντίθετα όπως είναι αναμενόμενο επηρεάζεται από το μέτρο ελαστικότητας και εμφανίζεται αλλαγή της κλίσης (ορισμός του μέτρου ελαστικότητας).

Αντίθετα με τον ελαστικό κλάδο ο πλαστικός κλάδος εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις όταν μεταβάλλεται η γωνία εσωτερικής τριβής. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής τόσο αυξάνεται η κλίση του πλαστικού κλάδου. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι για μεγάλες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής η συμπεριφορά του πετρώματος πλησιάζει την ελαστική συμπεριφορά, ενώ αντίθετα όσο μικρότερη είναι η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής τόσο το υλικό πλησιάζει την τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Συγκρίνοντας τους κλάδους πλαστικής συμπεριφοράς για την ίδια τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής (π.χ $\varphi=30^\circ$) (Σχήμα 5.4) προκύπτει ότι ο υποδιπλασιασμός του μέτρου ελαστικότητας συνεπάγεται και υποδιπλασιασμό της κλίσης του πλαστικού κλάδου.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για ελαστοπλαστικό υλικό και γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

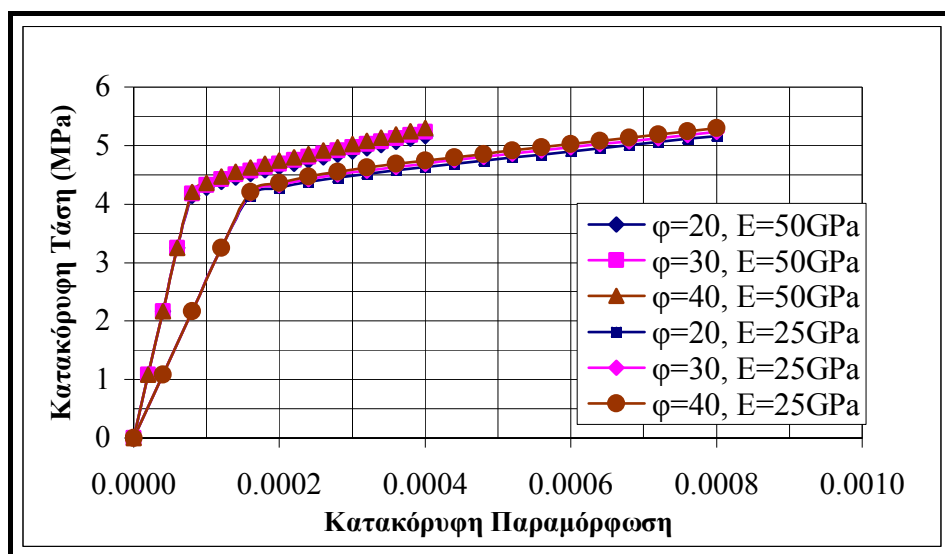
Παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση της τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής σημαίνει και αύξηση της αντοχής σε θλίψη του υλικού.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 5.4 και τον Πίνακα 5.1, προκύπτει ότι το σημείο διαρροής που εισάγεται στην ρουτίνα του προγράμματος MARC δεν σχετίζεται με την αντοχή σε θλίψη του υλικού. Επίσης ενώ οι τιμές του πίνακα δείχνουν ότι η γωνία εσωτερικής τριβής επηρεάζει την τιμή του σημείου διαρροής, στο γράφημα φαίνεται ότι η τιμή του σημείου διαρροής παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την γωνία εσωτερικής τριβής. Αυτό οφείλεται στο ότι η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του σημείου διαρροής που εισάγεται στην ρουτίνα του MARC δεν σχετίζεται με την πραγματική τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής του υλικού. Όπως είναι αναμενόμενο σε καμία περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζει το σημείο διαρροής.

5.3 Μελέτη του Παραβολικού κριτηρίου Mohr-Coulomb

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά και σε αυτή την περίπτωση απεικονίζεται στο διάγραμμα σ - ϵ από έναν γραμμικά ελαστικό κλάδο και έναν πλαστικό κλάδο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, οι δύο αυτοί κλάδοι επηρεάζονται ανάλογα με τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής και του μέτρου ελαστικότητας.

Και σε αυτή την περίπτωση όπως και στην προηγούμενη ο ελαστικός κλάδος του σχήματος 5.5 δεν επηρεάζεται από τη γωνία εσωτερικής τριβής, ενώ αντίθετα όπως είναι αναμενόμενο επηρεάζεται από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας το οποίο προκαλεί αλλαγή στην κλίση του.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για ελαστοπλαστικό υλικό και παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Όπως στον ελαστικό κλάδο έτσι και στον πλαστικό κλάδο δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις όταν μεταβάλλεται η γωνία εσωτερικής τριβής. Παρατηρείται ότι όσο μεταβάλλεται η γωνία εσωτερικής τριβής πολύ μικρές αλλαγές προκαλούνται στην κλίση του πλαστικού κλάδου. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι ανεξάρτητα από τις τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής η συμπεριφορά του πετρώματος παραμένει η ίδια και στον ελαστικό και στον πλαστικό κλάδο.

Συγκρίνοντας τους κλάδους πλαστικής συμπεριφοράς για οποιαδήποτε τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής προκύπτει ότι ο υποδιπλασιασμός του μέτρου ελαστικότητας συνεπάγεται και υποδιπλασιασμό της κλίσης του πλαστικού κλάδου.

Επίσης η μεταβολή της τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής δεν επιφέρει καμία αλλαγή στην αντοχή σε θλίψη του υλικού.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 5.5 και τον Πίνακα 5.1 φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις η γωνία εσωτερικής τριβής επηρεάζει ελάχιστα την τιμή του σημείου διαρροής. Όπως είναι αναμενόμενο σε καμία περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζει το σημείο διαρροής.

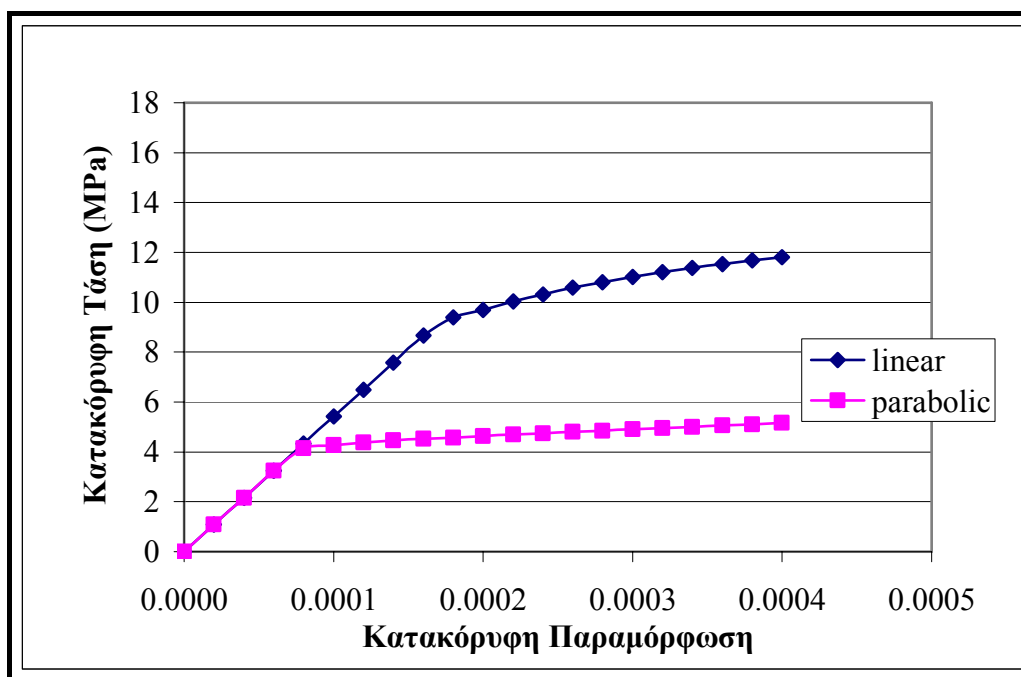
Η μοναδική λοιπόν παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού είναι το μέτρο ελαστικότητας, και αυτό επηρεάζει μόνο την κλίση των δύο κλάδων. Αντίθετα η μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του υλικού όταν χρησιμοποιείται το παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

5.4 Σύγκριση της Συμπεριφοράς των Υλικών για Γραμμικά και Παραβολικά Κριτήρια Mohr-Coulomb

Με βάση τις τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής και του μέτρου ελαστικότητας γίνεται προσπάθεια να συγκριθούν οι συμπεριφορές του υλικού στις αντίστοιχες περιπτώσεις εφαρμογής του γραμμικού και του παραβολικού κριτηρίου Mohr-Coulomb.

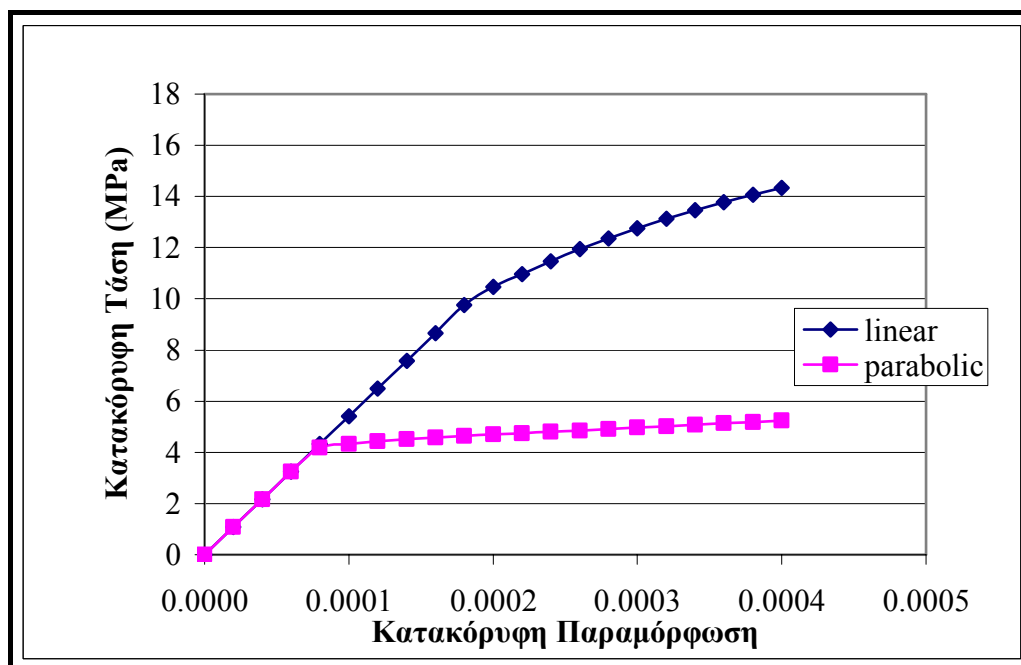
Όπως προηγουμένως έτσι και τώρα ένα πολύ καλό μέτρο σύγκρισης είναι η αποτύπωση τις συμπεριφοράς του υλικού σε διαγράμματα με άξονες τάση – παραμόρφωση. Στη συνέχεια ακολουθεί μία σειρά από τέτοια διαγράμματα στα οποία φαίνονται οι συμπεριφορές των υλικών με τις ίδιες παραμέτρους και ιδιότητες και για τα δύο κριτήρια.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.6 οι σημαντικότερες διαφορές εντοπίζονται σε τρία σημεία: α) το σημείο διαρροής, β) τον πλαστικό κλάδο και γ) την τάση που δέχεται το υλικό.

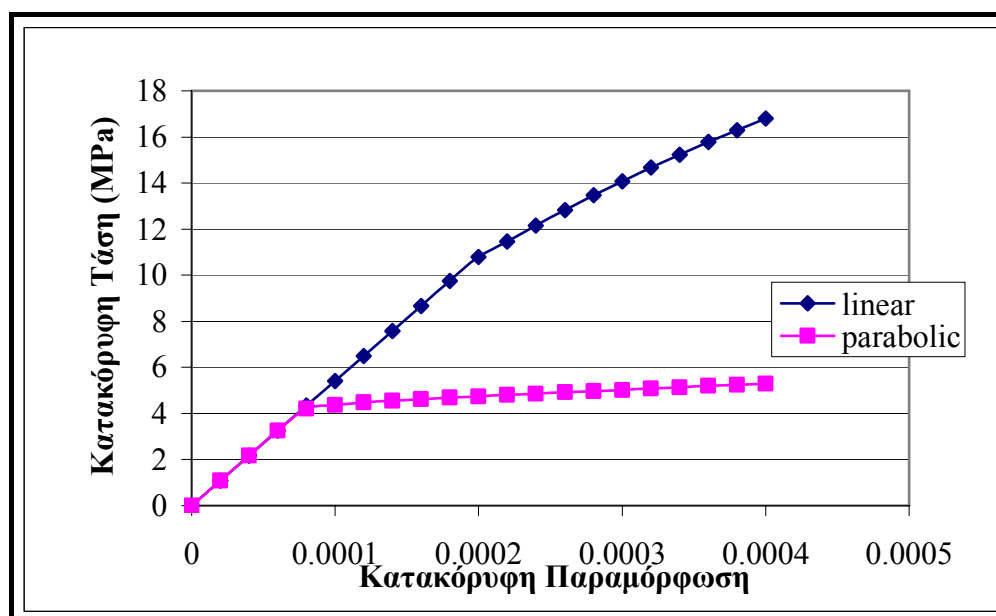


Σχήμα 5.6: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών με $\phi=20^\circ$ και $E=50$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο

Αναλυτικότερη σύγκριση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί συγκρίνοντας και τα σχήματα 5.7 και 5.8 στα οποία μεταβάλλεται η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής σε σχέση με το σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.7: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών με $\phi=30^\circ$ και $E=50$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο

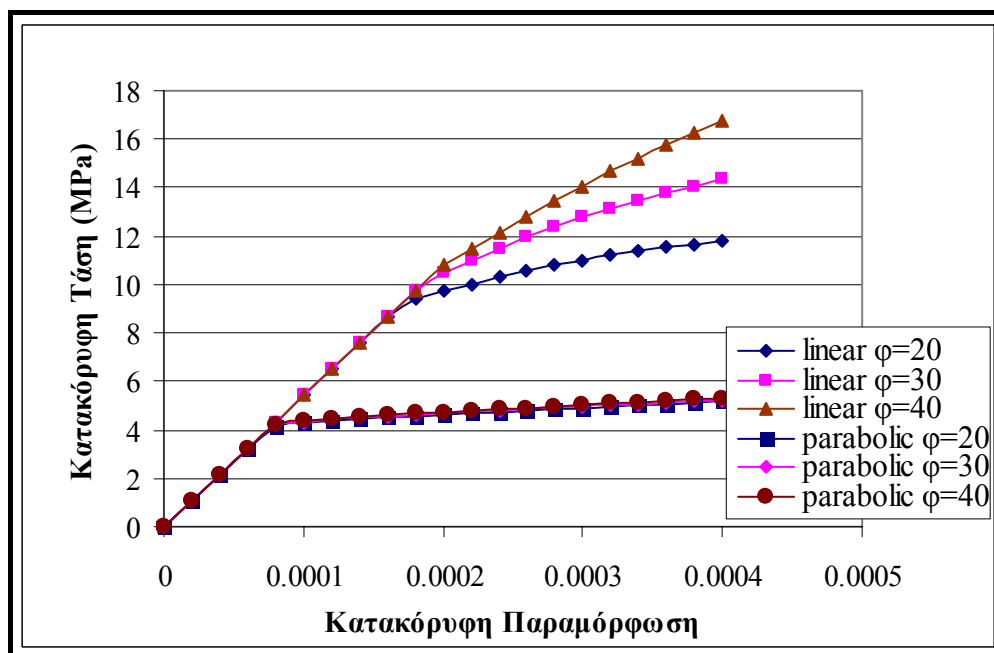


Σχήμα 5.8: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών με $\phi=40^\circ$ και $E=50$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.6, 5.7 και 5.8, εντοπίζονται οι ακόλουθες διαφορές με τη χρήση των δύο κριτηρίων:

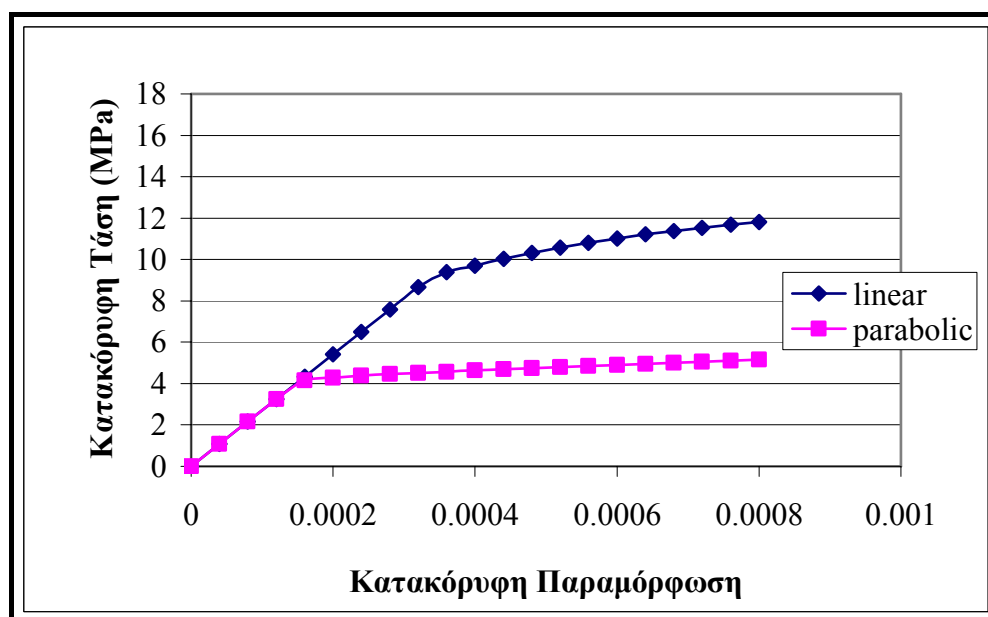
- Το σημείο διαρροής στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το παραβολικό κριτήριο αστοχίας παίρνει σχεδόν την μισή τιμή από αυτή που παίρνει όταν χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο αστοχίας.
- Οι τάσεις που δέχεται, στον πλαστικό κλάδο, στην περίπτωση του γραμμικού κριτηρίου είναι μεγαλύτερες από το διπλάσιο από αυτές που δέχεται στον αντίστοιχο κλάδο στην περίπτωση του παραβολικού κριτηρίου. Η διαφορά, μεταξύ των τιμών των τάσεων αυτών αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής, αφού όπως φαίνεται η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής προκαλεί αύξηση της τάσης που δέχεται το υλικό με γραμμικό ενώ δεν επηρεάζει την τάση που δέχεται το υλικό με παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.
- Από την κλίση των πλαστικών κλάδων εξάγεται το συμπέρασμα ότι το υλικό στο οποίο χρησιμοποιείται το παραβολικό κριτήριο τείνει να έχει τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Αντίθετα το υλικό στο οποίο χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο εμφανίζει ελαστοπλαστική συμπεριφορά με κράτυνση.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις συνοψίζονται σε ένα συνολικό διάγραμμα (Σχήμα 5.9) στο οποίο φαίνονται οι συμπεριφορές για όλα τα υλικά με μέτρο ελαστικότητας 50GPa.

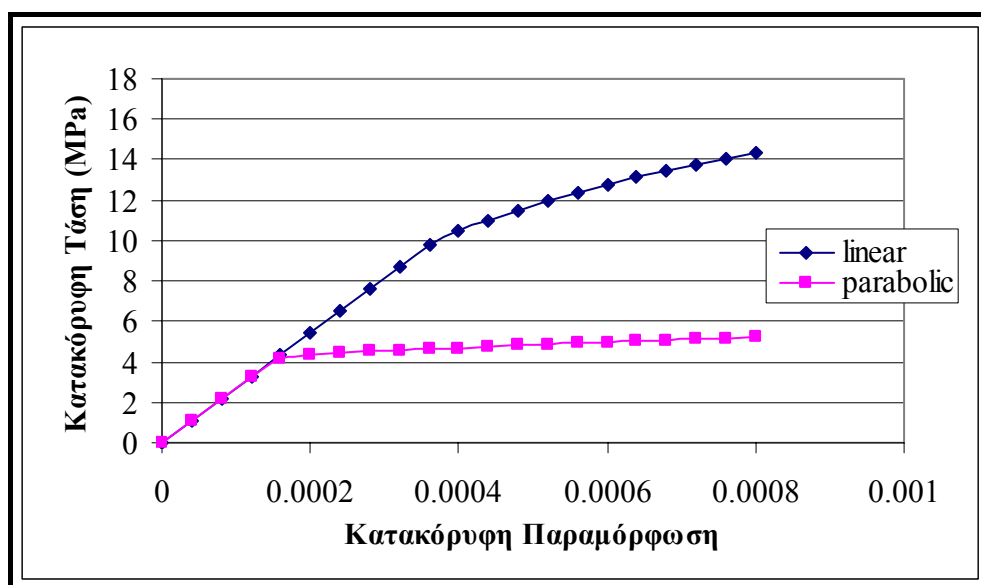


Σχήμα 5.9: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωλικών με $E=50$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο

Όμοια διαδικασία ακολουθείται και για τα υλικά τα οποία έχουν μέτρο ελαστικότητας 25 GPa και στα οποία μεταβάλλεται η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής. Έτσι παρατίθεται μία σειρά από διαγράμματα (Σχήμα 5.10, 5.11 και 5.12) τα οποία χρησιμεύουν στη σύγκριση.



