



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**Δ.Π.Μ.Σ. «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

**ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΣΕΣ ΣΧΟΛΕΣ: ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΩΝ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΑΚΤΩΣΗΣ ΜΕ  
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΠΟΥΛΑΜΑΤΣΗ ΣΟΦΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΟΦΙΑΝΟΣ Α.Ι., ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΝΟΜΙΚΟΣ Π., ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ**

**ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ Κ., ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑΙ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στην Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με θέμα την διερεύνηση της λειτουργίας ήλων πλήρους πάκτωσης με αριθμητικές μεθόδους. Η εργασία διεξήχθη στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κο. Σοφιανό Α.Ι. και τον Λέκτορα κο. Νομικό Π. για την καθοριστική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, την καταλυτική βοήθεια και τον χρόνο που αφιέρωσαν καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Με εκτίμηση,  
Μπουλαμάτση Σοφία  
Οκτώβριος 2010



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της λειτουργίας ήλων πλήρους πάκτωσης. Αρχικά, περιγράφεται η χρήση των ήλων στα υπόγεια έργα ως μέσο αντιστήριξης, οι κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται καθώς και τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας. Εν συνεχεία, αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους τοποθετούνται και περιγράφονται οι δοκιμές που γίνονται για να ελεγχθεί η ποιότητα και η αρτιότητα της λειτουργίας ενός ήδη τοποθετημένου ήλου.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας διερευνήθη η λειτουργία ήλων πλήρους πάκτωσης. Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC που παρέχει την δυνατότητα κατασκευής μοντέλων που αφορούν προβλήματα στα οποία η κατανομή των τάσεων γίνεται σε αξονοσυμμετρικά στερεά.

Αρχικά, επαληθεύτηκε με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών μοντέλο που είχε επιλυθεί με πεπερασμένα στοιχεία σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία και διερευνήθηκαν περαιτέρω παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή του αξονικού φορτίου.

Έπειτα, στα επόμενα μοντέλα που κατασκευάστηκαν μελετήθηκε η εξόλκευση ήλου σε αφόρτιστο πέτρωμα. Στα μοντέλα αυτά η προσομοίωση της εξόλκευσης έγινε με εφαρμογή τάσεως στην ζώνη που αντιπροσωπεύει τον ήλο. Έγιναν έξι παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες εξετάστηκε η επίδραση της παραμένουσας συνοχής του ενέματος, της γωνίας τριβής του ενέματος, της συνοχής του ενέματος, της παραμέτρου  $m_i$  του πετρώματος και η επίδραση της τιμής του GSI του πετρώματος. Οι παραμετρικές αναλύσεις έγιναν για τρεις διαφορετικές αναλογίες νερού/τσιμέντου.

Εν συνεχεία, κατασκευάστηκαν διδιάστατα μοντέλα με τα οποία μελετήθηκε εξόλκευση ήλου σε σφαιρικό άνοιγμα για τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες πετρωμάτων και τριδιάστατα μοντέλα στα οποία μελετήθηκε εξόλκευση ήλου στην στέψη σήραγγας κυκλικής διατομής. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα από την σύγκριση των διδιάστατων και τριδιάστατων μοντέλων.



## ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate the performance of fully grouted rockbolts. At first, there is the description of the use of rockbolts in underground projects as a means of support, as well as the classification of the types and their characteristics. Then, the ways of installing the rockbolts are discussed and the methods to control the quality and integrity of already installed bolts are described.

In the practical part, the finite difference code FLAC which facilitates the construction of axisymmetric models is used. There follows a verification of a model through the finite difference method, which, according to the international bibliography, was previously solved with the use of the finite element method.

Furthermore, factors that influence the distribution of axial load are mentioned. In the following models the pull-out test of rockbolts in non-stressed rock is studied. There, the simulation of the pull out process is performed with the application of stress to the rockbolt. For three different ratios of water/cement, the influence of the remaining cohesion, of the friction angle and the cohesion of the grout, of the  $m_i$  parameter and the quality of rock mass are evaluated.

Finally, two-dimensional models are constructed which on their part simulate the pull-out process of a rockbolt in a spherical opening for four different types of rocks and three-dimensional models which simulated the pull-out process of a rockbolt in the crown of a circular tunnel. Concluding, two-dimensional and three-dimensional models are compared.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Γιατί επιλέγονται οι ηλώσεις.....	1
1.3	Τύποι Ήλων.....	4
1.3.1	Ήλοι μηχανικής αγκύρωσης.....	4
1.3.2	Ήλοι που αγκυρώνονται με την χρήση ενέματος ή ρητίνης.....	6
1.3.3	Ήλοι αγκύρωσης τριβής.....	10
1.3.3.1	Ηλώσεις Split Set.....	10
1.3.3.2	Ηλώσεις Swellex.....	12
1.3.3.3	Ήλοι απορρόφησης ενέργειας - D-bolt.....	14
1.4	Εξαρτήματα συστημάτων ηλώσεως.....	21
1.4.1	Πλάκες στήριξης.....	21
1.4.2	Πλέγμα.....	22
1.4.3	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	25
1.5	Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία ήλων εμπορίου.....	26
1.6	Διάβρωση.....	51
1.6.1	Αιτίες διάβρωσης.....	51
1.6.2	Μηχανισμοί διάβρωσης.....	53
1.6.3	Περιορισμός διάβρωσης.....	56
1.6.4	Προστασία ήλων από την διάβρωση.....	56
1.7	Κόστος ηλώσεων.....	57
1.7.1	Άμεσο κόστος.....	57
1.7.2	Έμμεσο κόστος.....	58
1.7.3	Ελαχιστοποίηση κόστους ηλώσεων.....	58
<b>2</b>	<b>Κεφάλαιο - Τοποθέτηση Ηλώσεων - Δοκιμές και μετρήσεις ελέγχου συστήματος ήλωσης.....</b>	<b>59</b>

2.1	Τοποθέτηση ήλων μηχανικής αγκύρωσης. ....	59
2.2	Τοποθέτηση ήλων που αγκυρώνονται με χρήση ενέματος ή ρητίνης και μεταλλικών καλωδίων. ....	61
2.2.1	Τοποθέτηση ήλων που αγκυρώνονται με χρήση ενέματος ή ρητίνης. ....	61
2.2.2	Τοποθέτηση μεταλλικών καλωδίων. ....	63
2.3	Τοποθέτηση ήλων αγκύρωσης τριβής. ....	65
2.4	Αστοχίες συστημάτων υποστήριξης. ....	67
2.5	Δοκιμές και μετρήσεις ελέγχου συστήματος ήλωσης. ....	67
2.5.1	Δοκιμή εξόλκευσης. ....	68
2.5.2	Δοκιμή στρεπτικής ροπής. ....	76
2.5.3	Μέτρηση φορτίου. ....	76
2.5.4	Δοκιμή πυρηνοληψίας. ....	76
2.5.5	Έμμεσος έλεγχος άνευ καταστροφής. ....	77
2.5.6	Ηλεκτρονικός έλεγχος άνευ καταστροφής. ....	77
2.5.7	Δοκιμή καθορισμού επιβαλλόμενης στρεπτικής ροπής. ....	78
2.6	Κανονισμοί διεξαγωγής δοκιμών. ....	79
2.6.1	Προτεινόμενη Μέθοδος για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός ήλου (Rockbolt) – Δοκιμή Εξόλκευσης. ....	80
2.6.2	Προτεινόμενη μέθοδος για την παρακολούθηση της εξέλιξης του επιβαλλόμενου φορτίου στα συστήματα ήλωσης (Load cells). ....	85
2.6.3	Προτεινόμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό φορτίου σε σύστημα ήλωσης με χρήση ροπόκλειδου. ....	88
<b>3</b>	<b>Κεφάλαιο – Συμπεριφορά Ήλων. ....</b>	<b>91</b>
3.1	Αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη του αξονικού φορτίου ήλων εντός ενέματος σε σήραγγες σε μαλακό πέτρωμα. ....	91
3.2	Δοκιμές εξόλκευσης ήλων ολόσωμης πάκτωσης. ....	101
3.3	Ήλοι ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα. ....	104
3.4	Ήλοι ολόσωμης πάκτωσης με τριβή. ....	107