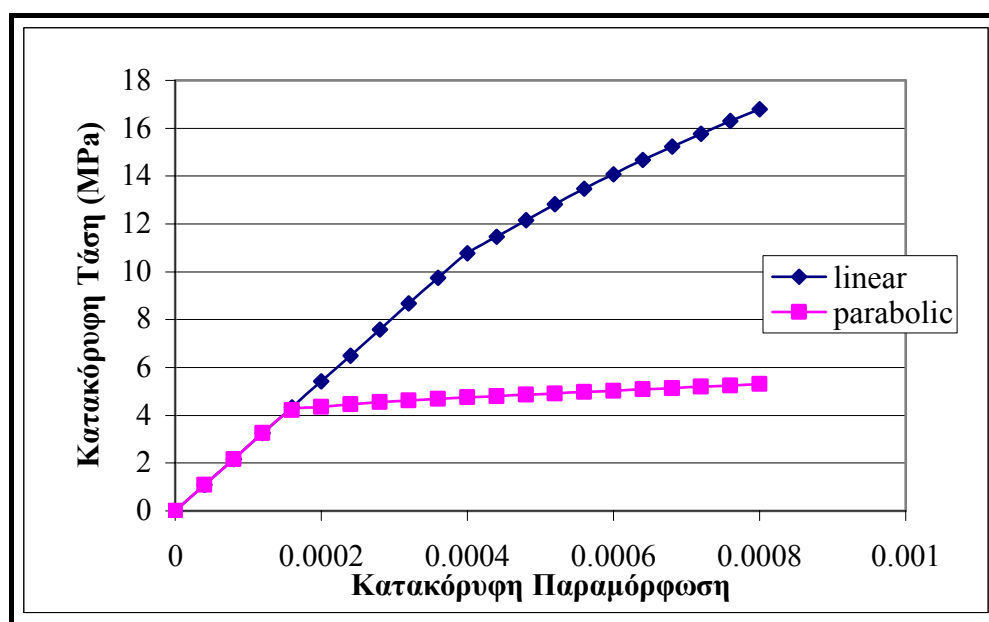
Σχήμα 5.10: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωλικών με $\phi=20^\circ$ και $E=25$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο



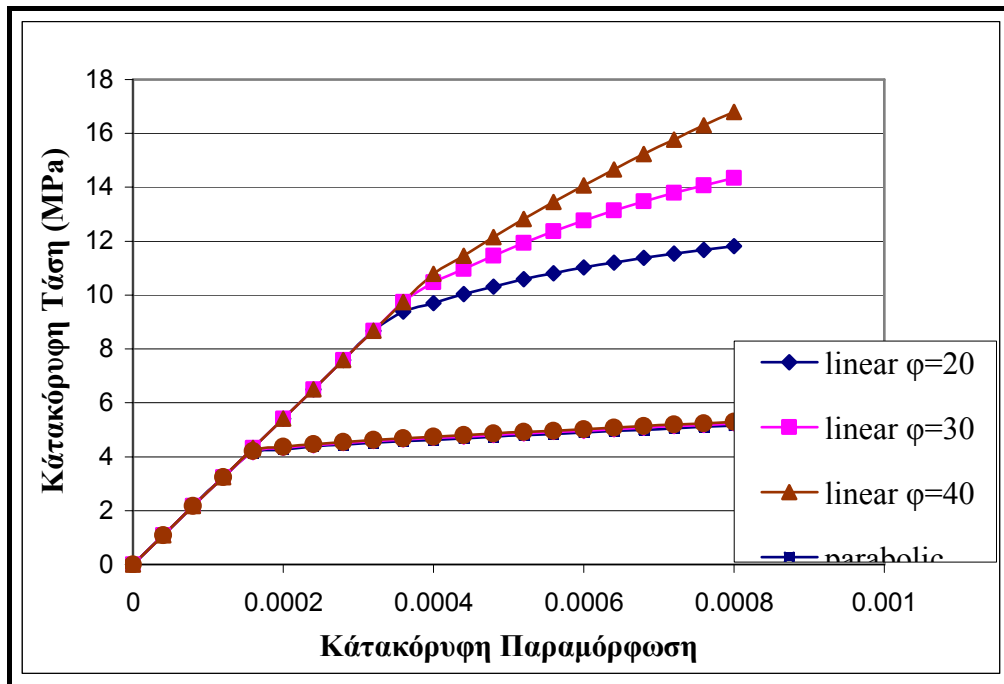
Σχήμα 5.11: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών με $\phi=30^\circ$ και $E=25$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο

Και σε αυτή την περίπτωση όπως και στην περίπτωση με $E=50$ GPa οι σημαντικότερες διαφορές εντοπίζονται στα ίδια σημεία: α) το σημείο διαρροής, β) τον πλαστικό κλάδο και γ) την τάση που δέχεται το υλικό.

Παρατηρούνται μικρές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα μοντέλα με μέτρο ελαστικότητας 50 GPa οι οποίες όμως οφείλονται στην αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας και όχι στη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής.



Σχήμα 5.12: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών με $\phi=40^\circ$ και $E=25$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο



Σχήμα 5.13: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών με $E=25$ GPa για γραμμικό και παραβολικό κριτήριο

Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.10, 5.11, 5.12 και 5.13, εντοπίζονται διαφορές με τη χρήση των δύο κριτηρίων οι οποίες είναι ίδιες με την περίπτωση που το μέτρο ελαστικότητας είναι 50GPa.

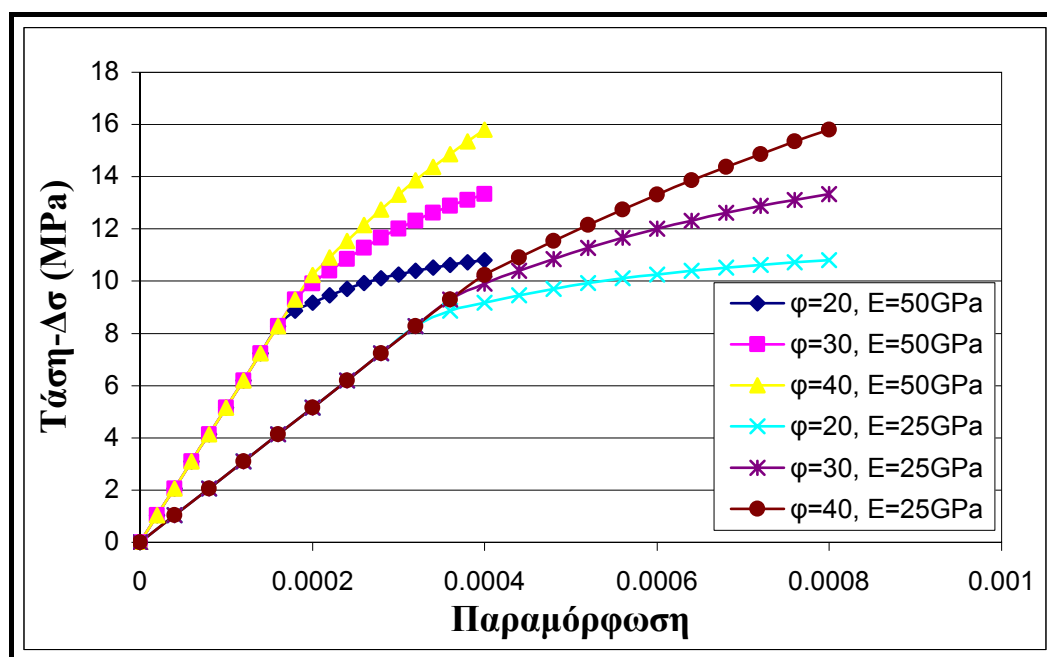
5.5 Επιπλέον Σύγκριση

Όλες οι συγκρίσεις που έγιναν στις προηγούμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου έγιναν μέσω διαγραμμάτων σε άξονες κατακόρυφης τάσης – κατακόρυφης παραμόρφωσης. Για την καλύτερη σύγκριση και την ακριβέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων σε αυτή την ενότητα παρατίθενται διαγράμματα σε άξονες $\Delta\sigma$ - ϵ_1 και σε άξονες σ_1 - σ_2 .

Στα διαγράμματα $\Delta\sigma$ - ϵ_1 με τον συμβολισμό $\Delta\sigma$ εννοείται η διαφορά της πρώτης κύριας τάσης (σ_1) μείων την δεύτερη κύρια τάση (σ_2) ενώ με τον συμβολισμό ϵ_1 εννοείται η πρώτη κύρια παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του κατακόρυφου άξονα.

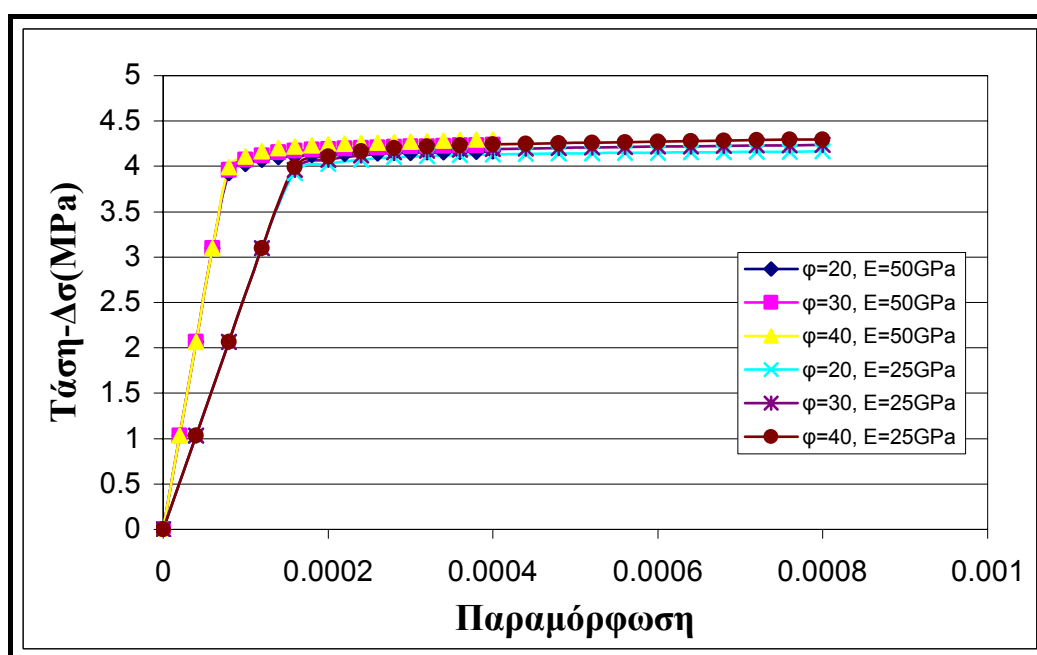
Στα διαγράμματα σ_1 - σ_2 η πρώτη κύρια τάση είναι η κατακόρυφη τάση και η δεύτερη κύρια τάση είναι η οριζόντια τάση.

Στην συνέχεια ακολουθεί μία σειρά από διαγράμματα στα οποία φαίνονται οι συμπεριφορές των υλικών στα αντίστοιχα διαγράμματα για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται το γραμμικό και το παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

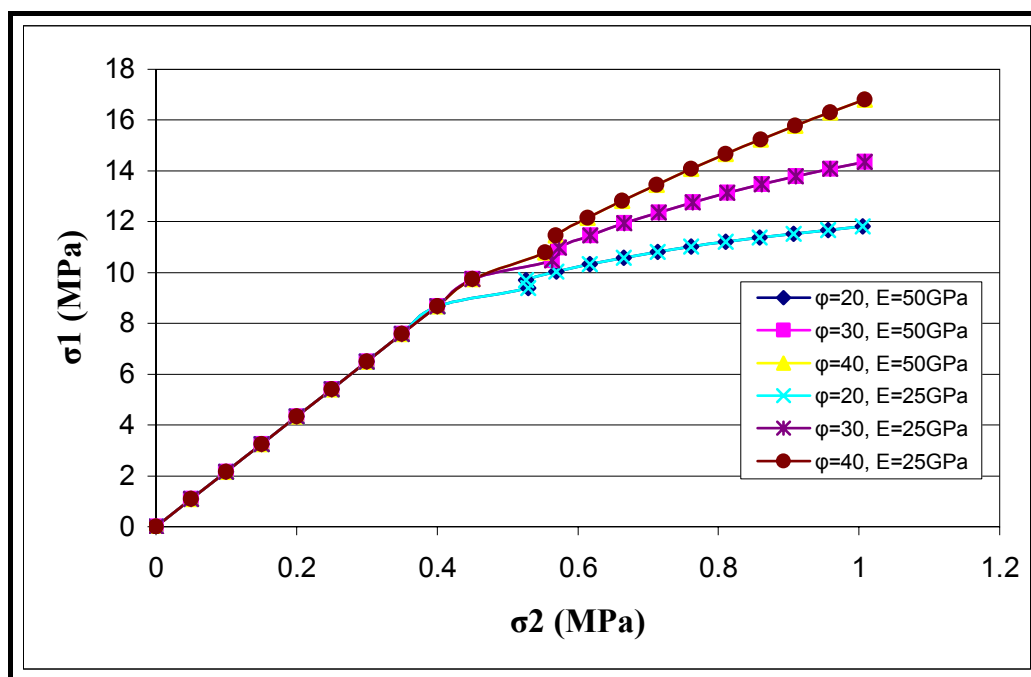


Σχήμα 5.14: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών στα οποία χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο αστοχίας

Οι διαφορές των διαγραμμάτων με κατακόρυφο άξονα $\Delta\sigma$ (Σχήμα 5.14 και 5.15) με τα αντίστοιχα διαγράμματα στα οποία ο κατακόρυφος άξονας είναι σ_1 (Σχήμα 5.4 και 5.5) είναι πολύ μικρές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές της πρώτης κύριας τάσης (σ_1) είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές της δεύτερης κύριας τάσης (σ_2).

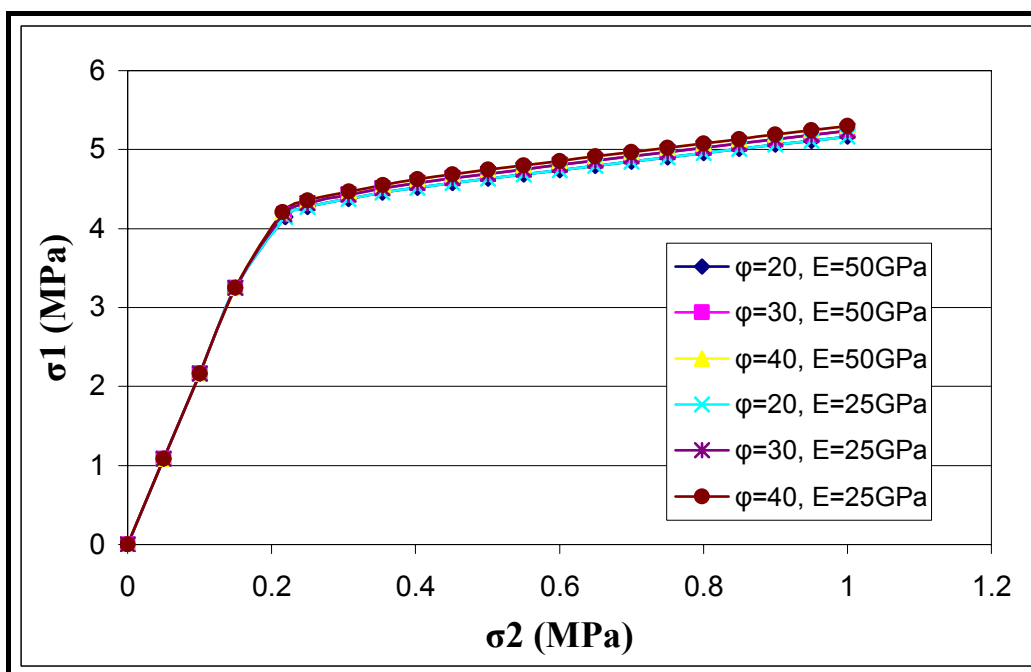


Σχήμα 5.15: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών στα οποία χρησιμοποιείται το παραβολικό κριτήριο αστοχίας



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα 1^{ης} κύριας τάσης – 2^{ης} κύριας τάσης για την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών στα οποία χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο αστοχίας

Στα Σχήματα 5.16 και 1.17 παρατηρείται μία αστάθεια στα σημεία που αναφέρονται στις τιμές των τάσεων αμέσως μετά την αστοχία. Η αστάθεια αυτή πιθανότατα οφείλεται σε αστάθεια του προγράμματος MARC και όχι σε αστάθεια των υλικών.



Σχήμα 5.17: Διάγραμμα 1^{ης} κύριας τάσης – 2^{ης} κύριας τάσης για την ελαστοπλαστική συμπεριφορά των γεωυλικών στα οποία χρησιμοποιείται το παραβολικό κριτήριο αστοχίας

5.6 Συμπεράσματα

Με βάση τη διαδικασία που ακολουθήθηκε, τις παρατηρήσεις που σημειώθηκαν και τα διαγράμματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του γεωυλικού παρά μόνο στην κλίση του ελαστικού και του πλαστικού κλάδου, όπως είναι φυσικό.
- ✓ Η γωνία εσωτερικής τριβής επηρεάζει μόνο τον πλαστικό κλάδο του υλικού στο οποίο χρησιμοποιείται το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb. Τα υλικά στα οποία χρησιμοποιείται το παραβολικό κριτήριο Mohr-Coulomb δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής.
- ✓ Τα μοντέλα στα οποία εφαρμόζεται το γραμμικό κριτήριο δέχονται μεγαλύτερες τάσεις από τα αντίστοιχα με το παραβολικό κριτήριο, για τις ίδιες παραμορφώσεις.
- ✓ Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά των υλικών στα οποία χρησιμοποιείται το γραμμικό Mohr-Coulomb με αυτή των υλικών στα οποία χρησιμοποιείται το παραβολικό Mohr-Coulomb, φαίνεται στη δεύτερη περίπτωση, η συμπεριφορά να είναι πιο σταθερή και ανεξάρτητη σε σχέση με τη γωνία εσωτερικής τριβής και το μέτρο ελαστικότητας.

Κεφάλαιο 6^ο

Διερεύνηση του Τρόπου Αστοχίας του Τσιμέντου που Χρησιμοποιείται ως Μέσο Συγκόλλησης στα Αγκύρια Κατανεμημένης Αγκύρωσης

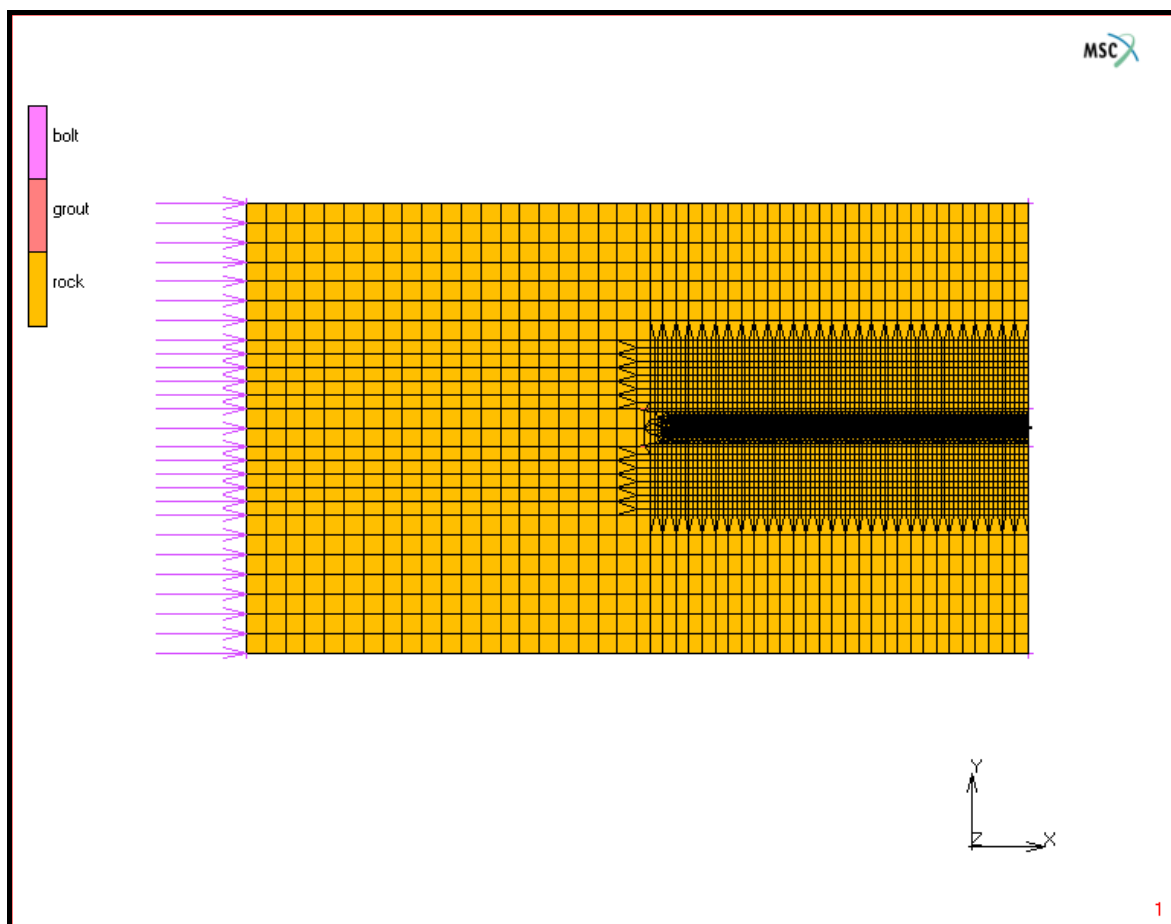
6.1 Εισαγωγή

Όπως έγινε ήδη σαφές, από τα προηγούμενα κεφάλαια, ένα από τα πλέον σύγχρονα, γρήγορα και ασφαλή συστήματα υποστήριξης υπόγειων ανοιγμάτων είναι η υποστήριξη με αγκύρια. Ένας από τους τύπους των αγκυρίων αυτών είναι ο Κοχλίας Κατανεμημένης Αγκύρωσης. Υπάρχουν δύο είδη συγκολλητικών υλικών που χρησιμοποιούνται στους κοχλίες αυτούς. Συγκολλητικά υλικά με βάση το τσιμέντο και συγκολλητικά υλικά με βάση τις ρητίνες. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να διερευνηθεί ο μηχανισμός μεταφοράς τάσεων για τα αγκύρια των οποίων το συγκολλητικό υλικό γίνεται με βάση το τσιμέντο. Στην πραγματικότητα το συγκολλητικό υλικό είναι ένα είδος σκυροκονιάματος, δηλαδή σκυροδέματος με πολύ λεπτομερή αδρανή έτσι ώστε να είναι εύκολη η εισπίεσή τους στην οπή της κοχλίωσης.

Η διερεύνηση αυτή γίνεται μέσω του λογισμικού MARC-MENTAT το οποίο εφαρμόζει τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση είτε στατικών είτε δυναμικών προβλημάτων. Έτσι, για το σκοπό της εργασίας δημιουργήθηκε μία σειρά μοντέλων τα οποία προσπαθούν να προσομοιώσουν τις συνθήκες αγκύρωσης του κοχλία στο πέτρωμα μέσω του σκυροδέματος, το οποίο αναλαμβάνει το ρόλο της μεταφοράς των τάσεων. Κατά τη διαδικασία της διερεύνησης αυτής εξετάζονται τα μοντέλα αυτά για διαφορετικές παραμέτρους υλικών και διαφορετικά φορτία αγκύρωσης.

6.2 Περιγραφή των Διαστάσεων των Μοντέλων

Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται μία τυπική μορφή μοντέλου καθώς και η μοντελοποίηση των διαφόρων υλικών. Τα υλικά που αποτελούν το μοντέλο είναι: α) το πέτρωμα (rock), β) το αγκύριο (bolt) και γ) το σκυρόδεμα (grout). Το σκυρόδεμα συνδέει το αγκύριο με το πέτρωμα και έτσι επιτρέπει την μεταφορά τάσεων από το αγκύριο στο πέτρωμα και αντίστροφα.

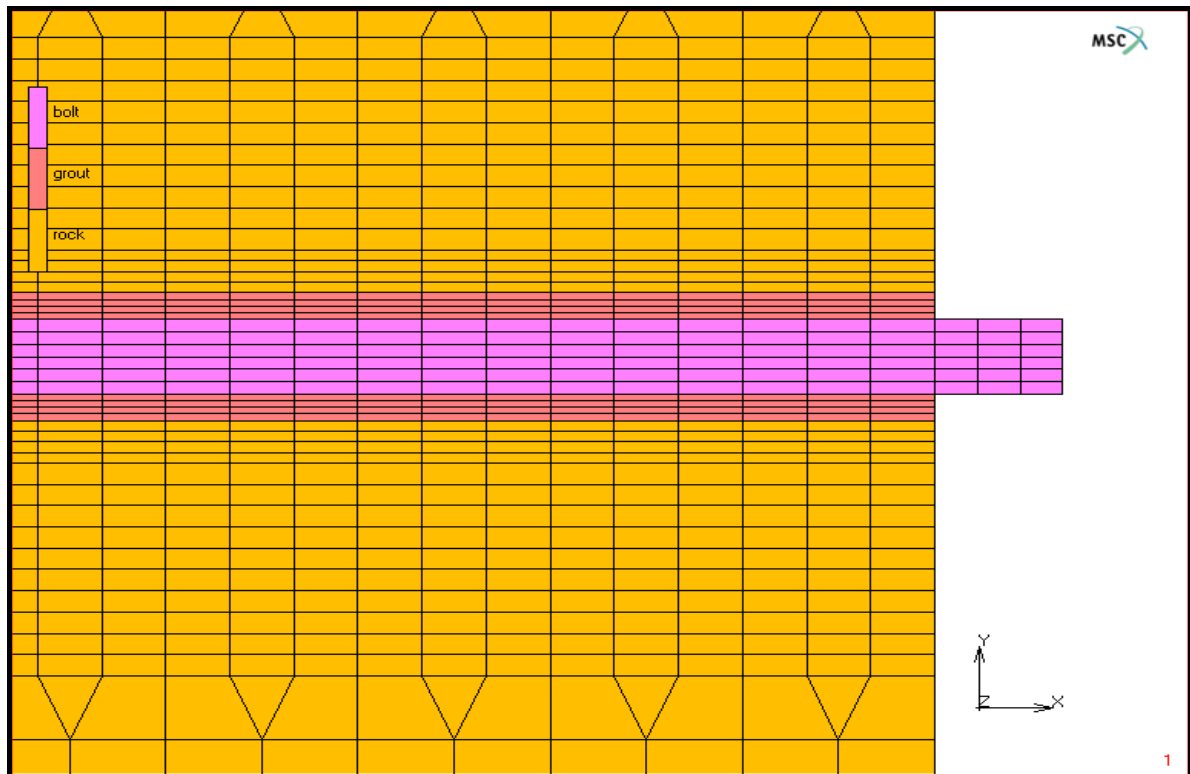


Σχήμα 6.1: Μορφή των μοντέλων

Λόγω της κλίμακας του μοντέλου δεν είναι εύκολα διακριτή η ζώνη του σκυροδέματος και η περιοχή που βρίσκεται το αγκύριο στο μοντέλο. Το Σχήμα 6.2 εστιάζει στην περιοχή κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια και έτσι διακρίνεται η ζώνη αγκύρωσης του κοχλίου.

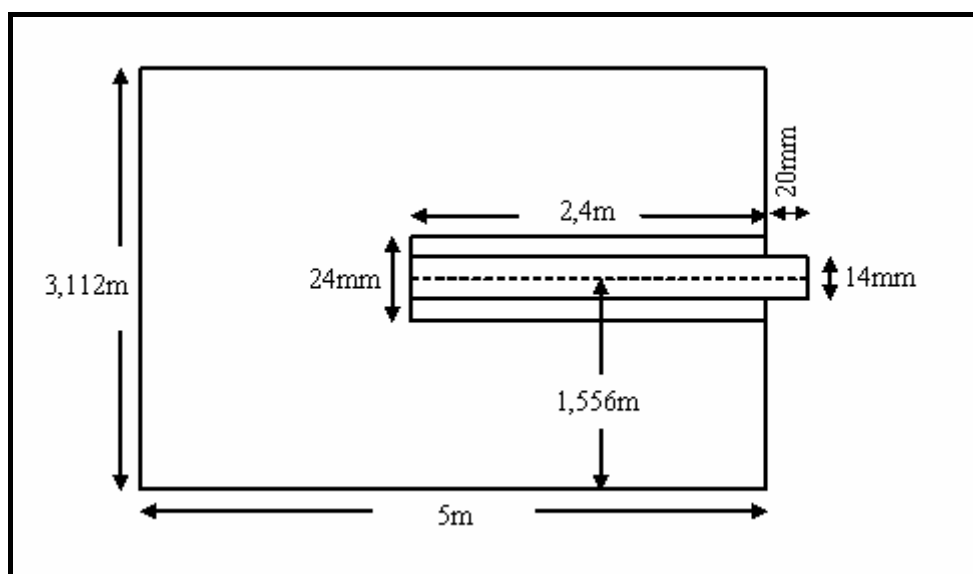
Το πρόγραμμα MARC-MENTAT δε διαθέτει δυνατότητα διαστασιολόγησης των σχημάτων γι' αυτό στα Σχήματα 6.1 και 6.2 δεν υπάρχει καταγραφή των διαστάσεων. Οι διαστάσεις των μοντέλων διακρίνονται στο Σχήμα 6.3 το οποίο όμως δεν είναι σε κλίμακα.

Το μοντέλο περιγράφει ένα ορθογωνικό τμήμα πετρώματος με μήκος 5m και πλάτος 3,556m. Στο μέσο της μικρής πλευράς του ορθογωνίου του πετρώματος υπάρχει ορθογωνικό άνοιγμα που προσομοιάζει το διάτρημα με βάθος $L_d=2,41\text{m}$ και διάμετρο $d_d=24\text{mm}$. Το αγκύριο με μήκος $L_b=2,42\text{m}$ και διάμετρο $d_b=14\text{mm}$ τοποθετείται στο κέντρο του ανοίγματος αυτού και φτάνει μέχρι βάθος 2,4m, δηλαδή στον πυθμένα του διατρήματος υπάρχει ένα κενό πάχους 10mm στο οποίο δεν υπάρχει ούτε αγκύριο ούτε τσιμέντο (Σχήμα 6.4).

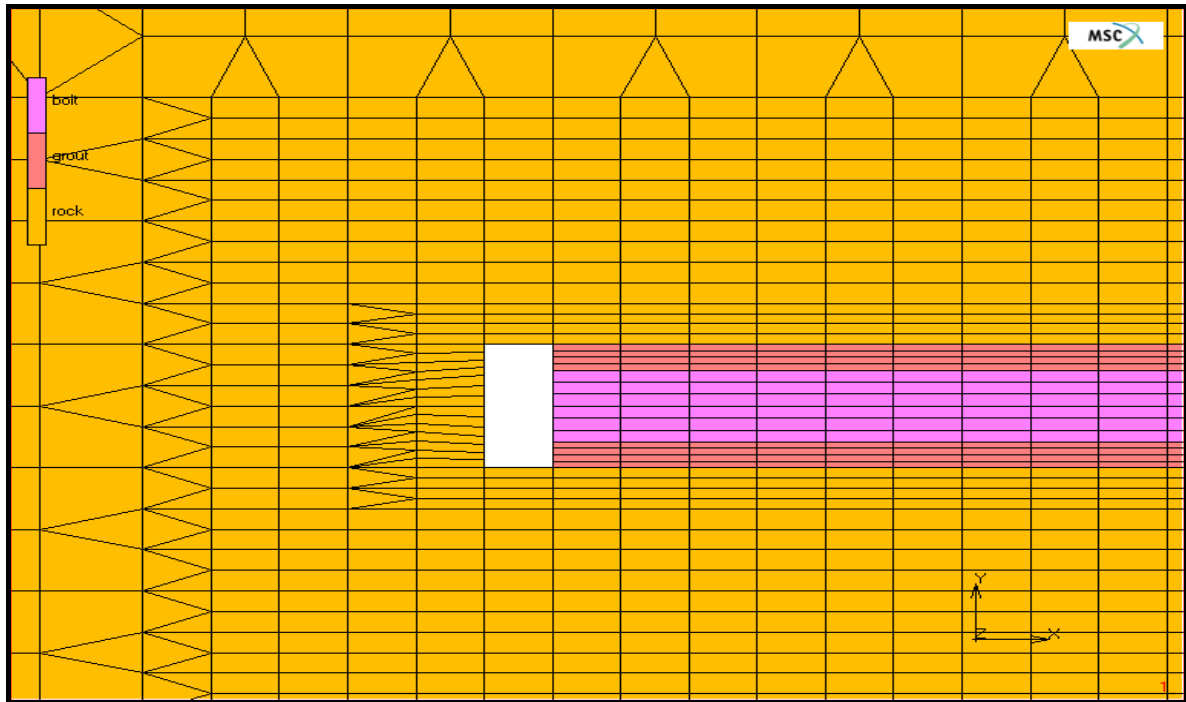


Σχήμα 6.2: Εστίαση της μορφής των μοντέλων κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια

Οι συνολικές διαστάσεις του μοντέλου (πετρώματος) επιλέχθηκαν έτσι ώστε οι ελεύθερες επιφάνειες επάνω στις οποίες θα επιδοθούν οι συνοριακές συνθήκες να απέχουν αρκετά από τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων, δηλαδή τα σημεία κοντά στο άνοιγμα όπου τοποθετείται το αγκύριο και έτσι η περιοχή που μελετάται να μην επηρεάζεται από τις συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται.



Σχήμα 6.3: Διαστάσεις των μοντέλων



Σχήμα 6.4: Εστίαση της μορφής των μοντέλων στον πυθμένα του διατρήματος

Από τη διαστασιολόγηση που περιγράφηκε παραπάνω προκύπτει άμεσα ότι ο κοινός άξονας του αγκυρίου και του διατρήματος απέχει 132mm από την άνω και κάτω επιφάνεια του μοντέλου. Επίσης από τις διαμέτρους του αγκυρίου και του ανοίγματος προκύπτει ότι η απόσταση μεταξύ του πετρώματος και του αγκυρίου έχει πλάτος 5mm από την άνω πλευρά 5mm και από την κάτω πλευρά, δηλαδή προσομοιάζει δακτύλιο πάχους 5mm περιμετρικά του κυκλικού αγκυρίου. Ο χώρος αυτός καταλαμβάνεται από το σκυρόδεμα.

Το μοντέλο κατασκευάστηκε έτσι ώστε το αγκύριο να εξέχει 20mm από το πέτρωμα ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση του περικοχλίου στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται περικόχλιο για την τάνυση του κοχλία ή στην περίπτωση του μοντέλου που δεν τοποθετείται περικόχλιο η άσκηση των δυνάμεων στο ελεύθερο τμήμα του κοχλία.

Η μοντελοποίηση με τον τρόπο αυτό, δηλαδή με την τοποθέτηση κυλίσεων στην άνω και στην κάτω επιφάνεια του μοντέλου ουσιαστικά είναι μία μοντελοποίηση επαναλαμβανόμενης συμμετρίας δηλαδή διαδοχικών ορθογωνίων πετρώματος με κοχλία στη μέση.

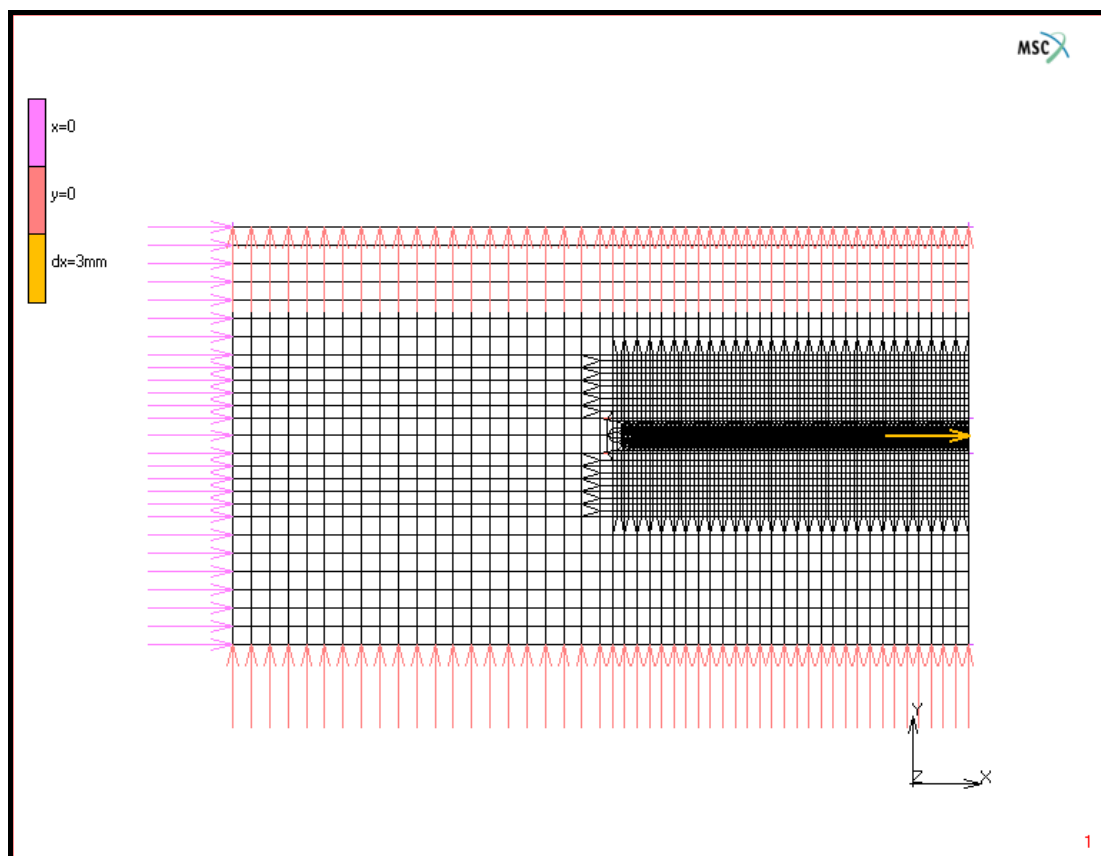
Η μοντελοποίηση σε δύο διαστάσεις γίνεται με τη θεώρηση επίπεδης παραμόρφωσης και με τη θεώρηση ότι το πάχος είναι μοναδιαίο, και στην προκειμένη περίπτωση η μοντελοποίηση αυτή δεν αναφέρεται άμεσα σε κοχλία ο οποίος εισέρχεται σε πέτρωμα αλλά κατ' επέκταση σε μεταλλική πλάκα η οποία εισέρχεται σε όγκο πετρώματος, καθώς στο μοντέλο οι διαστάσεις των στοιχείων κατά την τρίτη διάσταση είναι σταθερές.

6.3 Συνοριακές Συνθήκες και Ιδιότητες των Υλικών

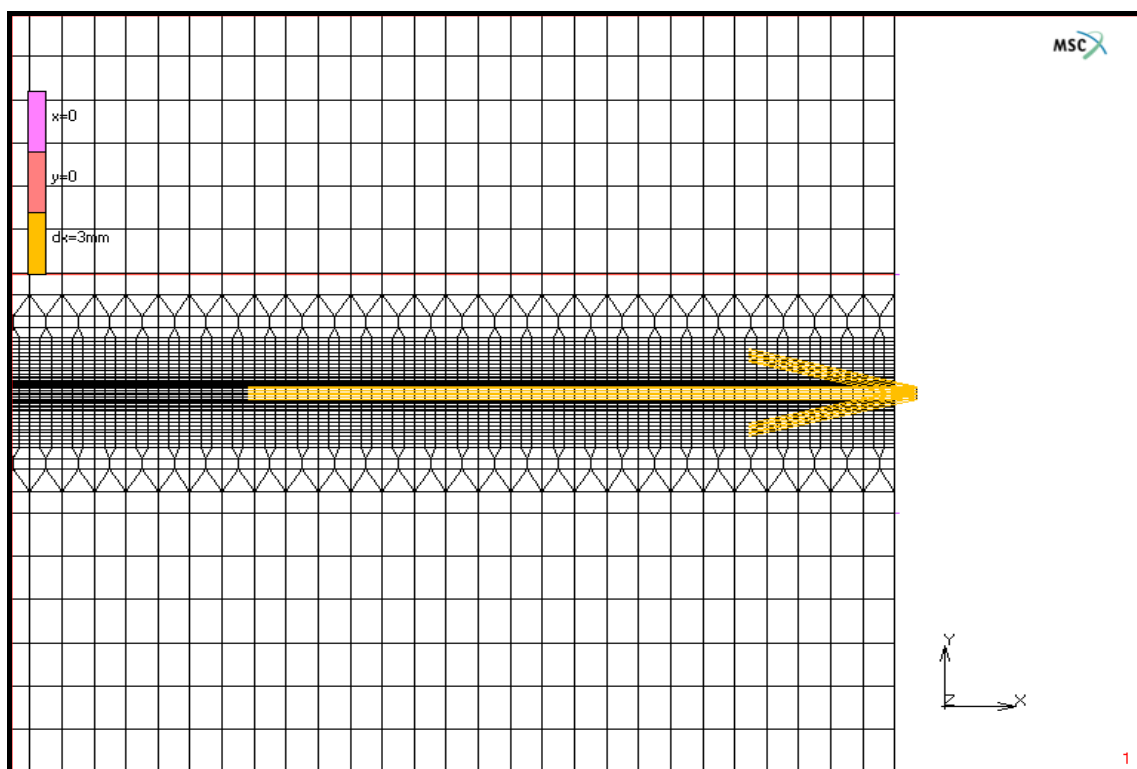
Τα μοντέλα, όπως ήδη αναφέρθηκε, περιλαμβάνουν τρία υλικά με διαφορετικές ιδιότητες: το πέτρωμα, το σκυρόδεμα (τσιμέντο) και τον χαλύβδινο κοχλία. Για κάθε υλικό θεωρούνται διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με το κάθε μοντέλο. Όμως μερικές ιδιότητες, όπως το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson ν , παραμένουν σταθερές σε όλα τα μοντέλα τα οποία εξετάζονται.

Στο πέτρωμα και στο αγκύριο εφαρμόζονται συνοριακές συνθήκες οι οποίες προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες, αλλά επίσης χρησιμεύουν και στη σταθερότητα του μοντέλου. Αντίθετα στο σκυρόδεμα δεν εφαρμόζονται συνοριακές συνθήκες αφού η μεταφορά των τάσεων και των παραμορφώσεων σε αυτό γίνεται μέσω της συνέχειας που υπάρχει μεταξύ των υλικών. Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι η σύνδεση των τριών υλικών γίνεται με συνεχή στοιχεία και όχι με στοιχεία επαφής (contact elements).

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται όλες οι συνοριακές συνθήκες οι οποίες εφαρμόζονται σε κάθε μοντέλο, ενώ το Σχήμα 6.6 δίνει μία λεπτομέρεια του τρόπου άσκησης του φορτίου στο αγκύριο το οποίο ασκείται ορίζοντας μία μετατόπιση κατά τον άξονα x και όχι ορίζοντας μία δύναμη κατά τον άξονα x .



Σχήμα 6.5: Συνοριακές συνθήκες σε ολόκληρο το μοντέλο



Σχήμα 6.6: Φόρτιση του αγκυρίου με έλεγχο μετατόπισης

Ο λόγος για τον οποίο η φόρτιση γίνεται με άσκηση μετατόπισης και όχι με άσκηση φορτίου είναι για να μπορούν να ανταποκριθούν τα μοντέλα σε ελαστοπλαστικά κριτήρια αστοχίας τα οποία δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσουν κάτω από καθεστώς άσκησης φορτίων.

Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι επιλέχθηκε να μην γίνει χρήση στοιχείων επαφής για τις περιοχές της διεπιφάνειας ανάμεσα στο τσιμέντο και το χάλυβα και επίσης στη διεπιφάνεια ανάμεσα στο τσιμέντο και το πέτρωμα θεωρώντας ότι η τραχύτητα των επιφανειών συγκόλλησης είναι ικανή να δημιουργήσει καλή πρόσφυση μεταξύ των τριών αυτών υλικών. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια των συνήθων κοχλιών αγκύρωσης διαθέτει ραβδώσεις οι οποίες αυξάνουν την επιφάνεια πρόσφυσης με το συγκολλητικό υλικό. Ακόμη, η βραχώδης κυλινδρική επιφάνεια του διατρήματος έχει αρκετή τραχύτητα ώστε η συνοχή της στην επαφή με το εισπιεζόμενο ένεμα να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα.

Για την επίλυση των προβλημάτων το πέτρωμα και το αγκύριο θεωρούνται ελαστικά, ομογενή και ισότροπα υλικά. Το σκυρόδεμα σε μία σειρά μοντέλων θεωρείται ομογενές, ισότροπο και ελαστικό υλικό, ενώ σε μία δεύτερη σειρά μοντέλων θεωρείται σαν ομογενές, ισότροπο και ελαστοπλαστικό υλικό.

Το πέτρωμα σαν ελαστικό υλικό έχει μόνο δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες, το μέτρο ελαστικότητας E και το λόγο Poisson ν . Έτσι σε όλα τα προβλήματα που εξετάζονται το

πέτρωμα θεωρείται ότι έχει μέτρο ελαστικότητας 15GPa και λόγο Poisson 0.25. Το χαλύβδινο αγκύριο θεωρείται ότι έχει μέτρο ελαστικότητας ίσο με 210GPa και λόγο Poisson ίσο με 0,30. Οι αντίστοιχες ιδιότητες για το τσιμέντο θεωρούνται ότι είναι: μέτρο ελαστικότητας 4,5GPa και λόγος Poisson 0,20.

Στις περιπτώσεις όπου το τσιμέντο θεωρείται ως ελαστοπλαστικό υλικό επιπλέον λαμβάνονται υπόψη η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού η οποία μεταβάλλεται παραμετρικά μεταξύ 30 και 40° και η αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη (από την οποία έμμεσα προκύπτει η τάση διαρροής) και η οποία μεταβάλλεται από 10 σε 15 και 25 MPa για κάθε περίπτωση γωνίας εσωτερικής τριβής. Η συνοχή του τσιμέντου η οποία χρησιμοποιείται στα αντίστοιχα ελαστοπλαστικά κριτήρια αστοχίας προκύπτει σαν συνδυασμός των ιδιοτήτων της γωνίας εσωτερικής τριβής και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Οι συνοριακές συνθήκες σε όλα τα μοντέλα παραμένουν σταθερές, εκτός από το φορτίο που εφαρμόζεται στο αγκύριο το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τις ιδιότητες του σκυροδέματος και τις απαιτήσεις του κάθε μοντέλου. Για παράδειγμα για να αστοχήσει το σκυρόδεμα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 15MPa απαιτείται μεγαλύτερη τάση στο αγκύριο από ότι όταν η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη είναι 10MPa.