<b>4</b>	<b>Κεφάλαιο - Περιγραφή Αριθμητικών μεθόδων – Εφαρμογή στο FLAC .....</b>	<b>111</b>
4.1	Αριθμητικές Μέθοδοι.....	111
4.1.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (FDM).....	112
4.1.2	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....	113
4.1.3	Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM).....	113
4.2	Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.....	115
4.2.1	Πεπερασμένες Διαφορές σε εφαρμογή στο FLAC.....	115
4.2.2	Αξονοσυμμετρικό μοντέλο.....	116
4.2.3	Σύγκριση μοντέλου πεπερασμένων διαφορών με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.....	117
4.2.4	Διερεύνηση .....	121
4.3	Σύγκριση μοντέλου «cable» του FLAC <sup>2D</sup> σε plane strain με αξονοσυμμετρικό μοντέλο.....	127
4.3.1	Μοντέλο cable του FLAC.....	127
4.3.2	Αξονοσυμμετρικό μοντέλο.....	129
4.3.3	Αξονοσυμμετρικό Μοντέλο Εξόλκευσης.....	130
4.3.3.1	Πέτρωμα ελαστικό και ένεμα ελαστικό .....	130
4.3.3.2	Ελαστοπλαστικό μοντέλο .....	132
4.3.3.2.1	Ήλος 3m.....	136
4.3.3.2.2	Ήλος 5m.....	141
4.3.3.3	Εξολκεύσεις σε ελαστοπλαστικό αφόρτιστο πέτρωμα.....	143
4.4	Σύγκριση μοντέλων σε FLAC <sup>2D</sup> και FLAC <sup>3D</sup> .....	167
4.4.1	FLAC <sup>2D</sup> .....	167
4.4.2	FLAC <sup>3D</sup> .....	175
4.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων FLAC <sup>2D</sup> και FLAC <sup>3D</sup> .....	189
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>199</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>203</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου με μηχανικά διαστελλόμενο κωνικό περίβλημα (Stillborg, 1994). .....	5
Πίνακας 2 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά μεταλλικής ράβδου με ένεμα (Stillborg, 1994). .....	7
Πίνακας 3 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά μεταλλικής ράβδου με ρητίνη (Stillborg, 1994). .....	8
Πίνακας 4 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου με δίδυμο συρματόσχοινο αγκύρωσης (Stillborg, 1994). .....	9
Πίνακας 5 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου τύπου Split Set (Stillborg, 1994). .....	11
Πίνακας 6 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου τύπου Swellex (Stillborg, 1994). .....	13
Πίνακας 7 Τεχνικά χαρακτηριστικά Self-drilling ήλων. ....	46
Πίνακας 8 Χαρακτηρισμός της διαβρωσιμότητας του εδάφους. ....	52
Πίνακας 9 Σύστημα ταξινόμησης. ....	78
Πίνακας 10 Σύγκριση μέγιστου αξονικού φορτίου και βάθους εμφάνισης αυτού στα διδιάστατα και τριδιάστατα μοντέλα. ....	197



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Διάγραμμα ροής ηλώσεως σύμφωνα με τον Stillborg (1994).....	3
Σχήμα 2 Ήλος μηχανικής αγκύρωσης (Stillborg, 1994).....	5
Σχήμα 3 Ήλος μεταλλικής ράβδου με ένεμα (Stillborg, 1994). ....	6
Σχήμα 4 Ήλος μεταλλικής ράβδου με ρητίνη (Stillborg, 1994). ....	7
Σχήμα 5 Ήλος με μεταλλικά καλώδια (Stillborg, 1994).....	9
Σχήμα 6 Ήλος αγκύρωσης τριβής τύπου Split Set (Stillborg, 1994).....	11
Σχήμα 7 Ήλος αγκύρωσης τριβής τύπου Swellex (Stillborg, 1994). ....	13
Σχήμα 8 Οι τρεις κατηγορίες ήλων και η ικανότητα τους όσον αφορά την ανάληψη φορτίων και την αντοχή σε μεγάλες παραμορφώσεις. ....	16
Σχήμα 9 Ήλοι τύπου D. ....	17
Σχήμα 10 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης χαλύβδινης ράβδου B500C υπό εφελκυστικό φορτίο. ....	19
Σχήμα 11 Διάταξη δοκιμής.....	20
Σχήμα 12 Είδη πλακών στήριξης και η αντίστοιχη ενεργή επιφάνεια επαφής (Stillborg, 1994). ....	21
Σχήμα 13 Αλυσιδωτό πλέγμα (Stillborg, 1994).....	23
Σχήμα 14 Πλέγμα τοποθετημένο στο πέτρωμα δια μέσου της πλάκας στήριξης του ήλου (Α) και με μία δεύτερη πλάκα ροδέλλα στον υπάρχοντα ήλο (Β) (Stillborg, 1994). ....	24
Σχήμα 15 Εφαρμογή δομικού πλέγματος σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Stillborg, 1994).....	25
Σχήμα 16 Ράβδος ELEBAR® - R παθητικής αγκύρωσης (1 σπείρωμα). ....	27
Σχήμα 17 Ράβδος ELEBAR® - R μηχανικής αγκύρωσης (2 σπειρώματα). ....	28
Σχήμα 18 Απλό βλήτρο βράχου ολόσωμης πάκτωσης – Παθητική αγκύρωση. ....	29
Σχήμα 19 Μηχανική αγκύρωση ολόσωμης πάκτωσης με χρήση ρητίνης ή τσιμεντενέματος.....	30
Σχήμα 20 Χαλύβδινα Πλακίδια Έδρασης.....	31
Σχήμα 21 Ημισφαιρικές Έδρες. ....	31