Στα μοντέλα για τα οποία το τσιμέντο θεωρείται ελαστοπλαστικό υλικό διερευνώνται τα αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές φορτίσεις και αντίστοιχα προσαρμόζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του υλικού. Το φορτίο ασκείται με έλεγχο μετατόπισης σε 40 βήματα και είναι: α) συνολική μετατόπιση $\Delta x=3\text{mm}$ για τα δοκίμια με τσιμέντο συνοχής $C_0=10\text{MPa}$, β) συνολική μετατόπιση $\Delta x=4\text{mm}$ για τα δοκίμια με τσιμέντο συνοχής $C_0=15\text{MPa}$ και γ) συνολική μετατόπιση $\Delta x=5\text{mm}$ για τα δοκίμια με τσιμέντο συνοχής $C_0=25\text{MPa}$.

Τα ελαστοπλαστικά μοντέλα συμπεριφοράς του τσιμέντου είναι αυτά τα οποία θεωρούν την περίπτωση της αστοχίας. Στα ελαστικά μοντέλα δεν εξετάζεται η περίπτωση της αστοχίας απλά εξετάζεται η μεταφορά τάσεων από το ένα υλικό στο άλλο. Επειδή τα πιο ρεαλιστικά μοντέλα είναι αυτά τα οποία εξετάζουν την αστοχία παρακάτω θα δοθεί έμφαση στα μοντέλα αυτά.

Συνδυάζοντας τις τιμές όλων των προηγούμενων ιδιοτήτων του τσιμέντου προκύπτουν έξι διαφορετικά περιπτώσεις μοντέλα των οποίων οι ιδιότητες παρατίθενται στον Πίνακα 6.1. Στον ίδιο πίνακα επίσης φαίνεται και το φορτίο που επιβάλλεται στο αγκύριο σε κάθε μοντέλο.

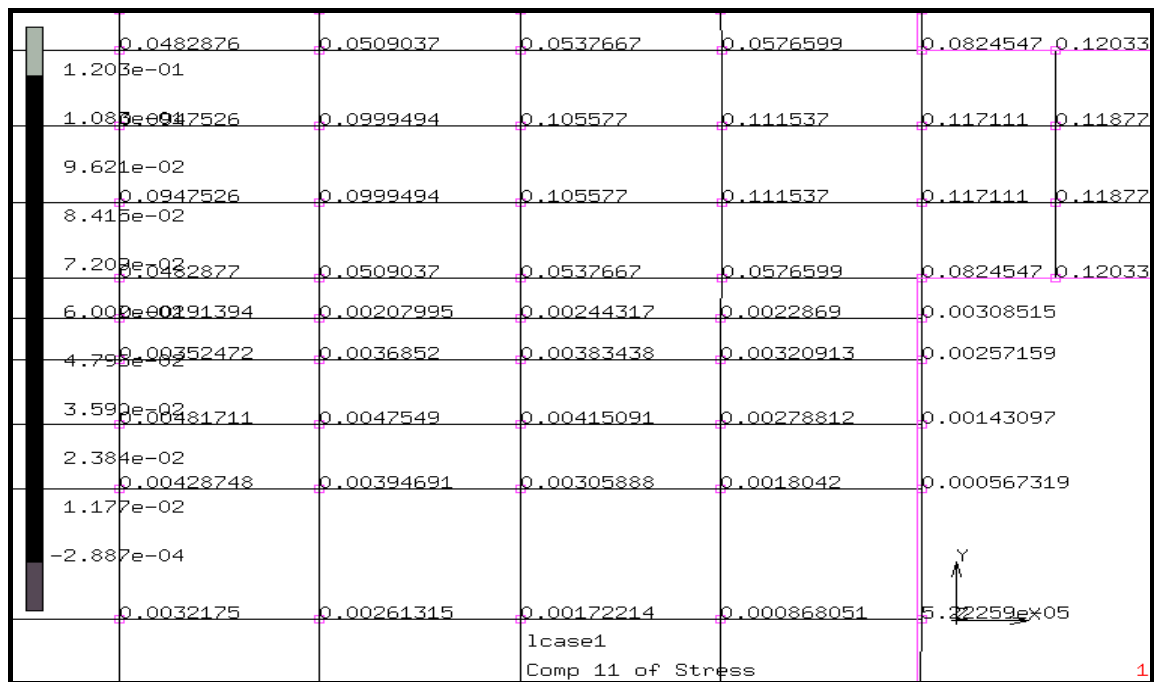
Πίνακας 6.1: Ιδιότητες του τσιμέντου στα μοντέλα

	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson	Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (MPa)	Γωνία Εσωτερικής Τριβής (^ο)	Φορτίο με έλεγχο μετατόπισης (mm)
Μοντέλο 1	4.5	0.2	10	30	3
Μοντέλο 2	4.5	0.2	15	30	4
Μοντέλο 3	4.5	0.2	25	30	5
Μοντέλο 4	4.5	0.2	10	40	3
Μοντέλο 5	4.5	0.2	15	40	4
Μοντέλο 6	4.5	0.2	25	40	5

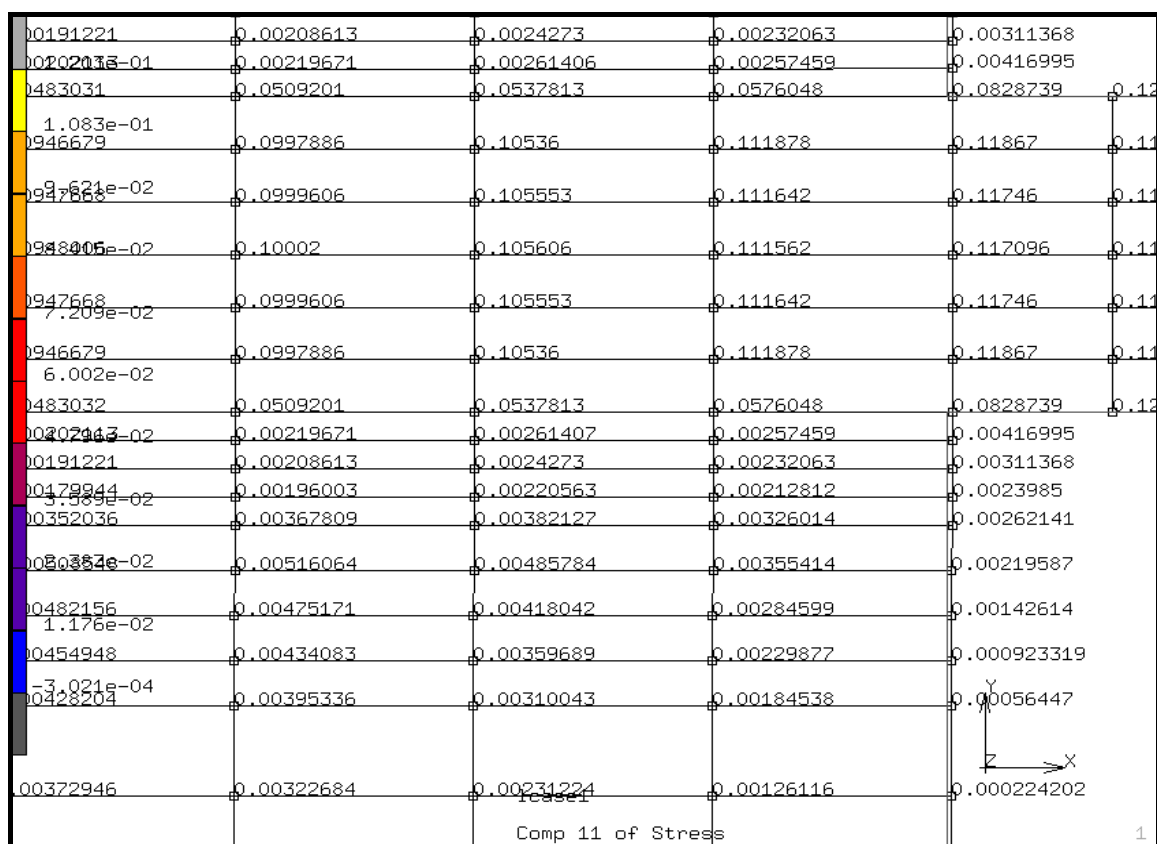
6.4 Ο Ρόλος της Διακριτοποίησης

Ο ρόλος της διακριτοποίησης ιδιαίτερα στις περιοχές όπου αναμένονται απότομες αλλαγές στην εντατική κατάσταση ή στην παραμορφωσιακή κατάσταση είναι πολύ σημαντικός. Πυκνότερη διακριτοποίηση επιτρέπει την καλύτερη απόδοση του φαινομένου στα σημεία αυτά. Δημιουργήθηκαν μοντέλα με πυκνή και αραιή διακριτοποίηση όσον αφορά την περιοχή που εισέρχεται το τσιμεντένεμα και τελικά επιλέχθηκε το μοντέλο με την πυκνότερη διακριτοποίηση. Τα δύο μοντέλα φαίνονται στα Σχήματα 6.7 και 6.8.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται το μοντέλο με την πυκνότερη διακριτοποίηση στη ζώνη του τσιμέντου. Τα στοιχεία που απαρτίζουν τη ζώνη αυτή είναι ορθογωνικά αλλά ο λόγος των δύο πλευρών είναι μεγαλύτερος του 1/4, ο οποίος θεωρείται ένας καλός λόγος για την ευστάθεια των αριθμητικών λύσεων, παρ' όλα αυτά επιλέχθηκε συνειδητά η χρήση τέτοιων στοιχείων ώστε να προκύψουν περισσότεροι κόμβοι στη ζώνη του τσιμέντου όπου εμφανίζεται απότομη μεταβολή των τάσεων και η ύπαρξη των πλαστικών φαινομένων.



Σχήμα 6.7: Τιμές οριζόντιας τάσης με την αραιή διακριτοποίηση στο αγκύριο και στο τσιμέντο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια



Σχήμα 6.8: Τιμές οριζόντιας τάσης με την πυκνή διακριτοποίηση στο αγκύριο και στο τσιμέντο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια

6.5 Επιλογή του Κριτηρίου Αστοχίας

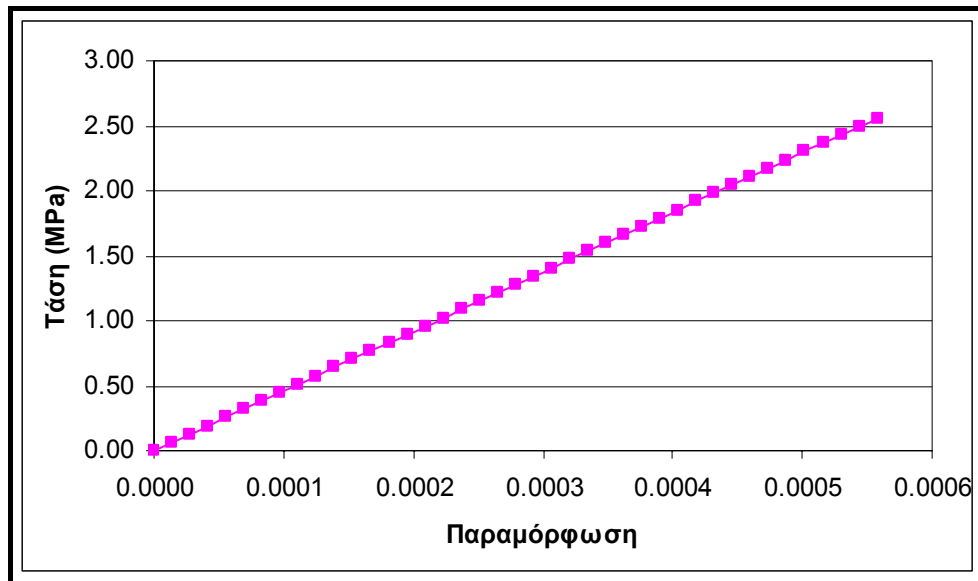
Υπάρχει πληθώρα κριτηρίων αστοχίας τα οποία μπορούν να προσομοιάσουν τη συμπεριφορά υλικών όπως το τσιμέντο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχτηκε η εφαρμογή του παραβολικού κριτηρίου Mohr-Coulomb. Το κριτήριο αυτό παρουσιάζεται ως παραβολή σε γραφήματα με άξονες Διατμητικής Τάσης–Ορθής Τάσης. Ενδεχομένως θα μπορούσε να διερευνηθεί η χρήση ενός κριτηρίου von Mises–Tresca η ακόμα και κριτηρίων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε αστοχίες πετρωμάτων, όπως το κριτήριο Hoek – Brown. Το πλεονέκτημα της χρήσης των κριτηρίων Mohr-Coulomb είναι ότι βασίζονται σε δύο πολύ γνωστές ιδιότητες των πετρωμάτων όπως είναι η συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής ή εναλλακτικά η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η γωνία εσωτερικής τριβής. Αντίθετα τα άλλα κριτήρια βασίζονται σε παραμέτρους οι οποίες δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν για την περίπτωση του σκυροδέματος.

Μεταξύ του γραμμικού και του παραβολικού κριτηρίου Mohr-Coulomb, επιλέχτηκε η εφαρμογή του παραβολικού. Όπως προκύπτει από το πέμπτο κεφάλαιο το παραβολικό κριτήριο Mohr-Coulomb εμφανίζεται να έχει πιο ομαλές μεταβολές των τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων από ότι έχει το γραμμικό κριτήριο στην περιοχή μετάβασης στον πλαστικό κλάδο. Επίσης, ο πλαστικός κλάδος δεν μεταβάλλεται με την μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η γωνία εσωτερικής τριβής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων που εισάγονται στο πρόγραμμα MARC δεν σχετίζεται με την πραγματική γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

6.6 Εφαρμογή του Κριτηρίου Αστοχίας

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εφαρμογής των παραπάνω συνοριακών συνθηκών και παραμέτρων των υλικών στα μοντέλα γίνεται μέσω διαφόρων διαγραμμάτων όπως: Διατμητικής Τάση - Ορθής Τάσης, Τάσης – Παραμόρφωσης, κυρίων τάσεων σ_1 - σ_2 ακόμα και Διατμητικής Τάσης – Μετατόπισης ανάλογα με την περίπτωση. Τα διαγράμματα αυτά κατασκευάζονται για συγκεκριμένα στοιχεία εντός της περιοχής του ενέματος και επίσης κατασκευάζονται λαμβάνοντας ένα σημείο ανά βήμα φόρτισης.

Για την επιβεβαίωση της ορθότητας του μοντέλου κατασκευάζεται διάγραμμα σ - ϵ για το τσιμέντο που θεωρείται ελαστικό υλικό. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9 η απόκριση του τσιμέντου είναι η αναμενόμενη αφού πρόκειται για ελαστικό υλικό. Λόγω αυτού προκύπτει ότι οι συνοριακές συνθήκες, η διακριτοποίηση, οι ιδιότητες των υλικών καθώς και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του μοντέλου είναι σωστές.

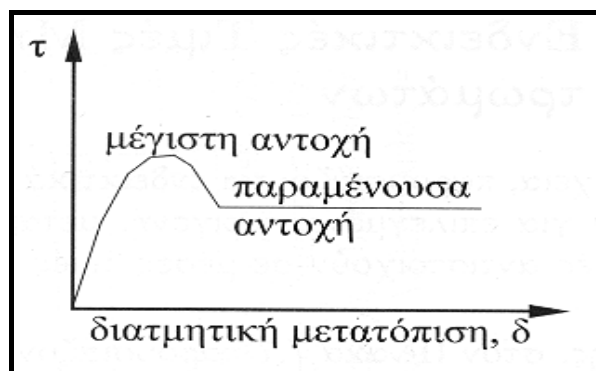


Σχήμα 6.9: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το τσιμέντο που θεωρείται ελαστικό.

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του τσιμέντου εξετάζονται τρεις παράμετροι που την επηρεάζουν. Αυτοί είναι:

1. η απόσταση του σημείου που εξετάζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του τσιμέντου,
2. η αντοχή του τσιμέντου σε μονοαξονική θλίψη και
3. η γωνία εσωτερικής τριβής του τσιμέντου (η γωνία εσωτερικής τριβής που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας δεν σχετίζεται με την πραγματική γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού).

Σύμφωνα με τις αρχικές συνθήκες που επικρατούν στο μοντέλο πιθανότατα θα υπάρξει αστοχία του τσιμέντου σε διάτμηση. Για την αστοχία σε διάτμηση η τυπική καμπύλη της συμπεριφοράς του υλικού δίνεται σε διάγραμμα με άξονες Διατμητικής Τάσης-Μετατόπισης (Σχήμα 6.10). Για τους δύο αυτούς λόγους τα αποτελέσματα ερμηνεύονται μέσω γραφημάτων με άξονες Διατμητικής Τάσης-Μετατόπισης.



Σχήμα 6.10: Τυπικό διάγραμμα διατμητικής τάσης κατά τη δοκιμή σε διάτμηση
(Αγιουτάντης, 2002)

Για ένα επιπλέον έλεγχο σε όλες τις περιπτώσεις που φαίνεται να υπάρχει αστοχία του υλικού πραγματοποιείται σύγκριση με το γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb μέσω του λογισμικού προγράμματος “RockWin” (Σειραδάκης, 2003). Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται για την εντατική κατάσταση του σημείου τη στιγμή της αστοχίας.

6.6.1 Απόκριση των Μοντέλων ως Συνάρτηση της Απόστασης από την Επιφάνεια Όρυξης του Διατρήματος

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του τσιμέντου σε σχέση με την απόσταση από το άνοιγμα του διατρήματος επιλέγονται να εξετασθούν τέσσερα σημεία τα οποία απέχουν 54, 108, 162 και 216cm από το άνοιγμα (το αγκύριο έχει μήκος 242cm).

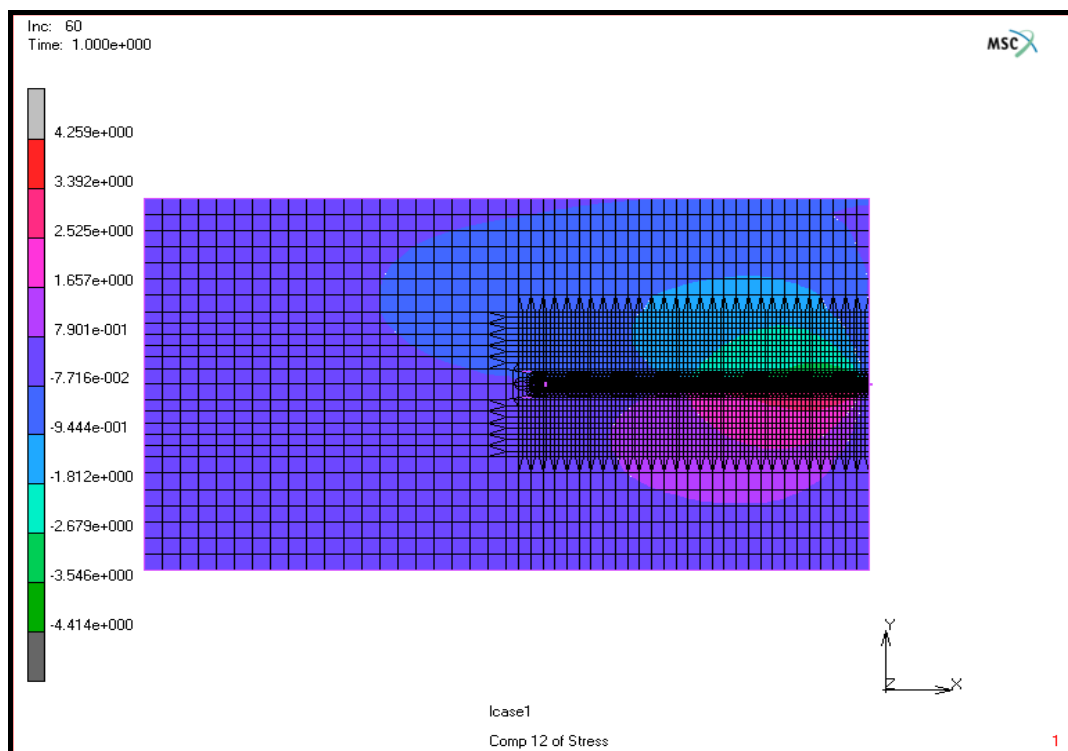
Στις περιπτώσεις υποστήριξης με κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης με συγκολλητική ύλη το τσιμέντο, παρατηρείται ότι η αστοχία του τσιμέντου συμβαίνει κοντά στην επιφάνεια επαφής του τσιμέντου με το αγκύριο. Για το λόγο αυτό τα σημεία που εξετάζονται βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια αυτή.

Το πρώτο σημείο επιλέγεται έτσι ώστε να είναι πολύ κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια αλλά όχι πάνω σε αυτή. Το σημείο αυτό δεν επιλέγεται πάνω στην επιφάνεια του ανοίγματος γιατί στην επιφάνεια αυτή οι τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες. Το δεύτερο και το τρίτο σημείο επιλέγονται έτσι ώστε να βρίσκονται γύρω από το μέσο του μήκους του αγκυρίου και το τέταρτο σημείο επιλέχθηκε να είναι κοντά στον πυθμένα του διατρήματος.

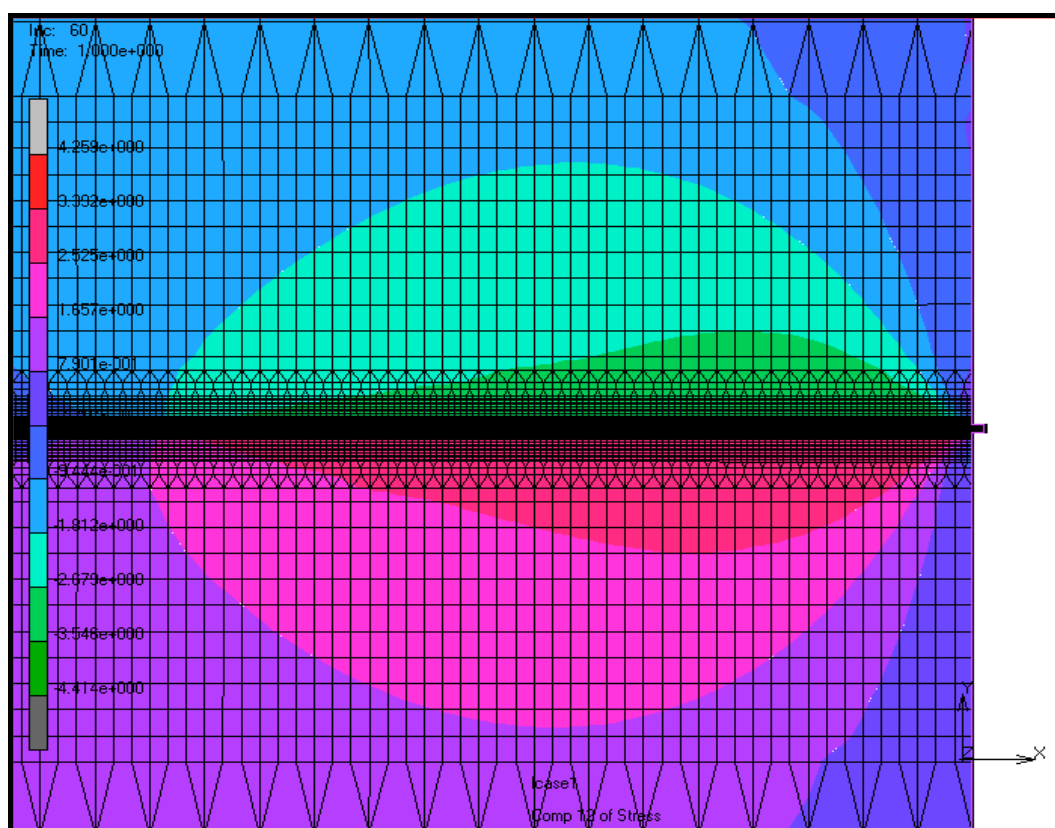
Στο Σχήμα 6.11 φαίνονται μέσω ισότιμων καμπυλών οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται σε ολόκληρο το μοντέλο ενώ στο Σχήμα 6.12 φαίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες για την περιοχή κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια η οποία συγκεντρώνει και τις μεγαλύτερες τάσεις.

Η συμπεριφορά του τσιμέντου, σε σχέση με την απόσταση αυτή, εξετάζεται για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των ιδιοτήτων του τσιμέντου όταν μεταβάλλεται η γωνία εσωτερικής τριβής και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Προκύπτει λοιπόν μία σειρά διαγραμμάτων στα οποία φαίνεται η απόκριση του τσιμέντου σαν συνάρτηση της απόστασης για κάθε συνδυασμό της γωνίας εσωτερικής τριβής και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

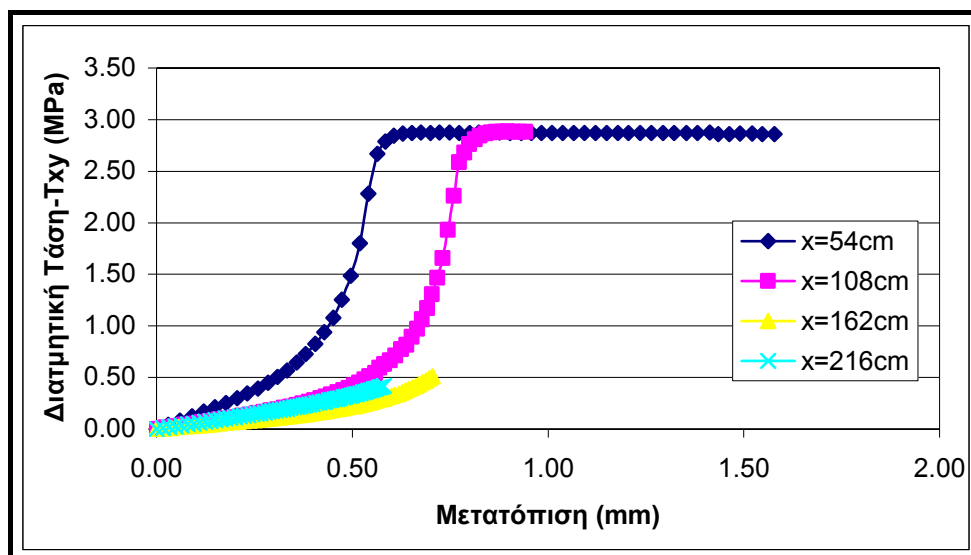
Στο Σχήμα 6.12 φαίνονται οι καμπύλες για τα τέσσερα σημεία του μοντέλου με τσιμέντο που έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10MPa και γωνία εσωτερικής τριβής 30°. Αντίστοιχα είναι τα διαγράμματα και για τους υπόλοιπους συνδυασμούς τιμών των ιδιοτήτων αυτών.



Σχήμα 6.11: Ισότιμες καμπύλες της κατανομής της διατμητικής τάσης στο μοντέλο

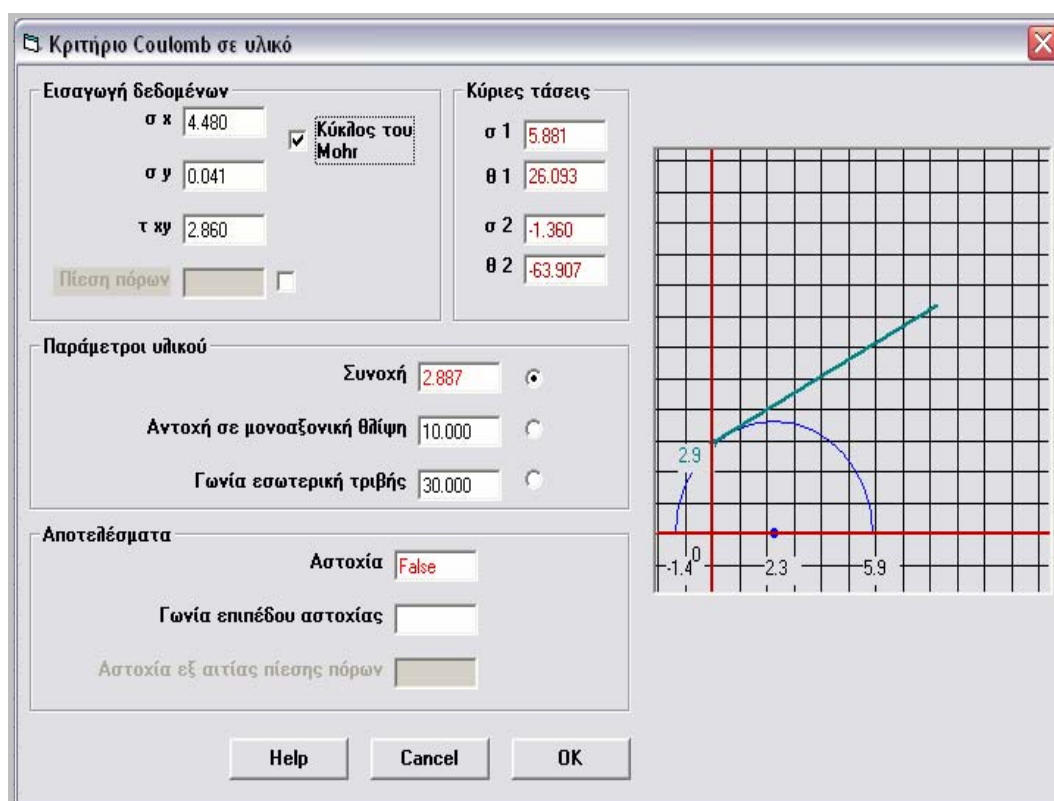


Σχήμα 6.12: Ισότιμες καμπύλες της κατανομής της διατμητικής τάσης στην ζώνη γύρω από το αγκύριο και κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια

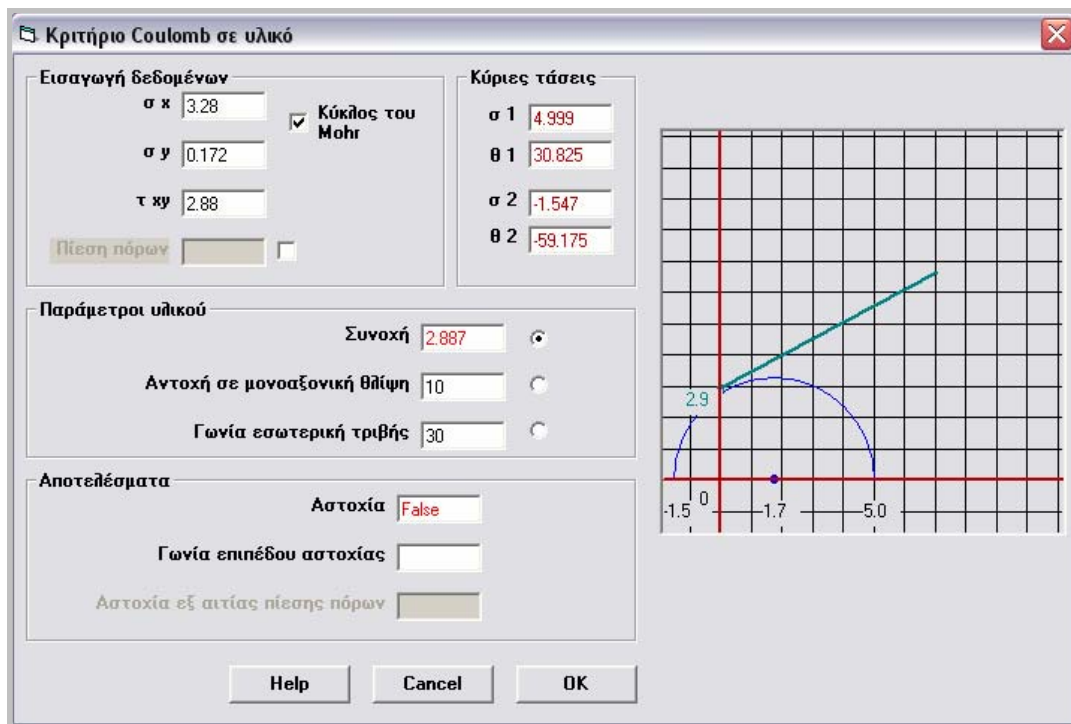


Σχήμα 6.13: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης για τσιμέντο με $\phi=30^\circ$ και $C_o=10\text{MPa}$

Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται ότι το τσιμέντο αστοχεί στα σημεία που απέχουν 54 και 108cm. Στις αποστάσεις 162 και 216cm δεν υπάρχει αστοχία. Για τα σημεία που αστοχούν γίνεται επαλήθευση με το πρόγραμμα RockWin (Σχήμα 6.14 και 6.15).



Σχήμα 6.14: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και $C_o=10\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια

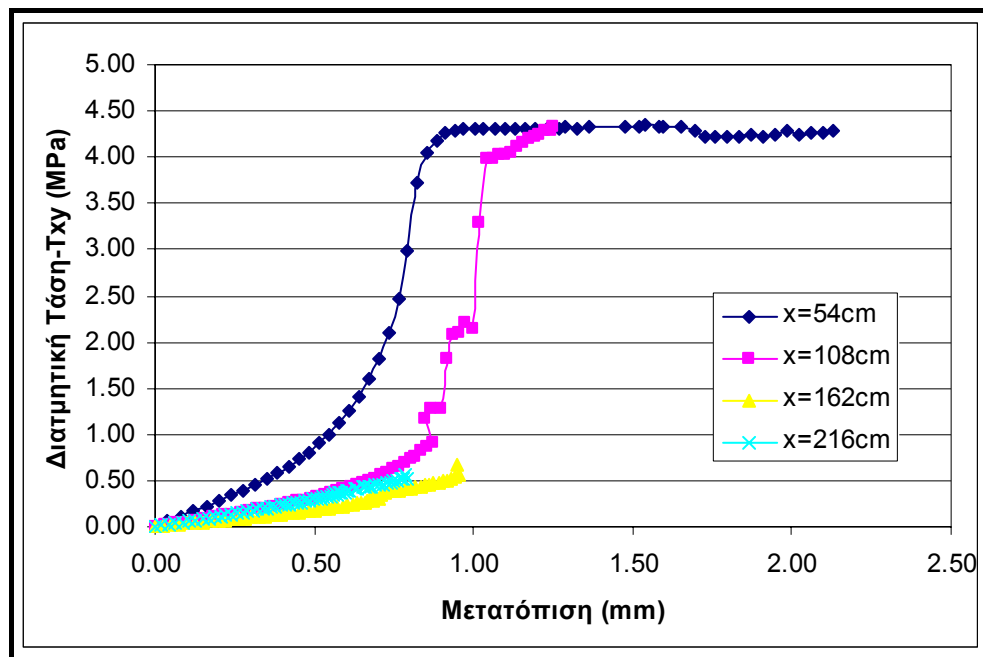


Σχήμα 6.15: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και $C_0=10\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 108cm από την επιφάνεια

Στα Σχήματα 6.14 και 6.15 φαίνεται να μην υπάρχει αστοχία του τσιμέντου στα συγκεκριμένα σημεία και για τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση. Η ασυμφωνία αυτή με το Σχήμα 6.11 δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι τιμές των τάσεων που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα RockWin είναι οι τιμές που επικρατούν στο τσιμέντο ένα βήμα πριν από την αστοχία. Η αστοχία στο υλικό επέρχεται λίγο μετά από αυτό το βήμα και πριν από το επόμενο βήμα. Δηλαδή εάν η αστοχία με το πρόγραμμα MARC-MENTAT συμβαίνει μεταξύ των βημάτων n και $n+1$ δεν είναι δυνατόν να υπάρξουν τιμές των τάσεων ακριβώς τη στιγμή τις αστοχίας. Έτσι επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα RockWin οι τιμές που προκύπτουν από το πρόγραμμα MARC-MENTAT το τελευταίο βήμα πριν από την αστοχία.

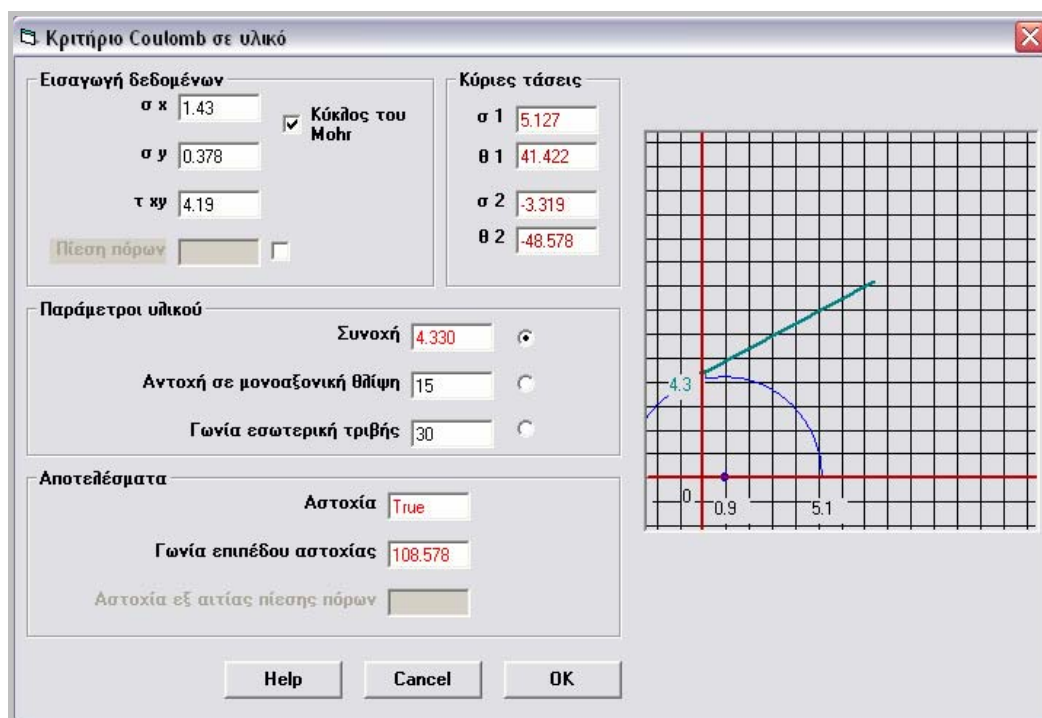
Παρατηρώντας τον κύκλο του Mohr την γραμμή αστοχίας Coulomb στο Σχήμα 6.14 φαίνεται ότι είναι πολύ κοντά. Με μικρή αύξηση των τιμών των τάσεων θα επέλθει αστοχία. Επομένως είναι σωστό να θεωρείται ότι και με το πρόγραμμα RockWin το υλικό φαίνεται να αστοχεί στο συγκεκριμένο σημείο για την συγκεκριμένη εντατική κατάσταση.

Στο Σχήμα 6.16 φαίνονται οι καμπύλες για τα τέσσερα σημεία του τσιμέντου που έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 15MPa και γωνία εσωτερικής τριβής 30° . Συγκρίνοντας το Σχήμα 6.17 με το Σχήμα 6.14 παρατηρούνται αρκετές ομοιότητες μεταξύ των συμπεριφορών του υλικού.

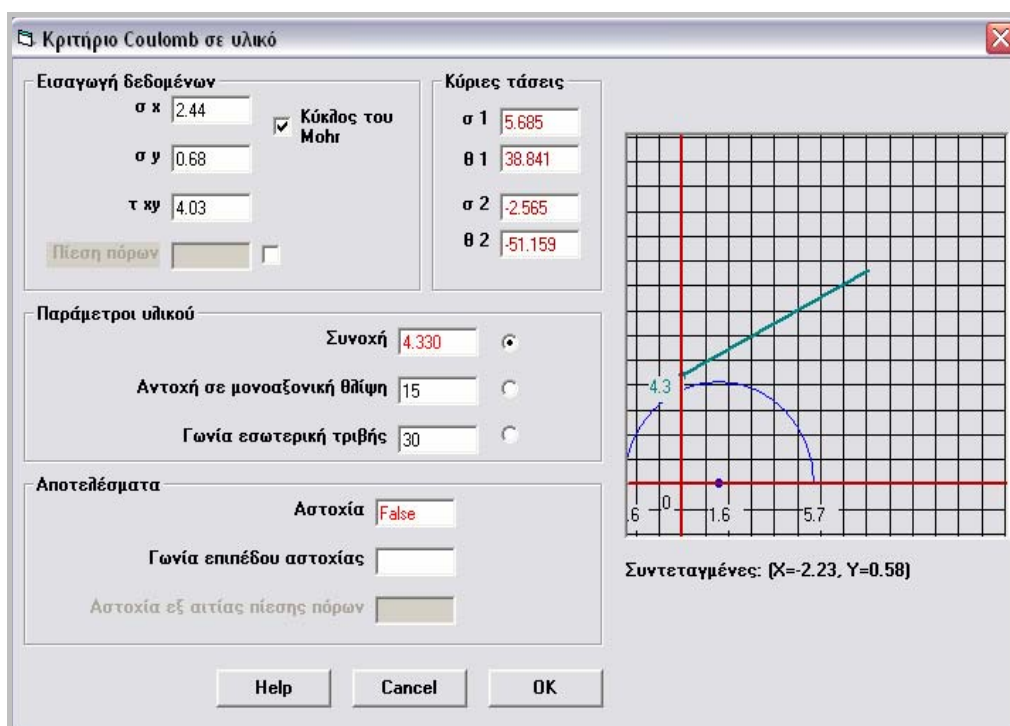


Σχήμα 6.16: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης για τσιμέντο με $\phi=30^\circ$ και $C_0=15\text{MPa}$

Στο Σχήμα 6.16 φαίνεται το τσιμέντο να αστοχεί σε δύο σημεία. Κρίνεται επομένως απαραίτητο να γίνει η σύγκριση με τη δεύτερη μέθοδο για την αστοχία στα σημεία αυτά. (Σχήμα 6.17 και 6.18)



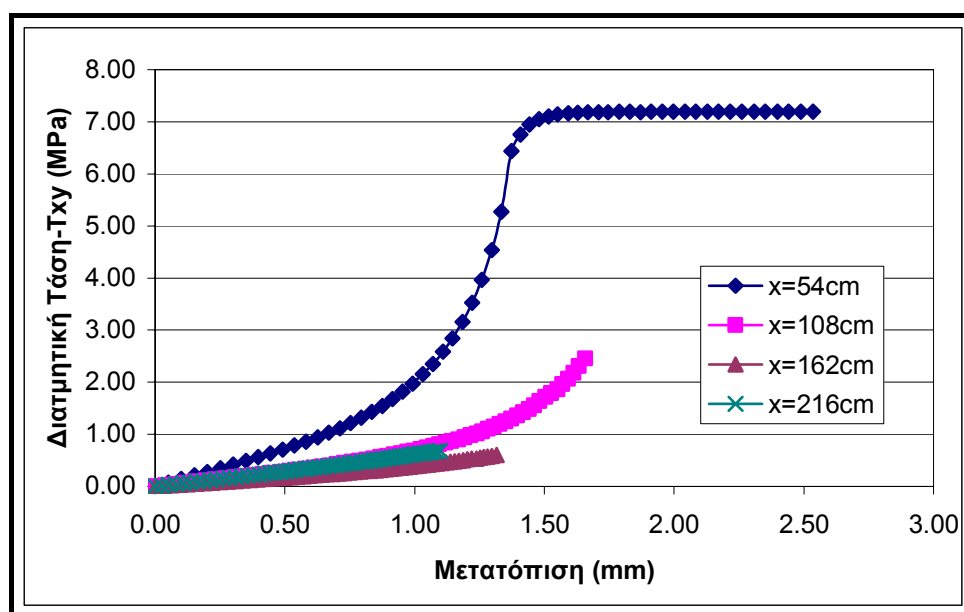
Σχήμα 6.17: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και $C_0=15\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια



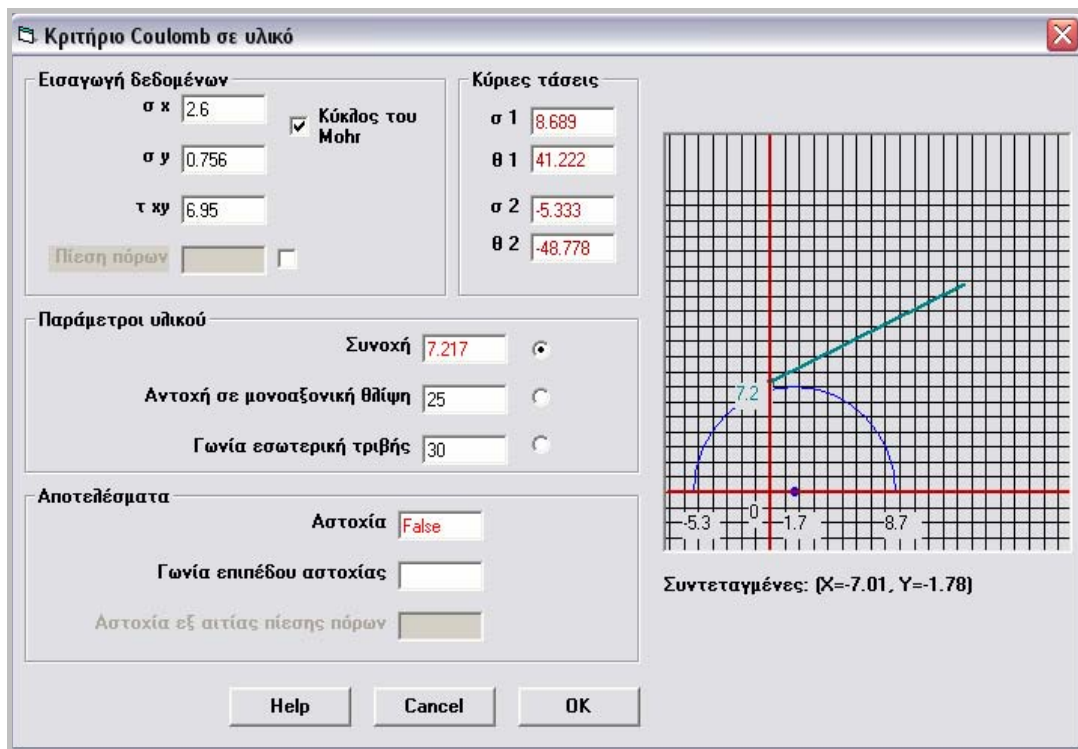
Σχήμα 6.18: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και $C_0=15\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 108cm από την επιφάνεια

Η παρατήρηση που έγινε για τα σχήματα 6.14 και 6.15 ισχύει και για τα σχήματα 6.17 και 6.18. Άρα και σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ταυτίζονται.