Σχήμα 22 Εξάγωνα Περικόχλια.....	32
Σχήμα 23 Τύποι ήλων ELEBAR® - G.....	34
Σχήμα 24 Ράβδος ολόσωμου σπειρώματος ELEBAR® - G.....	36
Σχήμα 25 Απλό βλήτρο βράχου ELEBAR® - G - Ολόσωμη πάκτωση – Παθητική αγκύρωση.....	37
Σχήμα 26 Βασική μηχανική αγκύρωση ELEBAR® - G.....	38
Σχήμα 27 Σημειακής Πάκτωσης - Προεντεταμένη αγκύρωση ELEBAR® - G.....	38
Σχήμα 28 Συνδυασμένη αγκύρωση ELEBAR® - G.....	39
Σχήμα 29 Χαλύβδινο Θολοειδές Πλακίδιο Έδρασης.....	40
Σχήμα 30 Χαλύβδινο Θολοειδές Πλακίδιο Έδρασης με κεκαμμένο άκρο και οπή αναρτήσεως.....	40
Σχήμα 31 Διαστελλόμενη αγκυροκεφαλή.....	41
Σχήμα 32 Περικόχλια και Ημισφαιρικές Έδρες.....	42
Σχήμα 33 Φυσίγγια ρητίνης.....	43
Σχήμα 34 Εξοπλισμός εξόλκευσης.....	44
Σχήμα 35 Self-Drilling ήλος τύπου ELEBAR®-SD.....	46
Σχήμα 36 Απεικόνιση τοποθετημένου Self-Drilling ήλου.....	47
Σχήμα 37 Διάτρητοι σωλήνες (Perforated Tubes).....	47
Σχήμα 38 Σχέση του τύπου διάβρωσης με το pH και το ηλεκτροχημικό δυναμικό (Caron, 1972).....	55
Σχήμα 39 Ένταση ήλου με μηχανικά διογκούμενο κωνικό περίβλημα με χρήση κλειδιού ελέγχου ροπής στρέψεως (Stillborg, 1994).....	61
Σχήμα 40 Τοποθέτηση μεταλλικού καλωδίου μεγάλου μήκους (Stillborg, 1994).....	64
Σχήμα 41 Τοποθέτηση ενός ήλου τύπου Split Set (Stillborg, 1994).....	66
Σχήμα 42 Τοποθέτηση ήλου τύπου Swellex (Stillborg, 1994).....	66
Σχήμα 43 Σχηματική παρουσίαση του εξοπλισμού και της εκτέλεσης της δοκιμής εξόλκευσης.....	81
Σχήμα 44 Φύλλο αποτελεσμάτων δοκιμής εξόλκευσης.....	82



Σχήμα 45 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης κεφαλής ήλου. ....	84
Σχήμα 46 Διάγραμμα επίδρασης χρόνου ωρίμανσης και μήκους ενεμάτωσης στην αντοχή του ήλου. ....	84
Σχήμα 47 Διάγραμμα Παρατηρηθέντος φορτίου – Πραγματικού φορτίου. ....	86
Σχήμα 48 Διάγραμμα Απώλειας φορτίου – Χρόνου.....	87
Σχήμα 49 α) Διάταξη, β) Διάγραμμα Φορτίου - Ροπής. ....	88
Σχήμα 50 Διάγραμμα Διορθωμένης Ροπής – Ανάγνωση Ροπής.....	89
Σχήμα 51 Αλληλεπίδραση μεταξύ ήλου και πετρώματος. ....	94
Σχήμα 52 Εξισορρόπηση απειροστού στοιχείου. ....	94
Σχήμα 53 Αποσύζευξη ήλου. ....	97
Σχήμα 54 Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης. ....	97
Σχήμα 55 Ζώνες που μπορούν να δημιουργηθούν γύρω από μία σήραγγα.....	98
Σχήμα 56 Ζώνη πλαστικής ροής και χαλαρωμένη ζώνη - Αξονική δύναμη και διατμητική τάση του ήλου. ....	99
Σχήμα 57 Επιμέρους τμήματα ήλου που βρίσκονται αντίστοιχα στην ζώνη πλαστικής ροής, πλαστική χαλαρή ζώνη και ελαστική ζώνη.....	101
Σχήμα 58 Τάσεις σε απειροστό μήκος ήλωσης. ....	102
Σχήμα 59 Κατανομή της αξονικής τάσης κατά μήκος ήλου ολόσωμης πάκτωσης. Πάνω: Δοκιμή εξόλκευσης, α) Χαμηλή φόρτιση β) Υψηλή φόρτιση. Κάτω: Επί τόπου ήλος σε λειτουργία. ....	103
Σχήμα 60 Διατμητικές τάσεις στην χαλύβδινη ράβδο. ....	103
Σχήμα 61 Κατανομή της διατμητικής τάσης αμέσως πριν την αποσύζευξη στο άκρο (Stillborg, 1999).....	104
Σχήμα 62 Εξιδανικευμένη κατανομή της διατμητικής τάσης μετά από μερική αποσύζευξη (Stillborg, 1999). ....	105
Σχήμα 63 Κατανομή της διατμητικής τάσης και του αξονικού φορτίου ήλου ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα, υποκείμενου σε αξονικό φορτίο 90 kN (Stillborg, 1999).....	106
Σχήμα 64 Κατανομή του αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα, σε διάφορα στάδια φόρτισης (Stillborg, 1999). ....	107

Σχήμα 65 Κατανομή της διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου ολόσωμης πάκτωσης με τριβή (Stillborg, 1999). .....	107
Σχήμα 66 Κατανομή της διατμητικής τάσης και του αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου Swellex, για εφαρμοζόμενο φορτίο 5 kN. ....	109
Σχήμα 67 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου Swellex σε διάφορα στάδια φόρτισης.....	109
Σχήμα 68 Κατηγορίες και ταξινόμηση αριθμητικών μεθόδων.....	111
Σχήμα 69 Τροπή και τάσεις στην αξονοσυμμετρική ανάλυση.....	117
Σχήμα 70 Απεικόνιση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (Nitzsche & Haas (1976)).	118
Σχήμα 71 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου σε σχέση με την απόσταση από το σημείο εφαρμογής του (Nitzsche και Haas (1976)). .....	119
Σχήμα 72 Λεπτομέρεια καννάβου πεπερασμένων διαφορών.....	120
Σχήμα 73 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου σε σύγκριση με το διάγραμμα των Nitzsche και Haas . ....	120
Σχήμα 74 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου για διαφορετικές ακτίνες πλάκας στήριξης.....	121
Σχήμα 75 Απεικόνιση τμήματος μοντέλου με προσομοίωση πλάκας στήριξης με δέσμευση κόμβων πλέγματος. ....	122
Σχήμα 76 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου για διαφορετικές ακτίνες πλάκας στήριξης και για αντίστοιχες ακτίνες που προσομοιώνονται με στηρίξεις.....	122
Σχήμα 77 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και διαφορετικά πάχη ενέματος. ....	124
Σχήμα 78 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου όταν το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος είναι 3.884E5 psi. ....	125
Σχήμα 79 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου όταν το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος είναι 1.942E5 psi. ....	125
Σχήμα 80 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – kbond για τις δύο τιμές μέτρου ελαστικότητας του ενέματος και για ακτίνα πλάκας στήριξης ίση με $R_1$ , $R_2$ και $R_3$ . ....	126
Σχήμα 81 Διάγραμμα δύναμης/m – μετατόπισης. ....	128