Η επόμενη περίπτωση είναι για τσιμέντο με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 25MPa και γωνία εσωτερικής τριβής 30° (Σχήμα 6.19).



Σχήμα 6.19: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης για τσιμέντο με $\phi=30^\circ$ και $C_0=25\text{MPa}$

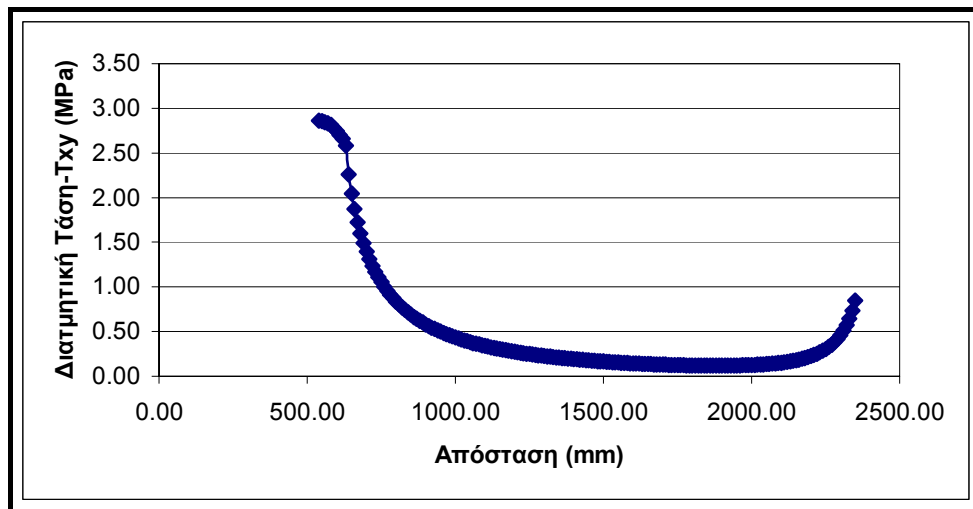


Σχήμα 6.20: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και $C_0=25\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια

Από το Σχήμα 6.19 φαίνεται ότι όταν το τσιμέντο έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 25MPa η αστοχία συμβαίνει μόνο στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια. Η αστοχία αυτή επαληθεύεται και με τη δεύτερη μέθοδο, με την παρατήρηση που ισχύει για τα Σχήματα 6.14 6.15 να ισχύει και για το Σχήμα 6.20.

Από τα σχήματα 6.13, 6.16 και 6.29 φαίνεται ότι η αστοχία συμβαίνει στα σημεία που είναι κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Όσο η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια αυξάνεται τόσο μικραίνουν οι πιθανότητες αστοχίας του υλικού. Με βάση αυτά τα σχήματα προκύπτει ότι με την αύξηση της μετατόπισης αυξάνεται και η διατμητική τάση που δέχεται το τσιμέντο σε όλα τα σημεία. Στο σημείο που είναι κοντά στην επιφάνεια η τάση φτάνει στο σημείο διαρροής ενώ στα υπόλοιπα σημεία η τάση παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα. Από εκεί και πέρα το σημείο το οποίο έχει αστοχήσει συνεχίζει να διατηρεί την παραμένουσα αντοχή του και έτσι η μετατόπιση συνεχίζει να αυξάνεται. Συνεχίζοντας την αύξηση της μετατόπισης αυξάνεται και η τάση στα σημεία που δεν έχουν αστοχήσει και έτσι αστοχούν και τα υπόλοιπα σημεία.

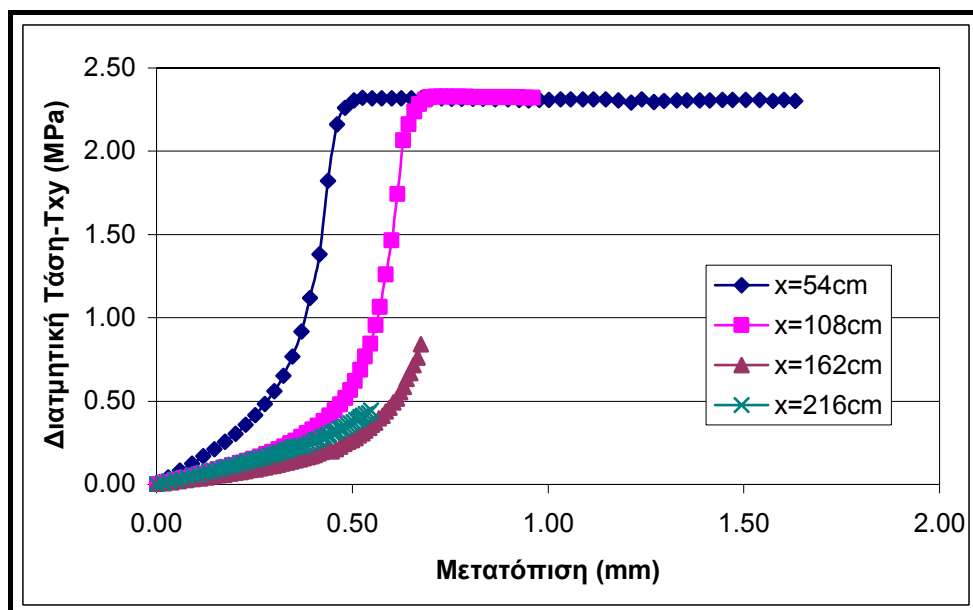
Στο Σχήμα 6.21 φαίνονται οι τιμές των διατμητικών τάσεων σε σχέση με την απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια. Οι τιμές των τάσεων αυτών ισχύουν για τα αντίστοιχα σημεία τη στιγμή που αστοχεί το πρώτο σημείο.



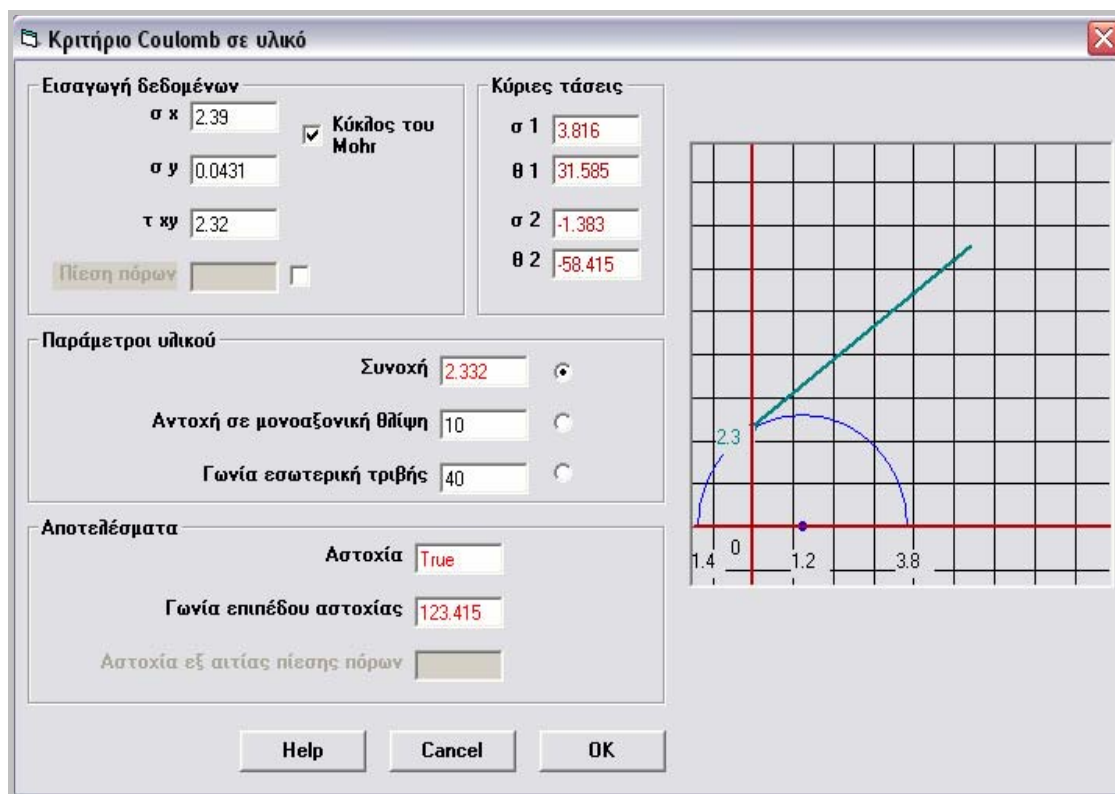
Σχήμα 6.21: Διατμητική τάση που δέχεται το τσιμέντο σε σχέση με την απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια τη στιγμή που αστοχεί το σημείο που απέχει 54cm

Από το Σχήμα 6.21 αλλά και από τα σχήματα 6.13, 6.16 και 6.29 φαίνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια οι τάσεις που δέχονται τα αντίστοιχα σημεία μειώνονται. Όμως τα σημεία κοντά στον πυθμένα του διατρήματος δέχονται τάσεις μεγαλύτερες από το αναμενόμενο. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στον σχεδιασμό των μοντέλων αφού στον πυθμένα του διατρήματος δεν υπάρχουν υλικά.

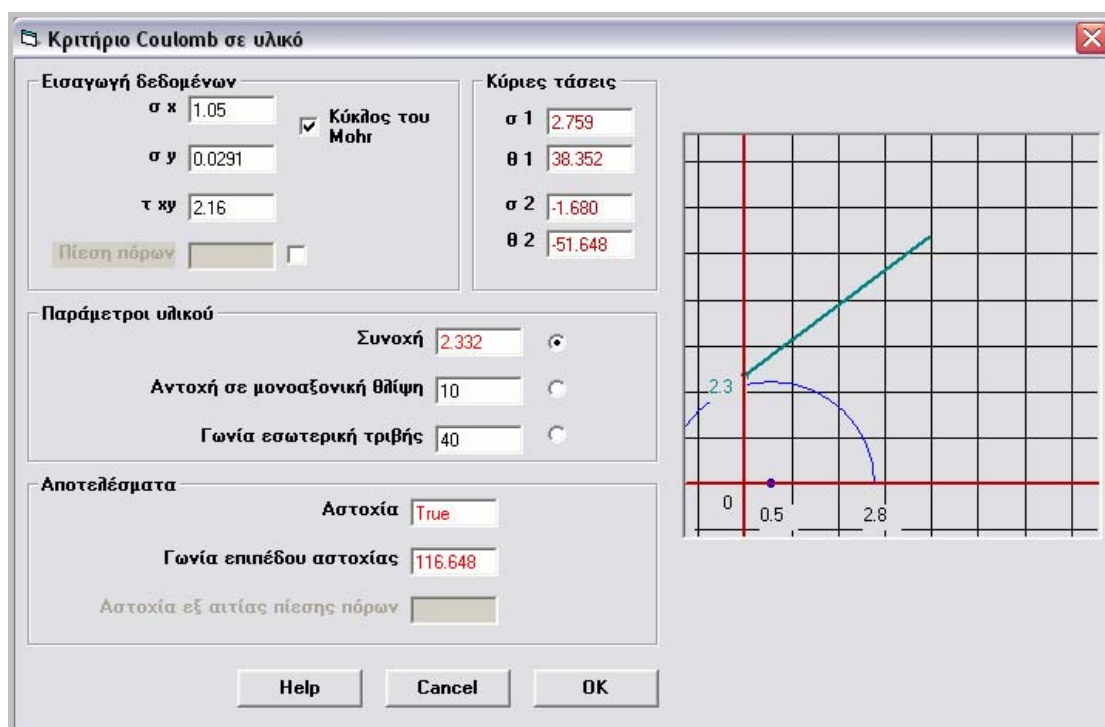
Όπως παρατηρείται τα σχήματα 6.13 έως 6.21 αναφέρονται σε τσιμέντο με γωνία εσωτερική τριβής 30° . Στη συνέχεια ακολουθούν τα αντίστοιχα σχήματα για τσιμέντο με γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=40^\circ$.



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης για τσιμέντο με $\phi=40^\circ$ και $C_o=10\text{MPa}$



Σχήμα 6.23: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και $C_0=10\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια

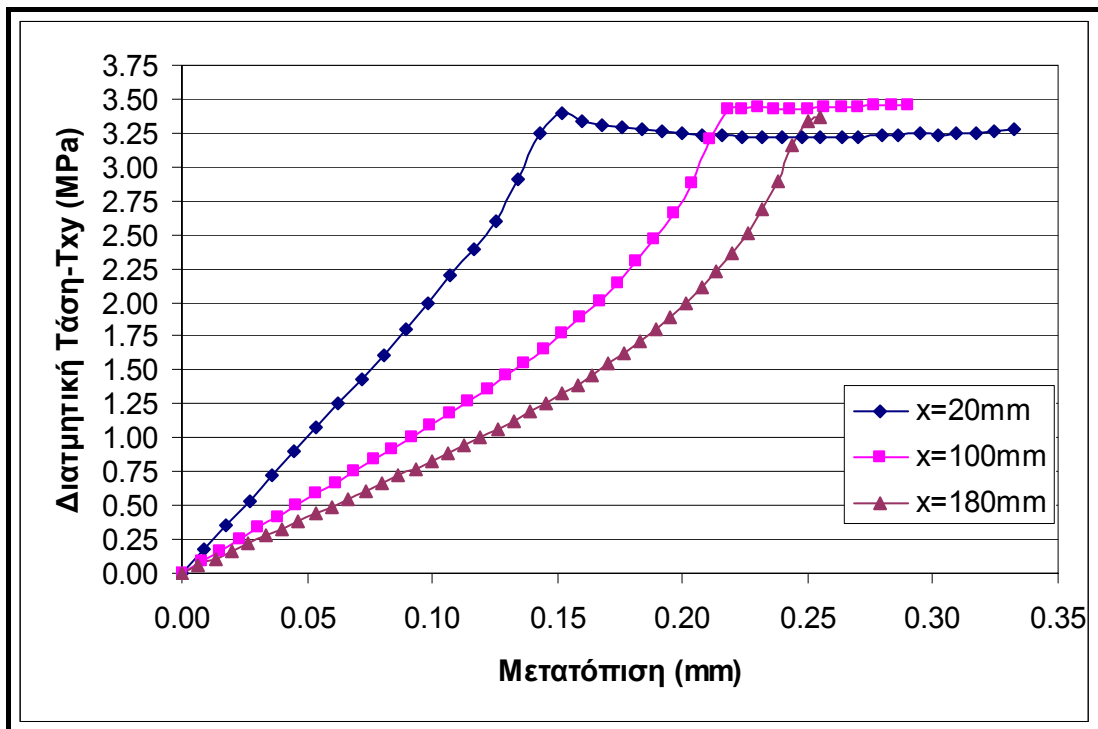


Σχήμα 6.24: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και $C_0=10\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 108cm από την επιφάνεια

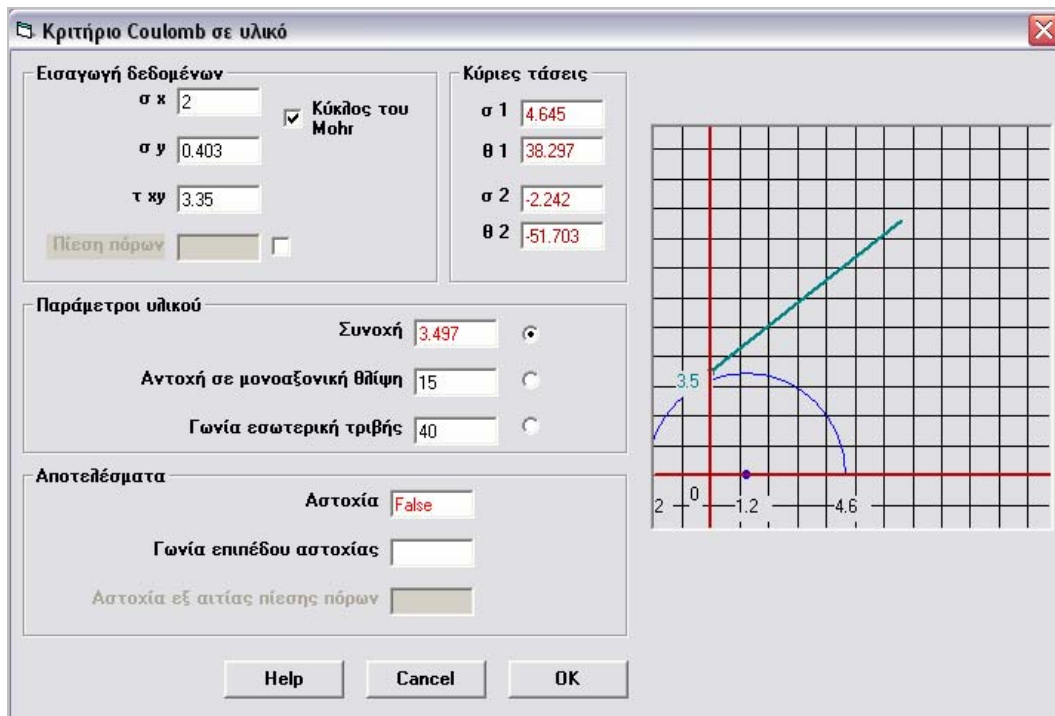
Και στην περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 6.22 η αύξηση της απόστασης του εξεταζόμενου σημείου συνεπάγεται μείωση των τάσεων στο συγκεκριμένο σημείο.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 6.13 με το Σχήμα 6. 22 τα οποία αντιστοιχούν σε μοντέλα που δέχονται το ίδιο φορτίο στο αγκύριο ($\Delta x=3\text{mm}$) προκύπτει ότι η συμπεριφορά του τσιμέντου σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια είναι παρόμοια και στα δύο μοντέλα. Δηλαδή προηγείται η αστοχία στο σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια και στη συνέχεια ακολουθεί η αστοχία στα υπόλοιπα σημεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό κοινό σημείο είναι ότι αστοχεί το τσιμέντο μόνο στα δύο πρώτα σημεία και στις δύο περιπτώσεις.

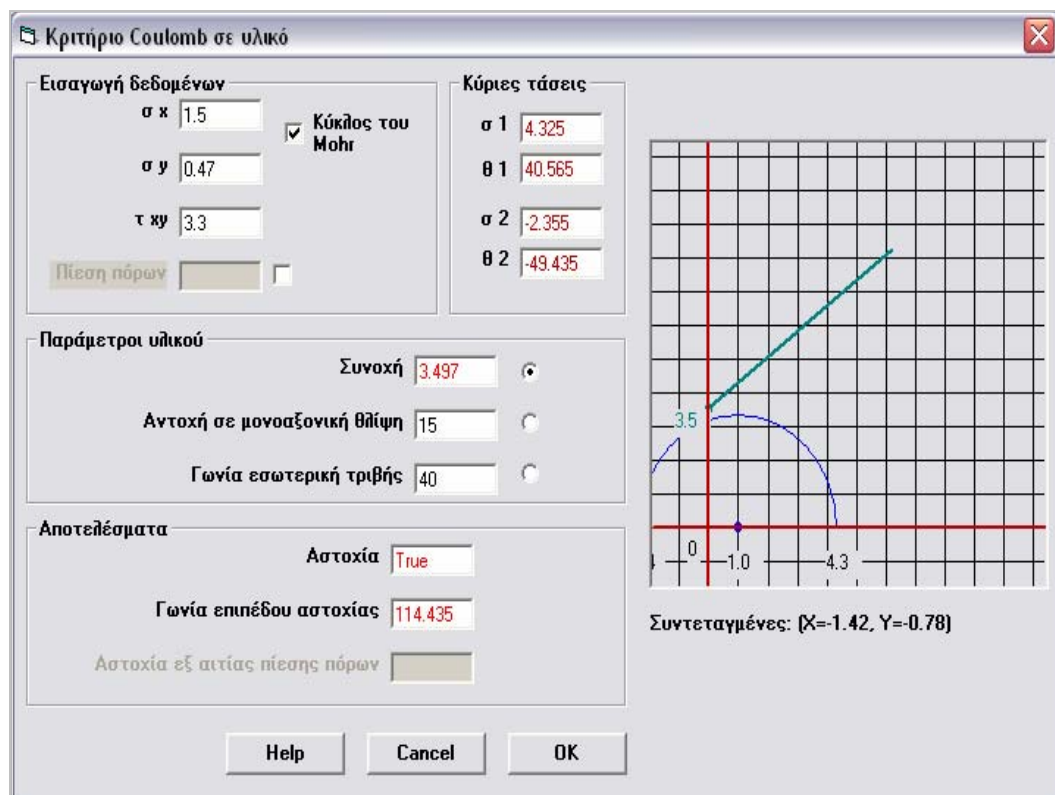
Διατηρώντας τη γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 40° και αυξάνοντας την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη από 10MPa σε 15MPa, στα αντίστοιχα σημεία του τσιμέντου προκύπτει συμπεριφορά που φαίνεται στο Σχήμα 6.25.



Σχήμα 6.25: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης για τσιμέντο με $\phi=40^\circ$ και $C_0=15\text{MPa}$



Σχήμα 6.26: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και $C_0=15\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια

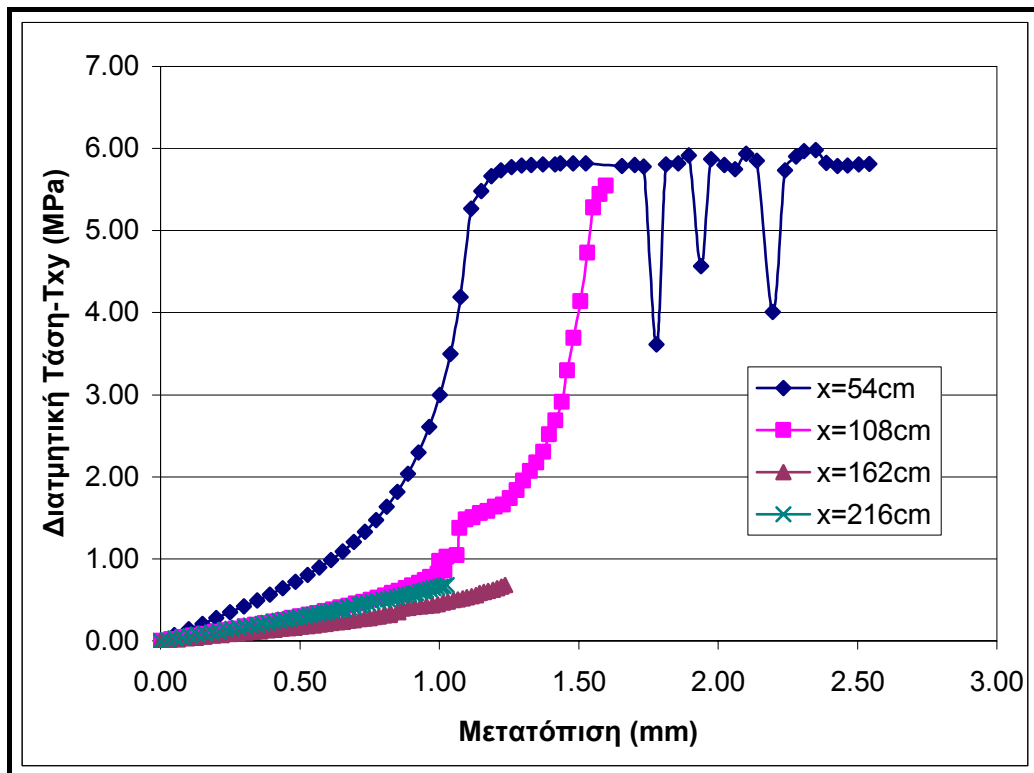


Σχήμα 6.27: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και $C_0=15\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 108cm από την επιφάνεια

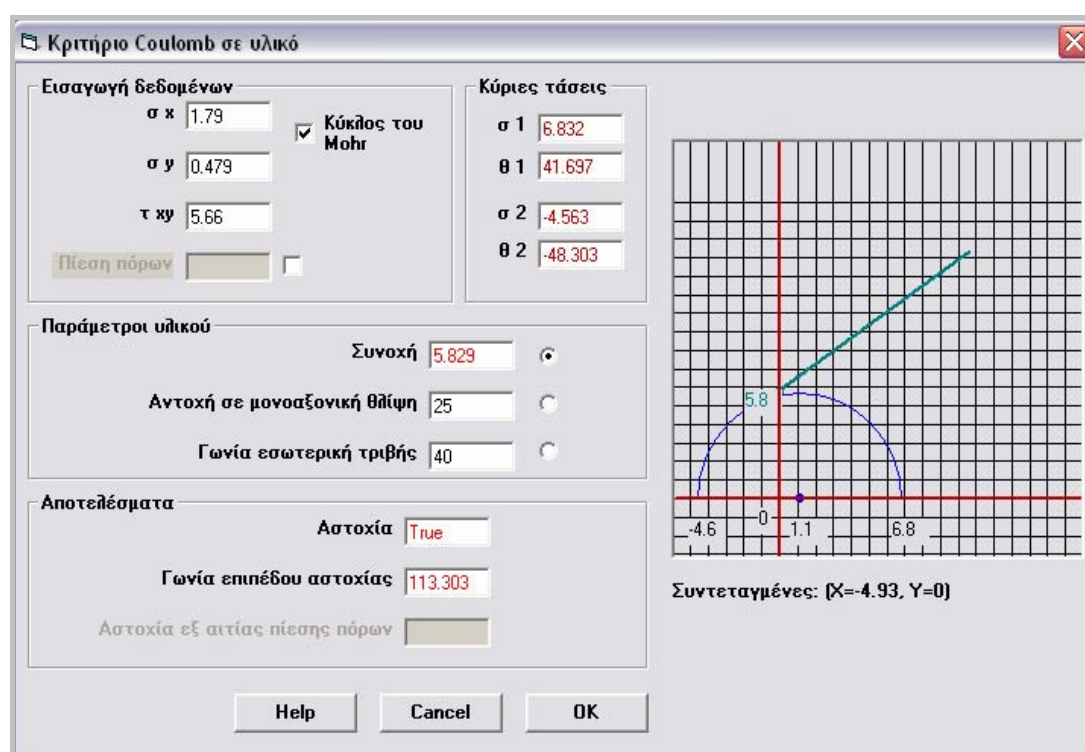
Και σε αυτή την περίπτωση η αστοχία του τσιμέντου για τα δύο πρώτα σημεία επιβεβαιώνεται απόλυτα από τη δεύτερη μέθοδο. Όπως και στην περίπτωση όπου το τσιμέντο έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10MPa έτσι και σε αυτή την περίπτωση με τσιμέντο με $C_o=15\text{MPa}$ για το τρίτο σημείο δεν πραγματοποιείται επαλήθευση της αστοχίας για τον ίδιο ακριβός λόγο.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 6.25 με το Σχήμα 6.16 τα οποία δέχονται το ίδιο φορτίο στο αγκύριο ($\Delta x=4\text{mm}$) προκύπτει ότι η συμπεριφορά του τσιμέντου σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια είναι παρόμοια και στα δύο μοντέλα. Προηγείται η αστοχία στο σημείο που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια και στη συνέχεια ακολουθεί η αστοχία στα υπόλοιπα σημεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση.

Διατηρώντας τη γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 40° και αυξάνοντας την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη από 15MPa σε 25MPa, το τσιμέντο στα αντίστοιχα σημεία έχει τη συμπεριφορά που φαίνεται στο Σχήμα 6.28. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι στο σημείο που απέχει 108cm από την επιφάνεια η αστοχία συμβαίνει σε οριακό επίπεδο. Υπάρχει μόνο ένα σημείο στο οποίο μετά από το σημείο της μέγιστης αντοχής φαίνεται η αστοχία.



Σχήμα 6.28: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης για τσιμέντο με $\phi=40^\circ$ και $C_o=25\text{MPa}$



Σχήμα 6.29: Αστοχία του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και $C_0=25\text{MPa}$ για την εντατική κατάσταση που επικρατεί στο σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια

Η επιβεβαίωση της αστοχίας με τη δεύτερη μέθοδο ισχύει και σε αυτή την περίπτωση.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε πολλές από τις περιπτώσεις που γίνεται επαλήθευση της αστοχίας με τη δεύτερη μέθοδο, για την αστοχία του τσιμέντου στο πρώτο σημείο φαίνεται να μην υπάρχει αστοχία. Αυτό δικαιολογείται με την παρατήρηση που έγινε για το Σχήμα 6.14 δηλαδή ότι δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί η εντατική κατάσταση του σημείου ακριβώς τη στιγμή της αστοχίας. Αυτό κυρίως παρατηρείται για τα σημεία που είναι πολύ κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια και οφείλεται στο γεγονός ότι σε εκείνα τα σημεία για μικρές μεταβολές της μετατόπισης συμβαίνουν μεγάλες μεταβολές της τάσης.

Επίσης σημειώνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις στον κλάδο όπου το υλικό παρουσιάζεται να διατηρεί την παραμένουσα αντοχή φαίνονται κάποιες τιμές των τάσεων οι οποίες αποκλίνουν από τις υπόλοιπες τιμές (π.χ. στο Σχήμα 6.28 για το σημείο που απέχει 54cm από την επιφάνεια). Αυτό πιθανότατα είναι αποτέλεσμα της κακής υπολογιστικής ικανότητας του προγράμματος.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του τσιμέντου σε σχέση με το σημείο το οποίο βρίσκεται αυτό, φαίνεται ότι για μικρά φορτία στο αγκύριο συμβαίνει αστοχία στην περιοχή κοντά στο άνοιγμα του διατρήματος. Όταν το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται η αστοχία του τσιμέντου προχωράει προς το βάθος του διατρήματος. Έτσι σε κάποιο συγκεκριμένο φορτίο

στο ακύριο θα υπάρξει αστοχία σε όλο το μήκος της στήλης του τσιμέντου.

Στις πραγματικές συνθήκες υποστήριξης εκσκαφών με κοχλίες για να υπάρξει αστοχία της κοχλίωσης δεν είναι απαραίτητο να αστοχήσει όλη η στήλη του τσιμέντου, αρκεί το τσιμέντο που δεν έχει αστοχήσει να μην είναι ικανό να υποστηρίξει όλο το βάρος του πετρώματος και κατά συνέπεια τις μετατοπίσεις που προκαλεί αυτό.

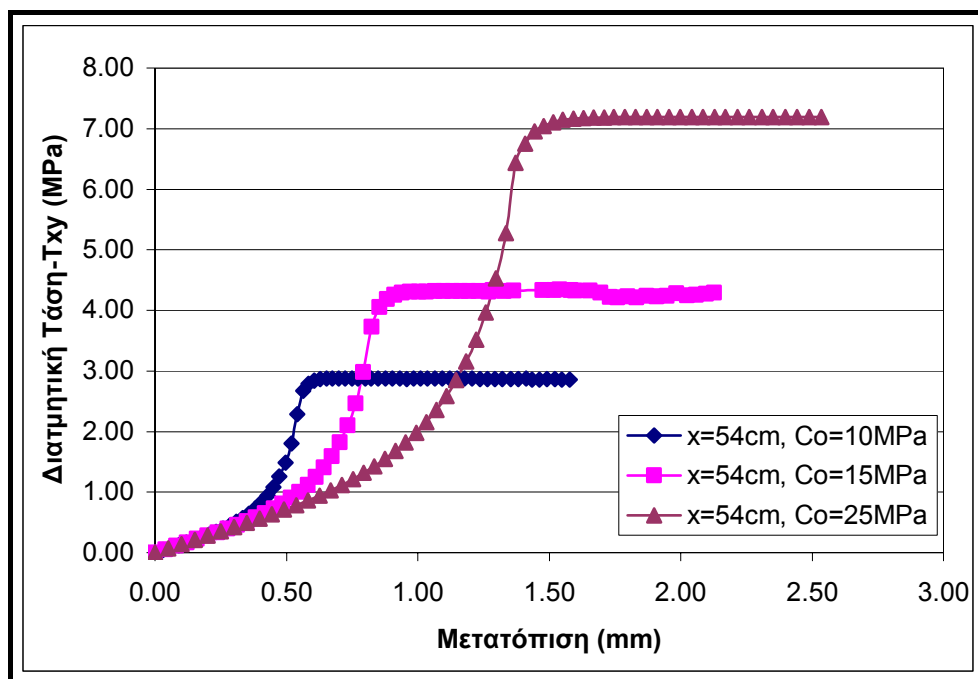
6.6.2 Απόκριση του Μοντέλου ως συνάρτηση της Αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη του Τσιμέντου

Όπως είναι γνωστό η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του υλικού. Αναμένεται ότι αύξηση της τιμής της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη θα σημαίνει και αύξηση της τάσης διαρροής του τσιμέντου.

Στην προσπάθεια να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη επηρεάζει την συμπεριφορά του τσιμέντου, δημιουργούνται μοντέλα με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10, 15 και 25MPa. Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς γίνεται μέσω διαγραμμάτων με άξονες Διατμητική Τάση – Μετατόπιση στα σημεία που απέχουν 54 και 108cm από την ελεύθερη επιφάνεια. Η επιλογή να εξεταστεί η συμπεριφορά του τσιμέντου μόνο σε δύο σημεία και όχι σε τέσσερα οφείλεται στο γεγονός ότι στα σημεία που απέχουν 162 και 216cm από την επιφάνεια δεν υπάρχει αστοχία του τσιμέντου.

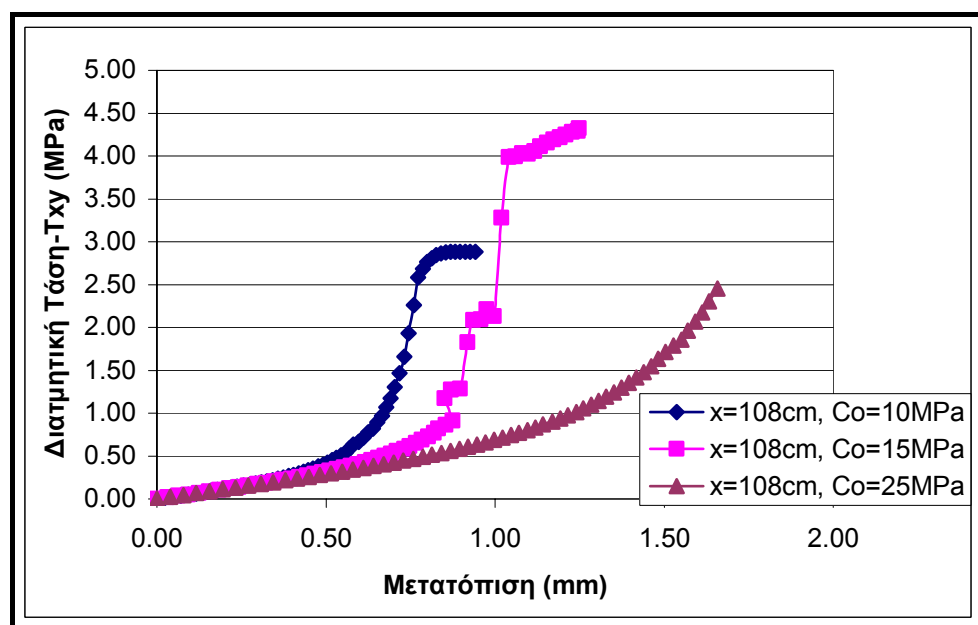
Για μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και γωνία εσωτερικής τριβής 30° προκύπτουν οι καμπύλες του σχήματος 6.32 οι οποίες αντιστοιχούν στο σημείο του τσιμέντου που απέχει 54cm από το στόμιο του διατρήματος.

Από το Σχήμα 6.30 παρατηρείται ότι αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συνεπάγεται και αύξηση της μέγιστης αντοχής σε διάτμηση του τσιμέντου, άρα και της τάσης διαρροής. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο αφού η τάση διαρροής προκύπτει έμμεσα από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Όμως η αύξηση του σημείου διαρροής απαιτεί μεγαλύτερες μετατοπίσεις ώστε να υπάρξει αστοχία. Έτσι όταν το τσιμέντο έχει μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη το σημείο που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια συμπεριφέρεται όπως το σημείο που είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από την επιφάνεια όταν το τσιμέντο έχει μικρότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Για παράδειγμα για τσιμέντο με αντοχή 15MPa το σημείο που απέχει 54cm από την ελεύθερη επιφάνεια (Σχήμα 6.30) έχει την ίδια συμπεριφορά με το σημείο που απέχει από την επιφάνεια 108cm όταν το τσιμέντο έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10MPa (Σχήμα 6.31)



Σχήμα 6.30: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στο σημείο που απέχει $x=54\text{cm}$

Η διαφορά του Σχήματος 6.30 με το Σχήμα 6.31 οφείλεται στην διαφορετική θέση στην οποία μελετάται το τσιμέντο και όπως αναλύθηκε προηγουμένως είναι λογικό να μην υπάρχει αστοχία για το τσιμέντο που βρίσκεται σε απόσταση 108cm και έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 25MPa .



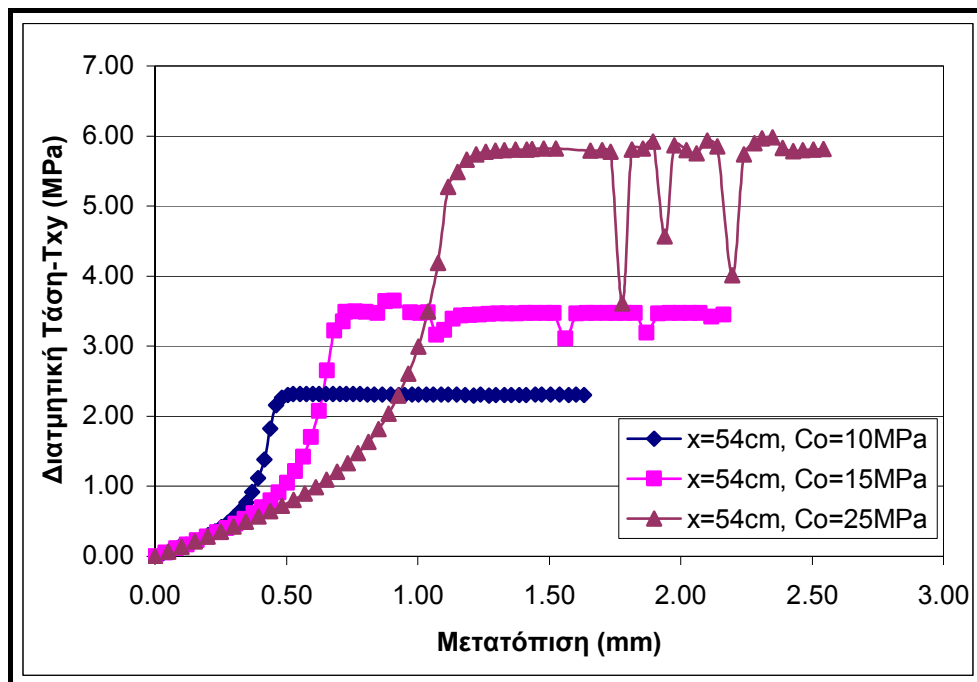
Σχήμα 6.31: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $\phi=30^\circ$ και μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στο σημείο που απέχει $x=108\text{cm}$

Παρατηρώντας τις καμπύλες του σχήματος 6.31 για το σημείο του τσιμέντου που απέχει 108cm από την ελεύθερη επιφάνεια φαίνεται ότι συμβαίνει αστοχία στα υλικά με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10 και 15MPa. Αντίθετα το τσιμέντο με αντοχή 25MPa δεν αστοχεί, παρά το γεγονός ότι στο αντίστοιχο μοντέλο η φόρτιση που δέχεται το αγκύριο είναι μεγαλύτερη από τα άλλα δύο. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει ακόμα περισσότερο το συμπέρασμα ότι αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συνεπάγεται και αύξηση της μέγιστης διατμητικής τάσης του μπορεί να δεχτεί το τσιμέντο.

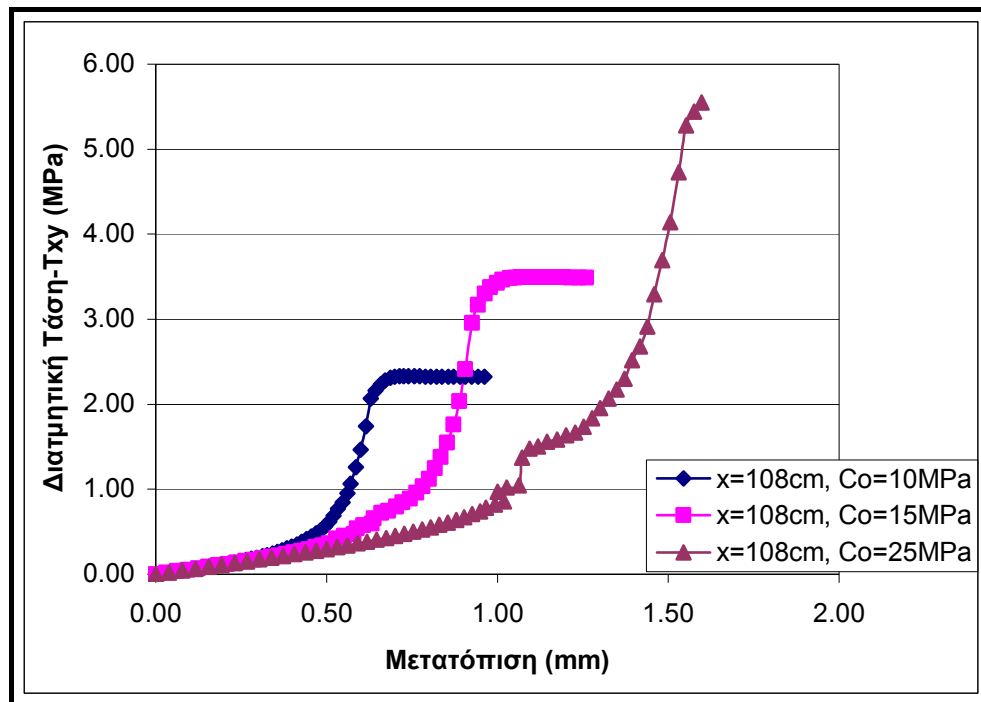
Γνωρίζοντας ότι εκτός από την αντοχή σε μονοαξονική σε μονοαξονική θλίψη μεταβάλλεται και η γωνία εσωτερικής τριβής, προκύπτουν δύο ζεύγη διαγραμμάτων, ένα για γωνία εσωτερικής τριβής 30° και ένα για γωνία εσωτερικής τριβής 40°.

Οι καμπύλες για το τσιμέντο με γωνία εσωτερικής τριβής 40° φαίνονται στο Σχήμα 6.32 και στο Σχήμα 6.33 για τα σημεία που απέχουν 54 και 108cm αντίστοιχα από την ελεύθερη επιφάνεια.

Οι καμπύλες που αναφέρονται στο τσιμέντο με γωνία εσωτερικής τριβής 40° είναι όμοιες με τις αντίστοιχες που το τσιμέντο έχει γωνία εσωτερικής τριβής 30°. Το συμπέρασμα λοιπόν που προκύπτει είναι το ίδιο, αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη συνεπάγεται και αύξηση της μέγιστης διατμητικής τάσης που μπορεί να δεχτεί το υλικό.



Σχήμα 6.32: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στο σημείο που απέχει $x=54\text{cm}$



Σχήμα 6.33: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $\phi=40^\circ$ και μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στο σημείο που απέχει $x=108\text{cm}$

Από τις καμπύλες που έχουν δημιουργηθεί για τις διάφορες τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του τσιμέντου εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο δεν υφίσταται αστοχία του τσιμέντου, δηλαδή όσο το τσιμέντο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, η μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του υλικού. Αυτό φαίνεται από την κλίση της γραμμής του ελαστικού κλάδου η οποία για όλες τις τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη παραμένει σταθερή.

Επίσης ανεξάρτητα από την τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής και την απόσταση του σημείου του τσιμέντου από την ελεύθερη επιφάνεια για να αστοχήσει το υλικό πρέπει να εμφανιστούν μεγαλύτερες μετατοπίσεις όταν αυτό έχει μεγάλη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη από αυτές που εμφανίζονται όταν η αντοχή του σε μονοαξονική θλίψη είναι μικρή.

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας δεν επαληθεύονται οι αστοχίες του υλικού στα διάφορα σημεία. Αυτό γίνεται σκόπιμα αφού η επαλήθευση έχει γίνει στις προηγούμενες περιπτώσεις.

6.6.3 Απόκριση του Μοντέλου ως συνάρτηση της Γωνίας εσωτερικής Τριβής του Τσιμέντου

Στην ενότητα αυτή γίνεται προσπάθεια να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο η μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής επηρεάζει τη συμπεριφορά του τσιμέντου που

χρησιμοποιείται ως συγκολλητικό υλικό στους κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης.