Σχήμα 82 Συνάφεια ήλου - ενέματος στην μετατόπιση 17.5mm .....	128
Σχήμα 83 Λεπτομέρεια καννάβου πεπερασμένων διαφορών στο βάθος του διατρήματος. .....	129
Σχήμα 84 Διάγραμμα σύγκρισης κατανομής αξονικού φορτίου στα δύο μοντέλα (plain strain-αξονοσυμμετρικό). .....	129
Σχήμα 85 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου. ....	130
Σχήμα 86 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ). ....	130
Σχήμα 87 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου. ....	131
Σχήμα 88 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ). ....	131
Σχήμα 89 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ) για τιμές μέτρου ελαστικότητας ενέματος E1 και E2. ....	132
Σχήμα 90 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου. ....	133
Σχήμα 91 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου-μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ). ....	133
Σχήμα 92 Διαρροή ενέματος που ξεκινά από το άκρο του διατρήματος για μετατόπιση 14.3 mm. ....	134
Σχήμα 93 Διαρροή ενέματος που ξεκινά από το άκρο του διατρήματος για μετατόπιση των 20 mm. ....	134
Σχήμα 94 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου. ....	135
Σχήμα 95 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ). ....	135
Σχήμα 96 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου (ήλος μήκους 3 m). ....	137
Σχήμα 97 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ) (ήλος μήκους 3 m). ....	137
Σχήμα 98 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την μετατόπιση των 20mm. ....	138
Σχήμα 99 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 3 m - Διαρροή ενέματος. ....	138
Σχήμα 100 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου στον ήλο μήκους 3m με $C_r=0Pa$ . .....	139
Σχήμα 101 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ). ....	139
Σχήμα 102 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την μετατόπιση των 20 mm. .....	140

Σχήμα 103 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 3 m – Διαρροή ενέματος.....	140
Σχήμα 104 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την παραμόρφωση των 20mm σε ήλο μήκους 5m.....	141
Σχήμα 105 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 5 m – Διαρροή ενέματος – $C_r=0.5C$ .....	142
Σχήμα 106 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 3 m – Διαρροή ενέματος - $C_r=0$ .....	142
Σχήμα 107 Απεικόνιση των μοντέλων στο FLAC2D.....	146
Σχήμα 108 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την επιβολή τάσεως ίση με 500 MPa για πέτρωμα με GSI 50, παραμένουσα συνοχή ενέματος $C_r=0.1C$ , $C_r=C$ , $C_r=0$ και $w/c=0.32$ , $w/c=0.41$ , $w/c=0.52$ .....	149
Σχήμα 109 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την επιβολή τάσεως 500 MPa σε πέτρωμα με GSI=50 και για παραμένουσα συνοχή ενέματος $C_r=0.1C$ , $C_r=C$ , $C_r=0$ (νερό/τσιμέντο = 0.32, 0.41 και 0.52).....	150
Σχήμα 110 Βάθος διαρροής ενέματος σε συσχέτιση με τον λόγο της παραμένουσας συνοχής προς την αρχική.....	151
Σχήμα 111 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για GSI=50 και για γωνία τριβής του ενέματος $\phi_b$ , $2\phi_b$ και $\phi=0^\circ$ ( $w/c=0.32$ , $w/c=0.41$ , $w/c=0.52$ ).....	154
Σχήμα 112 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για GSI=50 και για γωνία τριβής του ενέματος $\phi_b$ , $2\phi_b$ και $\phi=0$ (νερό/τσιμέντο=0.32, νερό/τσιμέντο=0.41, νερό/τσιμέντο=0.52).....	155
Σχήμα 113 Βάθος διαρροής ενέματος όταν η γωνία τριβής είναι $0^\circ$ , $\phi_b$ και $2\phi_b$ .....	156
Σχήμα 114 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία $w/c$ του ενέματος ίση με 0.32, 0.41 και 0.52 όταν GSI=50 και η συνοχή του ενέματος είναι αυξημένη κατά 30% και μειωμένη κατά 30%.....	158
Σχήμα 115 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία $w/c$ του ενέματος ίση με 0.32, 0.41, 0.52 όταν GSI=50 και η συνοχή του ενέματος είναι αυξημένη κατά 30% και μειωμένη κατά 30%.....	159
Σχήμα 116 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία $w/c$ του ενέματος ίση με 0.32, 0.41 και 0.52 όταν GSI=50 και α) $m_i=5$ , β) $m_i=10$ , γ) $m_i=20$ .....	161
Σχήμα 117 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία $w/c$ του ενέματος 0.32,0.41 και 0.52 όταν GSI=50 και $m_i=5$ , $m_i=10$ , $m_i=20$ .....	162

Σχήμα 118 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c ενέματος =0.52 όταν το GSI είναι ίσο με 35, 50 και 65. ....	165
Σχήμα 119 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c ενέματος =0.32, 0.41 και 0.52 όταν το GSI είναι ίσο με 35, 50 και 65. ..	166
Σχήμα 120 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC <sup>2D</sup> – Πέτρωμα με αρχική φόρτιση.....	168
Σχήμα 121 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC <sup>2D</sup> – Στάδιο τοποθέτησης ήλου. ....	169
Σχήμα 122 Απεικόνιση τμήματος μοντέλου κατά την εξόλκευση (αντικατάσταση πλάκας από στηρίξεις). ....	169
Σχήμα 123 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=90.....	171
Σχήμα 124 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=90.....	171
Σχήμα 125 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=70.....	172
Σχήμα 126 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=70.....	172
Σχήμα 127 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=50.....	173
Σχήμα 128 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=50.....	173
Σχήμα 129 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=30.....	174
Σχήμα 130 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=30.....	174
Σχήμα 131 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC <sup>3D</sup> – Στάδιο τοποθέτησης ήλου. ....	176
Σχήμα 132 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC <sup>3D</sup> – Στάδιο τοποθέτησης ήλου. ....	177
Σχήμα 133 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=90.....	178
Σχήμα 134 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=90. ....	179

Σχήμα 135 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=90.....	179
Σχήμα 136 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ κατά την εξόλκευση του ήλου - GSI=90.....	180
Σχήμα 137 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ κατά την εξόλκευση του ήλου - GSI=90.....	180
Σχήμα 138 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=70.....	181
Σχήμα 139 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=70.....	181
Σχήμα 140 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε διάφορες μετατοπίσεις - GSI=70. ....	182
Σχήμα 141 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=70.....	182
Σχήμα 142 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε διάφορες μετατοπίσεις - GSI=70. ....	183
Σχήμα 143 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=50.....	184
Σχήμα 144 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=50.....	184
Σχήμα 145 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε μετατόπιση 0.2mm και 0.4mm - GSI=50.....	185
Σχήμα 146 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=50.....	185
Σχήμα 147 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε μετατόπιση 0.2 mm και 0.4 mm - GSI=50.....	186
Σχήμα 148 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI 30.....	186
Σχήμα 149 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=30.....	187