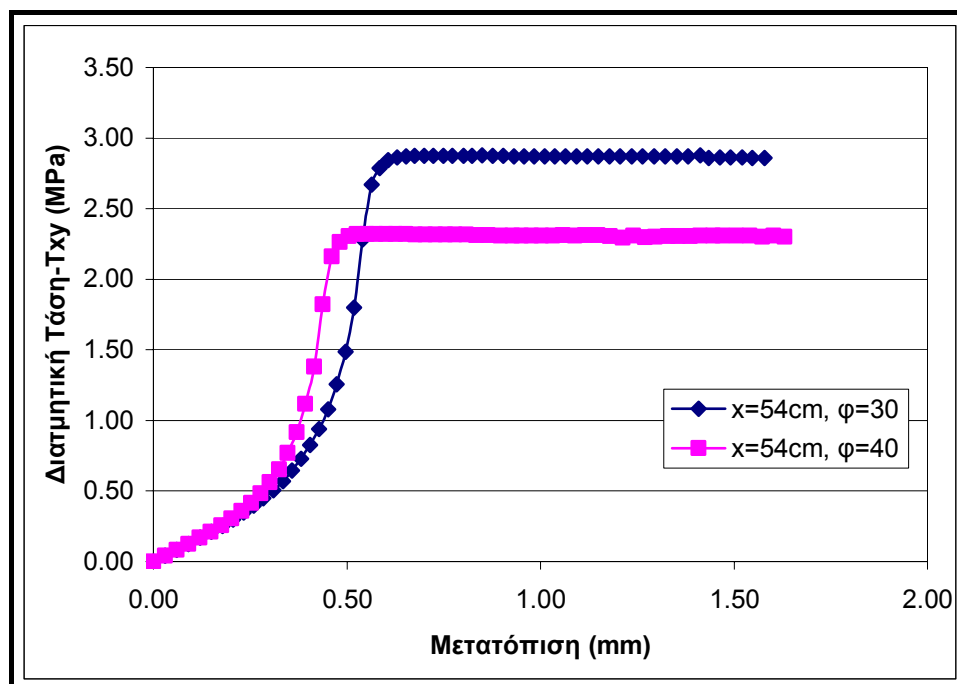
Για την μελέτη αυτή επιλέγονται τιμές 30° και 40° για τη γωνία εσωτερικής τριβής και σε συνδυασμό με τις τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του τσιμέντου προκύπτουν τρία ζεύγη διαγραμμάτων.

Στην περίπτωση της μελέτης της συμπεριφοράς του τσιμέντου σε σχέση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αναμενόμενα. Δυστυχώς για τη μελέτη της συμπεριφοράς σε σχέση με την μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής δεν υπάρχουν αναμενόμενα αποτελέσματα και αυτό κάνει την προσπάθεια πιο δύσκολη.

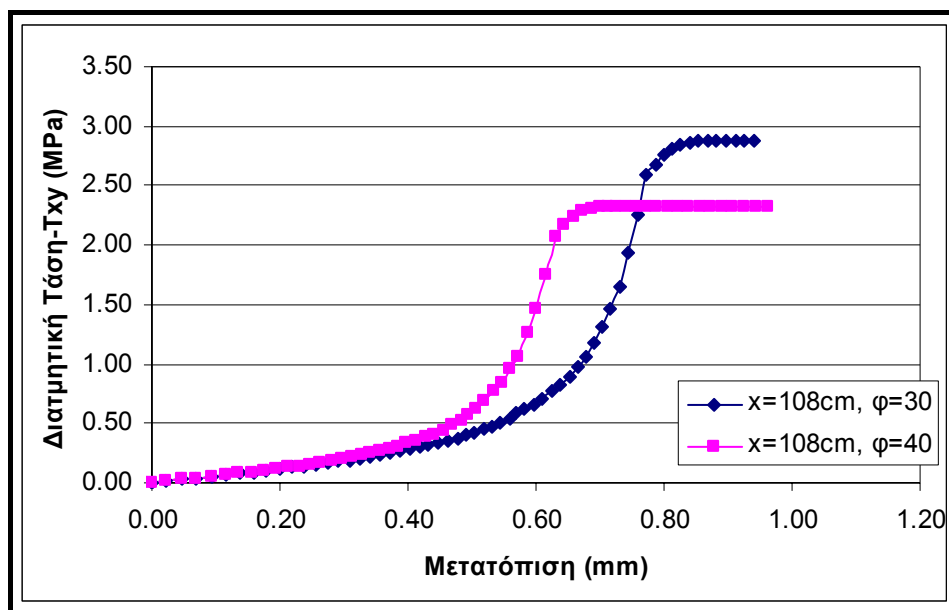
Αφού ο τρόπος επιρροής της γωνίας εσωτερικής τριβής δεν είναι αναμενόμενος επιλέγεται και πάλι να γίνει προσδιορισμός της συμπεριφοράς του υλικού μέσω διαγραμμάτων με άξονες Διατμητικής Τάσης – Μετατόπισης.

Επειδή οι τιμές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κατάλληλων γραφημάτων, και άρα τον προσδιορισμό της αστοχίας του τσιμέντου όταν μεταβάλλεται η γωνία εσωτερικής τριβής, είναι ίδιες με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα διαγράμματα δεν πραγματοποιείται επαλήθευση της αστοχίας με το πρόγραμμα RockWin.

Η επιρροή της γωνίας εσωτερικής τριβής στη συμπεριφορά του τσιμέντο το οποίο έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10MPa και απέχει 54 και 108cm από την ελεύθερη επιφάνεια φαίνεται στα Σχήματα 6.34 και 6.35 αντίστοιχα.



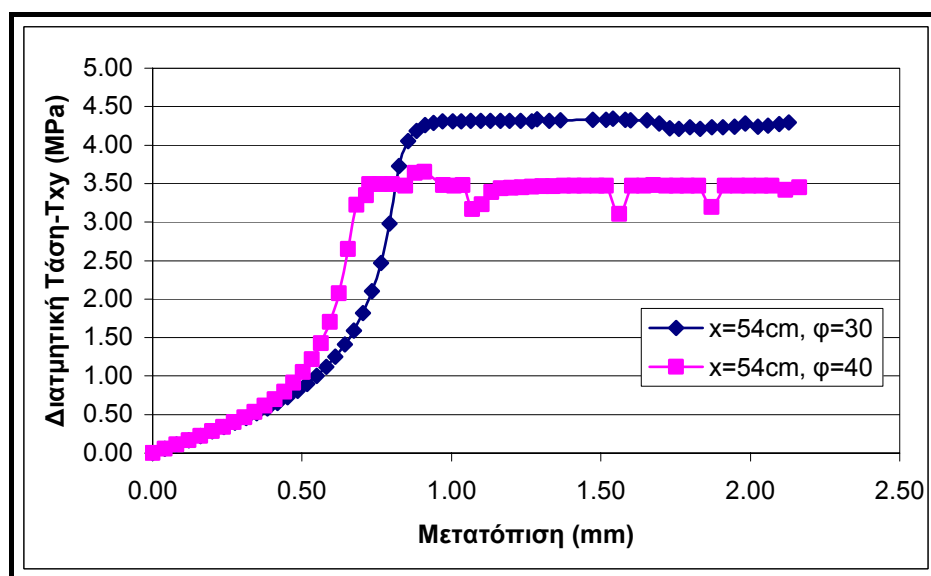
Σχήμα 6.34: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $C_0=10\text{MPa}$ και μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής στο σημείο που απέχει $x=54\text{cm}$



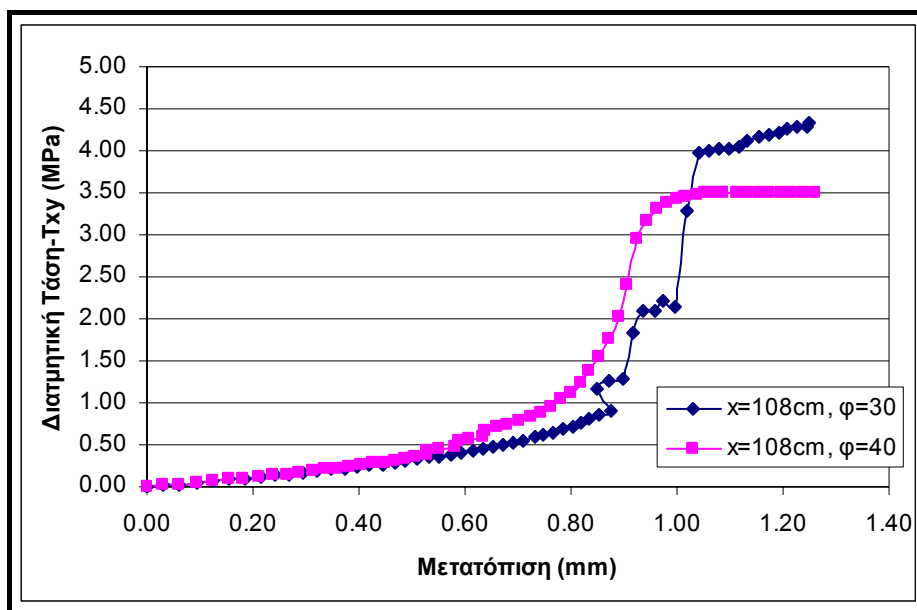
Σχήμα 6.35: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $C_0=10\text{MPa}$ και μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής στο σημείο που απέχει $x=108\text{cm}$

Από τα σχήματα 6.36 και 6.37 στα οποία φαίνεται ο τρόπος αστοχίας του τσιμέντου με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 10MPa παραμένει σταθερός σε σχέση με την απόσταση. Όμως η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής προκαλεί μείωση της μέγιστης αντοχής του υλικού.

Στα Σχήματα 6.36 και 6.37 φαίνεται η συμπεριφορά του τσιμέντο με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 15MPa .

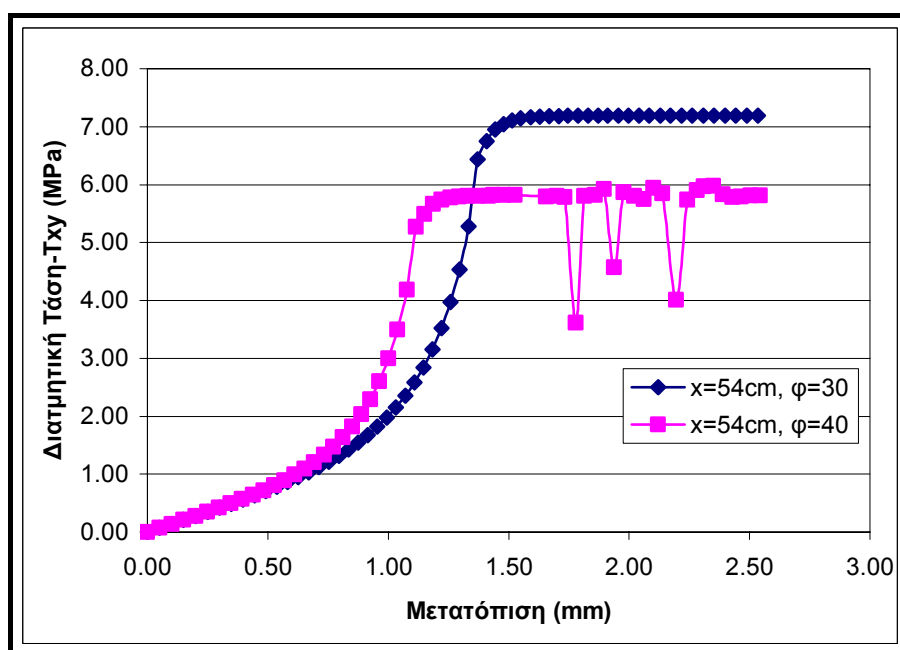


Σχήμα 6.36: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $C_0=15\text{MPa}$ και μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής στο σημείο που απέχει $x=54\text{cm}$

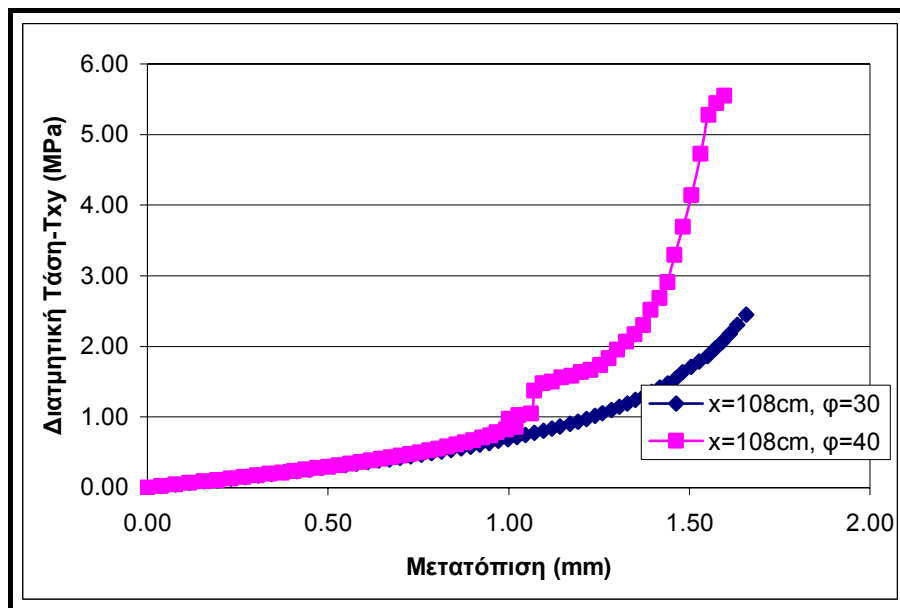


Σχήμα 6.37: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $C_0=15\text{MPa}$ και μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής στο σημείο που απέχει $x=108\text{cm}$

Από τις καμπύλες συμπεριφοράς του υλικού με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 15MPa φαίνεται και πάλι ότι η αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής προκαλεί μείωση της τάσης διολίσθησης. Για να είναι όμως πιο ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη η άποψη αυτή κατασκευάζονται και τα αντίστοιχα γραφήματα για υλικό με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 25MPa (Σχήμα 6.38 και 6.39).



Σχήμα 6.38: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $C_0=25\text{MPa}$ και μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής στο σημείο που απέχει $x=54\text{cm}$



Σχήμα 6.39: Συμπεριφορά του τσιμέντου με $C_0=25\text{MPa}$ και μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής στο σημείο που απέχει $x=108\text{cm}$

Στο Σχήμα 6.39 δεν φαίνεται να υπάρχει αστοχία του τσιμέντου. Για τον λόγο αυτό δεν μπορεί το σχήμα αυτό να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Για τον ίδιο λόγο δεν κατασκευάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα που αναφέρονται στα σημεία του τσιμέντου που απέχουν 162 και 216cm από την ελεύθερη επιφάνεια.

Από όλα τα γραφήματα που κατασκευάστηκαν για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του τσιμέντου, που χρησιμοποιείται ως μέσω συγκόλλησης, όταν μεταβάλλεται η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής φαίνεται αντίθετα με την αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη η οποία προκαλεί την αύξηση της τάσης διολίσθησης, η αύξηση της τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής προκαλεί τη μείωση της μέγιστης αντοχής που μπορεί να έχει το τσιμέντο. Επομένως ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής έχει μεγάλη σημασία στην επιτυχία της υποστήριξης των υπόγειων ανοιγμάτων.

Από τις καμπύλες που έχουν δημιουργηθεί για τις διάφορες τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής του τσιμέντου εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο δεν υφίσταται αστοχία του τσιμέντου, δηλαδή όσο το τσιμέντο βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, η μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του υλικού. Αυτό φαίνεται από την κλίση της γραμμής του ελαστικού κλάδου η οποία για όλες τις τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής παραμένει σταθερή.

6.7 Σύνοψη

Η επιτυχία της υποστήριξης υπόγειων ανοιγμάτων με κοχλίες κατανεμημένης αγκύρωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος της αγκύρωσης και της τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του τσιμέντου που χρησιμοποιείται για συγκολλητική ύλη. Πρέπει λοιπόν να προσδιορίζεται η μέγιστη δυνατή αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και η ελάχιστη δυνατή γωνία εσωτερικής τριβής. Αυτές οι δύο παράμετροι δε συνδυασμό με το κατάλληλο μήκος αγκύρωσης και τους οικονομικούς παράγοντες οδηγούν σε ασφαλή και επιτυχημένη υποστήριξη.

Για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο η καλύτερη αγκύρωση όσον αφορά την μέγιστη αντοχή του τσιμέντου επιτυγχάνεται για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 25MPa και γωνία εσωτερικής τριβής 30°.

Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη των τάσεων που ασκούνται στη ζώνη αγκύρωσης μεταλλικού αγκυρίου σε πέτρωμα. Η προσέγγιση έγινε με μοντελοποίηση μέσω αριθμητικών μεθόδων της ζώνης αυτής για αγκύριο κατανεμημένης αγκύρωσης του οποίου το συγκολλητικό υλικό είναι το τσιμεντένεμα.

Με την παραμετρική ανάλυση σε δύο διαστάσεις που πραγματοποιήθηκε διατηρώντας σταθερές τις διαστάσεις του πετρώματος, του αγκυρίου και του διατρήματος, και μεταβάλλοντας τις ιδιότητες του τσιμεντενέματος προκύπτουν κάποια συμπεράσματα τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή των ιδιοτήτων αυτών.

Ακόμη ένας πολύ σημαντικός και δύσκολος παράγοντας ο οποίος είναι αρκετά δύσκολός να υπολογιστεί είναι το μήκος της αγκύρωσης. Έτσι στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστεί η μεταβολή των τάσεων και σε σχέση με την απόσταση του σημείου αγκύρωσης από την επιφάνεια που υποστηρίζεται.

Για την επιλογή του κριτηρίου αστοχίας πραγματοποιήθηκε σύγκριση της συμπεριφοράς των γεωυλικών όταν σε αυτά εφαρμόζονται το γραμμικό και το παραβολικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι το παραβολικό κριτήριο εμφανίζεται να έχει πιο ομαλές μεταβολές των τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων από ότι έχει το γραμμικό κριτήριο στην περιοχή μετάβασης στον πλαστικό κλάδο. Επίσης, ο πλαστικός κλάδος δεν μεταβάλλεται με την μεταβολή της γωνίας εσωτερικής τριβής.

Έτσι, η μελέτη τις αστοχίας των μοντέλων έγινε με την εφαρμογή του παραβολικού κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb αφού μία από τις ιδιότητες του τσιμεντενέματος που μεταβάλλεται είναι η γωνία εσωτερικής τριβής.

Από τα διαγράμματα Διατμητικής τάσης – Μετατόπισης προέκυψε ότι το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων που εφαρμόζονται στο αγκύριο μεταφέρονται στην περιοχή του τσιμεντενέματος που είναι κοντά στην περιφέρεια της εκσκαφής. Δηλαδή είναι πιο πιθανό να αστοχήσει ο κοχλίας με μικρό μήκος του οποίου η ζώνη αγκύρωσης είναι υποχρεωτικά κοντά στην περιφέρεια του ανοίγματος.

Η αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη έχει σαν αποτέλεσμα το τσιμεντένεμα

να είναι ικανό να δεχτεί μεγαλύτερες τάσεις χωρίς να αστοχήσει. Το συμπέρασμα αυτό ισχύει και για την αύξηση της συνοχής αφού η συνοχή και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συνδέονται άμεσα.

Σε αντίθεση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και τη συνοχή η αύξηση της τιμής της γωνίας εσωτερικής τριβής, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων του κριτηρίου αστοχίας στο πρόγραμμα MARC και δεν είναι η πραγματική γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού, προκάλεσε μείωση των τάσεων που είναι ικανό να δεχτεί το τσιμεντένεμα χωρίς να αστοχήσει.

7.2 Προτάσεις

Στα δισδιάστατα μοντέλα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία ουσιαστικά μελετήθηκε η περίπτωση της μεταλλικής πλάκας μέσα στο πέτρωμα αφού η τρίτη διάσταση για όλα τα υλικά των μοντέλων ισούται με τη μονάδα. Στα τρισδιάστατα μοντέλα θα προσομοιώνεται επακριβώς ο κοχλίας μέσα στο πέτρωμα. Για το λόγο αυτό στην προσπάθεια για την περαιτέρω και ακριβέστερη προσέγγιση του προβλήματος προτείνεται να πραγματοποιηθεί ανάλυση με μοντέλα τριών διαστάσεων. Επίσης θα υπήρχε καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας αν η σύνδεση του τσιμέντου με τον κοχλία και το πέτρωμα γινόταν με στοιχεία επαφής και όχι με συνεχή στοιχεία.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ., (2002), “Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων”, Εκδόσεις ‘ΙΩΝ’, Αθήνα
2. Αντωναρίδου, Κ., (1998), “Τεχνικά και Οικονομικά Στοιχεία Συστημάτων Υποστήριξης Υπόγειων Ανοιγμάτων”, Διπλωματική Εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.
3. Βαλαλάς, Δ., (1981), “Εδαφομηχανική”, Εκδόσεις ‘Αφοί Κυριακίδη’, Θεσσαλονίκη.
4. Οικονομόπουλος, Ι. Ν., (1985), “Εκμετάλλευσις Μεταλλείων – Υποστήριξις”, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
5. Οικονομόπουλος, Ι. Ν., (1989), “Εκμετάλλευσις Μεταλλείων – Υποστήριξις”, Δεύτερη Έκδοση, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
6. Σειραδάκης, (2003), “Ανάπτυξη Αλγορίθμων και Λογισμικού για την Επίλυση Τυπικών Προβλημάτων της Μηχανικής Πετρωμάτων”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Aldorf, J. and K. Exner, (1986), “Mine Openings: Stability and Support”, Elsevier, 392p.
2. Becker, A. A., (1992), “The Boundary Element Method in Engineering”. McGraw Hill.
3. Biron, G. and E. Arioglu, (1982), “Design of Support in Mines”, J. Wiley & Sons, 248p.
4. Desai, G. S., (1979), “Elementary Finite Element Method”, Prentice Hall.
5. Fagan, M. J., (1996). “Finite Element Analysis – Theory and Practice” Longman Group.
6. Felippa, C. A., (2003), “An Introduction to Fine Element Method”, (Lecture notes), Department of Aerospace Engineering Sciences, Colorado University.
7. Hoek, E. end E. T. Brown, (1980), “Underground Excavations in Rock”, Inst. Mining and Metallurgy, London.
8. Hoek, E., M. W. Grabinsky and M. S. Diederichs, (1991), “Numerical Modelling for Underground Excavation Design”, Trans IMM, Section A, January – April.

9. Spyrakos, C. C., (1996), "Finite Element Modeling - In Engineering Practice" Algor Publishing Division.
10. Stillborg, B., (1994), "Professional Users Handbook for Rock Bolting", Trans Tech Publications.
11. Panek, L. A., (1964), "Design for Bolting Stratified Roof", Soc. of Mining Engineers, June 1964.