Σχήμα 150 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=30.....	187
Σχήμα 151 Κατανομή διατμητικής τάσης $\sigma_{xz}$ κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε μετατόπιση ίση με 0.2mm - GSI=30.....	188
Σχήμα 152 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης $\sigma_{yz}$ και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=30.....	188
Σχήμα 153 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του και για πέτρωμα με GSI=90. ....	189
Σχήμα 154 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου ίσο με 500 kN κατά μήκος ήλου 3m - Πέτρωμα με GSI=90. ....	190
Σχήμα 155 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=90. ....	191
Σχήμα 156 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN - πέτρωμα με GSI=90. ....	191
Σχήμα 157 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του και για πέτρωμα με GSI=70. ....	192
Σχήμα 158 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου ίσο με 500 kN κατά μήκος ήλου 3m - Πέτρωμα με GSI=70. ....	192
Σχήμα 159 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=70. ....	193
Σχήμα 160 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN - πέτρωμα με GSI=70. ....	193
Σχήμα 161 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=50. ....	194
Σχήμα 162 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου ίσο με 500 kN κατά μήκος ήλου 3m - πέτρωμα με GSI=50. ....	194
Σχήμα 163 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=50. ....	195
Σχήμα 164 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN - πέτρωμα με GSI=50. ....	195

Σχήμα 165 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίο κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του και για πέτρωμα με GSI 30.....	196
Σχήμα 166 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση των 0.4mm - πέτρωμα με GSI=30.....	196



# **1 Εισαγωγή**

## **1.1 Εισαγωγή**

Μία κατηγορία μέτρων υποστήριξης ευρείας χρήσεως είναι τα συστήματα ηλώσεων. Η χρήση τους στον μεταλλευτικό τομέα ξεκίνησε το 1890, ενώ συστηματική χρήση τους καταγράφηκε το 1927 στο St Joseph Lead Mine στο Missouri των ΗΠΑ. Αργότερα, την δεκαετία του 1940, εφαρμόστηκαν και σε σήραγγες στις ΗΠΑ και στην Αυστραλία. Οι ήλοι χρησιμοποιήθηκαν και βελτιώθηκαν περαιτέρω το 1947, όταν Αυστραλοί μηχανικοί άρχισαν να πειραματίζονται με ήλους με διευρυνόμενο κέλυφος μήκους 4m κατά την διάρκεια εργασιών στα Snowy Mountains (Windsor and Thompson, 1993).

Στα επόμενα χρόνια, το εύρος εφαρμογής των συστημάτων ήλωσης διευρύνθηκε σημαντικά, κυρίως χάρη στην πρόοδο την οποία γνώρισε η επιστήμη της μηχανικής των πετρωμάτων, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας της μάζας του πετρώματος, τον προσδιορισμό των απαιτήσεων σε υποστήριξη, και στην αύξηση της τάσης προς υποστήριξη των υπόγειων εκσκαφών με περισσότερα σύγχρονα μέσα. Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη νέων συστημάτων ήλωσης και η εξέλιξη - βελτίωση των υφισταμένων, οδήγησε στην αποδοχή τους από τη μεταλλευτική βιομηχανία και στη συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση τους.

Σήμερα, τα συστήματα ήλωσης αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα μέσα υποστήριξης υπογείων έργων, αφενός μεν διότι εξυπηρετούν σε ικανοποιητικό βαθμό τις απαιτήσεις προς υποστήριξη των περιβαλλόντων πετρωμάτων και αφετέρου γιατί αποτελούν πιο οικονομικό σύστημα υποστήριξης συγκριτικά με άλλα συστήματα.

## **1.2 Γιατί επιλέγονται οι ηλώσεις**

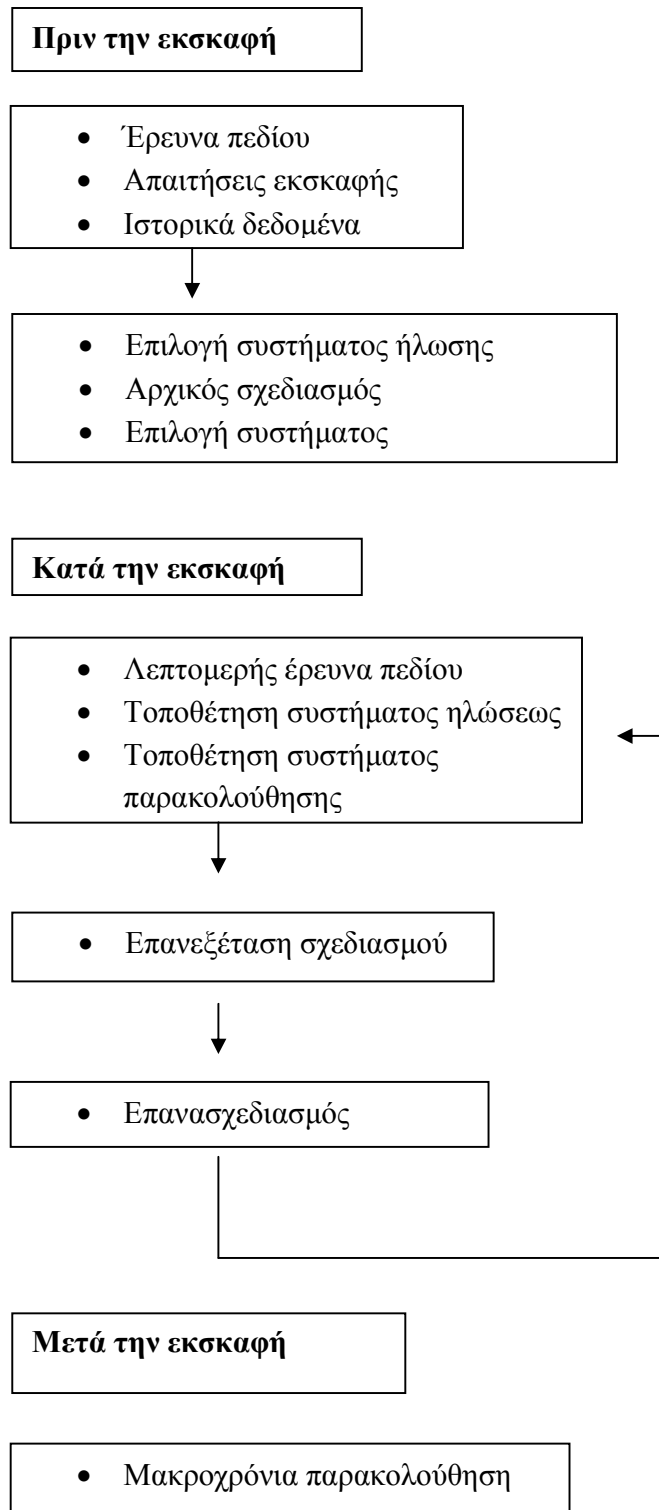
Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού ενός συστήματος υποστήριξης είναι να ενισχύσει την αυτοϋποστήριξη της βραχομάζας. Αυτό ισχύει για τα συστήματα ενίσχυσης βραχομάζας όπου οι ήλοι αποτελούν εσωτερική υποστήριξη, καθώς επίσης και για συστήματα υποστήριξης όπως πχ. τα χαλύβδινα πλαίσια, που υποστηρίζουν την βραχομάζα εξωτερικά. Οι ήλοι ενισχύουν και ενεργοποιούν την εσωτερική αντοχή της βραχομάζας, ενώ τα χαλύβδινα πλαίσια ή το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα περιορίζουν τις μετακινήσεις της βραχομάζας εξωτερικά. Και τα δύο συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την προσωρινή καθώς επίσης και για την μόνιμη υποστήριξη βράχου.

Οι ήλοι είναι το πιο σύνηθες μέτρο για τη σταθεροποίηση βράχου, κυρίως στη μεταλλευτική βιομηχανία. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τη διαδεδομένη χρήση τους. Μερικοί από αυτούς, είναι ότι οι ήλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε είδος γεωμετρίας εκσκαφής, τοποθετούνται εύκολα, είναι σχετικά φθηνοί και η τοποθέτηση τους μπορεί να είναι πλήρως μηχανοποιημένη (Stillborg,1994).

Επιπλέον, μετά την ανατίναξη και απομάκρυνση των επισφαλών τεμαχίων, η άμεση τοποθέτηση των ηλώσεων είναι πολύ σημαντική από μηχανικής απόψεως. Χρησιμοποιώντας ήλους, η πυκνότητα τους, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των ηλώσεων και το μήκος τους, μπορεί να τροποποιείται κάτι που απαιτείται συχνά από τις τοπικές ιδιότητες της βραχομάζας. Άλλο ένα πλεονέκτημα, είναι ότι οι ήλοι μπορούν να συνδυαστούν και με επιπρόσθετα μέτρα υποστήριξης, όπως πλέγματα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα γεγονός που συναντάται σε πολλές μεθόδους υπόγειας εκσκαφής και υποστήριξης όπως είναι η μέθοδος NATM (Stillborg,1994).

Το σύνολο σχεδόν των ανωτέρω χαρακτηριστικών των συστημάτων ήλωσης αποτελούν συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων συστημάτων υποστήριξης. Το γεγονός αυτό τα καθιστά, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, πρώτη επιλογή για την υποστήριξη των υπόγειων μεταλλευτικών εκσκαφών. Όμως είναι επιβεβλημένο, προκειμένου να αποφευχθούν δυσάρεστες συνέπειες, να επιλέγεται προσεκτικά και με σωστό σχεδιασμό ο κατάλληλος τύπος συστήματος ήλωσης, ο οποίος να παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά στις εκάστοτε συνθήκες, και επιπλέον να διενεργούνται επιτόπου δοκιμές ελέγχου με τις οποίες να τεκμηριώνεται και να πιστοποιείται η αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του.

Για την επίτευξη των ανωτέρω είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς της μάζας του πετρώματος, καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες των διαθέσιμων μέσων υποστήριξης. Τα ανωτέρω επιβάλλουν τη διενέργεια συστηματικής παρακολούθησης της συμπεριφοράς της μάζας του πετρώματος, καθώς επίσης και του συστήματος κοχλίωσης. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το γεγονός ότι η εργασία της τοποθέτησης ήλωσης και της υποστήριξης γενικότερα, συνδυάζεται και αλληλεπιδρά με την εργασία της μηχανικής απόσπασης επισφαλών όγκων, η οποία σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά της μάζας του πετρώματος και την κατάσταση της.



Σχήμα 1 Διάγραμμα ροής ηλώσεως σύμφωνα με τον Stillborg (1994).

### 1.3 Τύποι Ήλων

Με την συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ηλώσεων, διαμορφώθηκαν πολλοί τύποι που μπορούν να ανταπεξέρχονται στις διάφορες ιδιαιτερότητες του πετρώματος που πρέπει να ενισχύσουν. Οι αντιπροσωπευτικότεροι τύποι είναι (Stillborg, 1994):

- Ήλοι μηχανικής αγκύρωσης
- Ήλοι που αγκυρώνονται με την χρήση ενέματος ή ρητίνης
- Ήλοι αγκύρωσης τριβής.

#### 1.3.1 Ήλοι μηχανικής αγκύρωσης

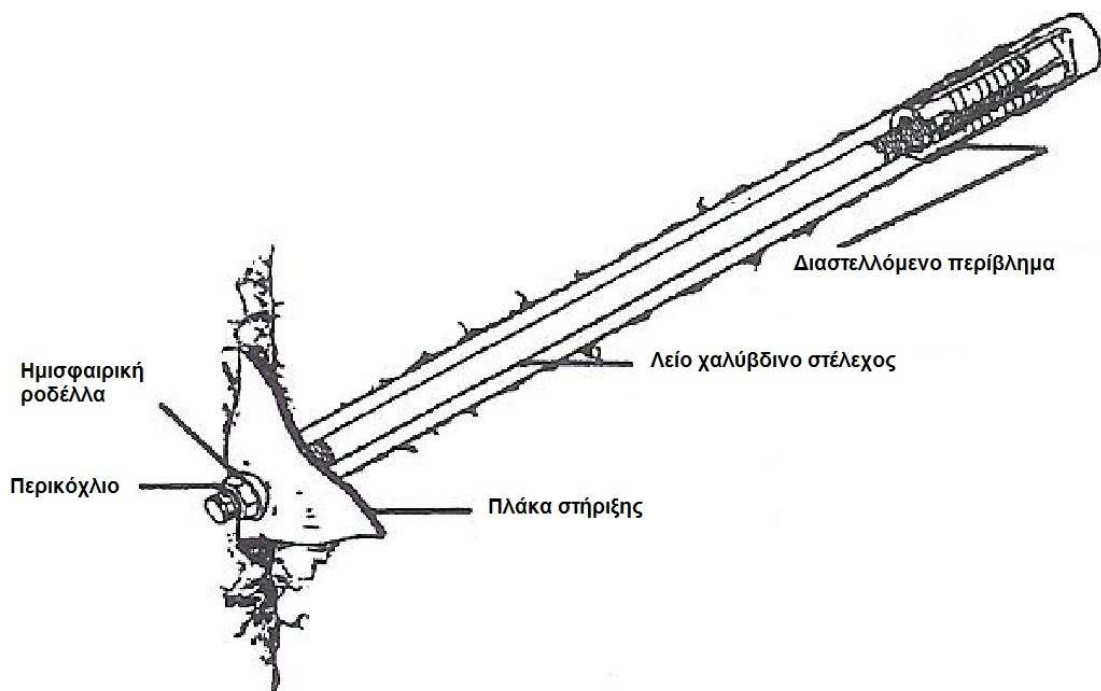
Ο τύπος με μηχανικά διαστελλόμενο κωνικό περίβλημα αποτελεί την πλέον συνήθη μορφή ήλου της συγκεκριμένης κατηγορίας. Στην περίπτωση αυτή σφήνα που είναι προσαρμοσμένη στο κυρίως σώμα του ήλου σύρεται μέσα στο κωνικό περίβλημα και το διογκώνει, καθώς ο ήλος περιστρέφεται, επιφέροντας άμεση αγκύρωση του με τα τοιχώματα της οπής προσαρμογής, με τη βοήθεια της τριβής αλλά και της προσαρμογής στις ανωμαλίες της επιφάνειας. Η τελευταία είναι η πιο σημαντική για την πλήρη απόδοση του ήλου. Έτσι, στους πολύ σκληρούς βραχώδεις σχηματισμούς οι ήλοι αυτού του τύπου δεν χρησιμοποιούνται, αφού το πέτρωμα δεν επιτρέπει αυτή τη λειτουργία (δεν υπάρχουν στην ουσία ανωμαλίες για "κλείδωμα" του διογκούμενου κωνικού περιβλήματος). Συνεπώς η χρήση τους έχει καλή εφαρμογή σε μέτριας σκληρότητας έως σκληρά πετρώματα.

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα, αποτελούν φθηνές σχετικά κατασκευές, με άμεση δράση αμέσως μετά την εγκατάσταση και με πολύ καλή προσαρμογή σε σκληρά πετρώματα όποτε ανταποκρίνονται σε υψηλές φορτίσεις.

Τα μειονεκτήματα τους είναι ο περιορισμός της χρήσης τους μόνο σε μέτριας σκληρότητας έως σκληρά πετρώματα, η δυσκολία στην εγκατάσταση τους, η απώλεια της ενισχυτικής τους ιδιότητας λόγω δονήσεων που προέρχονται από εκτόνωση αερίων ή από αποφλοίωση τεμαχιδίων κάτω από την πλάκα στερέωσης λόγω υψηλών δυνάμεων επαφής. Χρησιμοποιούνται μόνο για προσωρινή υποστήριξη εκτός αν είναι προστατευμένα από διάβρωση ή/και εφαρμόζεται μετένεση (post-grouting).

Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά	Μονάδες SI	Μετρικό σύστημα	Αμερικάνικο σύστημα
Προσδιορισμός ποιότητας χάλυβα	700 N/mm <sup>2</sup>	70 kp/mm <sup>2</sup>	102 kpsi
Διάμετρος χάλυβα	16 mm	16 mm	5/8 in
Όριο διαρροής χάλυβα	140 kN	14 tn	15.5 tn
Οριακό φορτίο χάλυβα	180 kN	18 tn	20 tn
Οριακή αξονική τροπή χάλυβα	14%	14%	14%
Βάρος ήλου χωρίς την πλάκα στερέωσης και το περικόχλιο	2 kg/m	2 kg/m	1.34 lb/ft
Μήκος ήλου		Όσο μήκος απαιτείται	
Προτεινόμενη διάμετρος διατρήματος	35-38 mm	35-38 mm (Κρίσιμη)	1 3/8 in

Πίνακας 1 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου με μηχανικά διαστελλόμενο κωνικό περίβλημα (Stillborg, 1994).



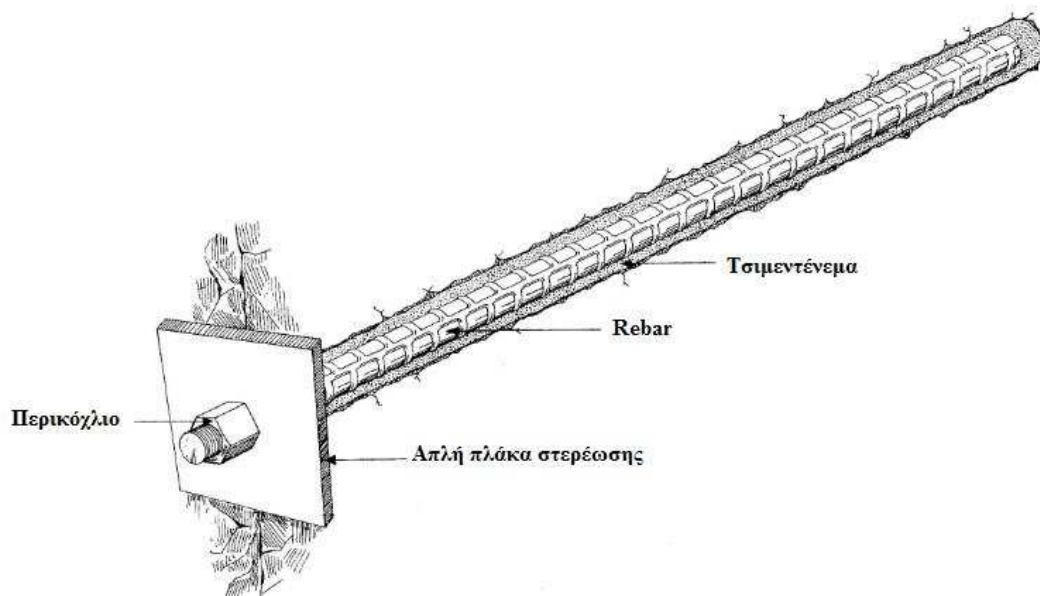
Σχήμα 2 Ήλος μηχανικής αγκύρωσης (Stillborg, 1994).

### 1.3.2 Ήλοι που αγκυρώνονται με την χρήση ενέματος ή ρητίνης

Οι ήλοι του τύπου αυτού είναι ευρείας χρήσεως τα τελευταία 40 χρόνια τόσο στη μεταλλευτική όσο και στα έργα πολιτικού μηχανικού. Αυτοί που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι της πλήρους ενεμάτωσης, με ένεμα τσιμέντο ή ρητίνη. Συνεπώς, στην περίπτωση των ήλων αυτών οι μηχανισμοί αγκύρωσης είναι τρεις, η τριβή, η προσαρμογή στις ανωμαλίες της επιφάνειας και η χημική επικόλληση, με πλέον σημαντικούς πάντως τους δύο πρώτους.

Η ενεμάτωση μπορεί να γίνεται σε όλο το μήκος του ήλου ή σε τμήμα μόνο αυτού. Στην τελευταία περίπτωση η αντιδιαβρωτική προστασία γίνεται συνήθως με τη χρήση θερμοσυστελλόμενου πλαστικού περιβλήματος.

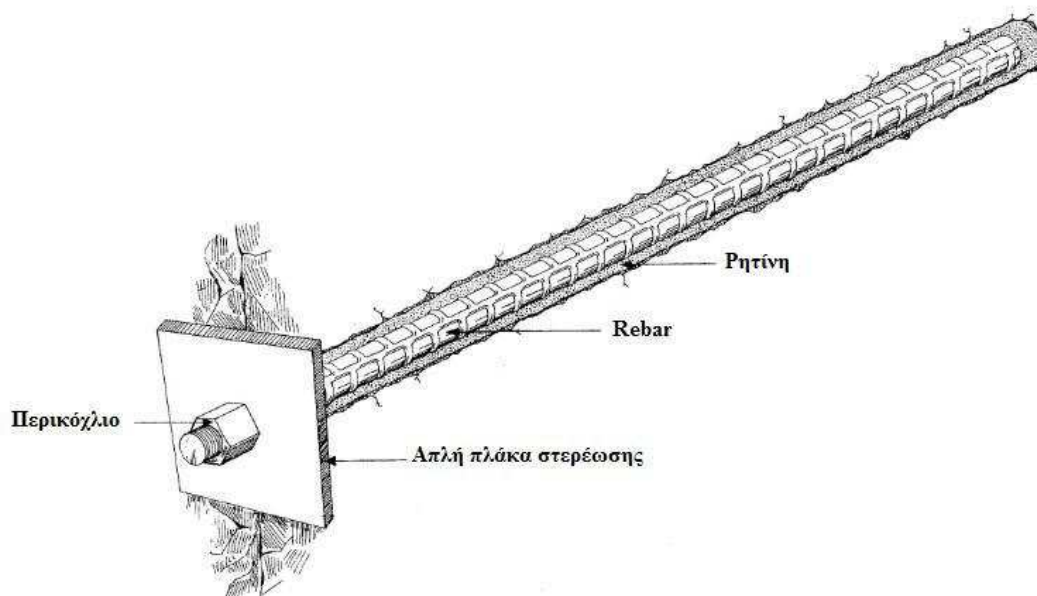
Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα τους, αποτελούν καλό σύστημα αγκύρωσης, με αυξημένη φέρουσα ικανότητα σε σκληρά πετρώματα και στην περίπτωση χρήσης ρητίνης δίνουν σχεδόν άμεση υποστήριξη με την τοποθέτηση. Στα μειονεκτήματα μπορεί να θεωρηθούν ο χρόνος που απαιτείται για να πήξει το τσιμέντο, η αδυναμία χρήσης σε οπές τοποθέτησης που υπάρχει νερό, ο περιορισμένος χρόνος ζωής των ρητινών σε περίπτωση μακροχρόνιας χρήσης αλλά και οι δυσκολίες χρήσης αυτής σε υπόγεια έργα λόγω ρυπογόνων και ανθυγιεινών συστατικών. Βασικά συστατικά ενός τυπικού ενέματος ρητίνης είναι: πολυεστερική ρητίνη 28.5%, φίλλερ (κονιορτοποιημένος ασβεστόλιθος), 66%, επιταχυντής 0.5 και καταλύτης.



Σχήμα 3 Ήλος μεταλλικής ράβδου με ένεμα (Stillborg, 1994).

Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά	Μονάδες SI	Μετρικό σύστημα	Αμερικάνικο σύστημα
Προσδιορισμός ποιότητας χάλυβα	570 N/mm <sup>2</sup>	58 kp/mm <sup>2</sup>	83 kpsi
Διάμετρος χάλυβα	20 mm	20 mm	7/9 in
Όριο διαρροής χάλυβα	120 kN	12 tn	13 tn
Οριακό φορτίο χάλυβα	180 kN	18 tn	20 tn
Οριακή αξονική τροπή χάλυβα	15%	15%	15%
Βάρος ήλου χωρίς την πλάκα στερέωσης και το περικόγλιο	2.6 kg/m	2.6 kg/m	1.75 lb/ft
Μήκος ήλου		Όσο μήκος απαιτείται	
Προτεινόμενη διάμετρος διατρήματος	35±5 mm	35±5 mm (Κρίσιμη)	1 3/8 in

Πίνακας 2 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά μεταλλικής ράβδου με ένεμα (Stillborg, 1994).



Σχήμα 4 Ήλος μεταλλικής ράβδου με ρητίνη (Stillborg, 1994).

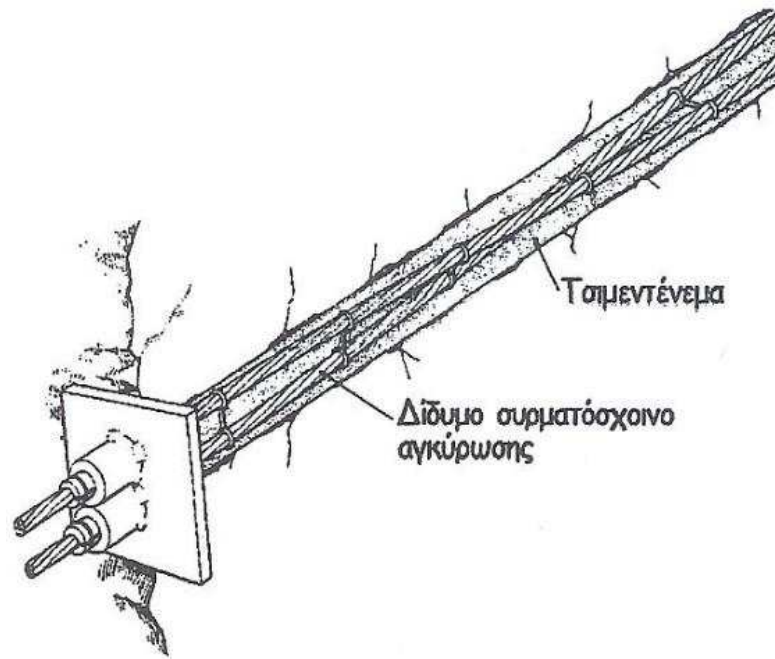
<b>Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά</b>	<b>Μονάδες SI</b>	<b>Μετρικό σύστημα</b>	<b>Αμερικάνικο σύστημα</b>
Προσδιορισμός ποιότητας χάλυβα	570 N/mm <sup>2</sup>	58 kp/ mm <sup>2</sup>	83 kpsi
Διάμετρος χάλυβα	20 mm	20 mm	7/9 in
Όριο διαρροής χάλυβα	120 kN	12 tn	13 tn
Οριακό φορτίο χάλυβα	180 kN	18 tn	20 tn
Οριακή αξονική τροπή χάλυβα	15%	15%	15%
Βάρος ήλου χωρίς την πλάκα στερέωσης και το περικόχλιο	2.6 kg/m	2.6 kg/m	1.75 lb/ft
Μήκος ήλου		Όσο μήκος απαιτείται	
Προτεινόμενη διάμετρος διατρήματος	Max 30 mm	Max 30 mm (Κρίσιμη)	Max 1 1/8 in

Πίνακας 3 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά μεταλλικής ράβδου με ρητίνη (Stillborg, 1994).

Εξέλιξη των παραπάνω τύπων αποτελεί η χρήση μεταλλικών καλωδίων αντί μεταλλικής ράβδου για το σώμα του ήλου. Το μήκος μπορεί να είναι οποιοδήποτε, ενώ είναι φθηνότερα και επιδέχονται αυξημένες φορτίσεις. Στα μειονεκτήματα εντάσσονται ο χρόνος που απαιτείται για την υποδοχή των τελικών φορτίων, λόγω των διαδικασιών πήξεως του τσιμέντου, καθώς και η αδυναμία χρήσης σε οπές με νερό.

Η χρήση τους στην μεταλλευτική διαφέρει πολύ από την εφαρμογή τους σε τεχνικά έργα. Στην μεταλλευτική τοποθετούνται κατ' εξοχήν χωρίς προένταση και σαν προσωρινοί ήλοι πλήρους ενεμάτωσης, ενώ στα τεχνικά έργα σαν μόνιμοι με προεντεταμένα καλώδια. Το ένεμα που χρησιμοποιείται είναι αποκλειστικά τσιμεντένεμα.





Σχήμα 5 Ήλος με μεταλλικά καλώδια (Stillborg, 1994).

Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά	Μονάδες SI	Μετρικό σύστημα	Αμερικάνικο σύστημα
Προσδιορισμός ποιότητας χάλυβα	1950 N/mm <sup>2</sup>	198 kp/mm <sup>2</sup>	283 kpsi
Διάμετρος καλωδίου	2*15.2 mm	2*15.2 mm	2*5/8 in
Όριο διαρροής καλωδίου	500 kN	50 tn	55 tn
Οριακό φορτίο καλωδίου	500 kN	50 tn	55 tn
Οριακή αξονική τροπή καλωδίου	4.8 %	4.8 %	4.8 %
Βάρος καλωδίου	2.1 kg/m	2.1 kg/m	1.41 lb/ft
Μήκος καλωδίου		Όσο μήκος απαιτείται	
Προτεινόμενη διάμετρος διατρήματος	48-64 mm	48-64 mm (Κρίσιμη)	2 - 2 1/2 in

Πίνακας 4 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου με δίδυμο συρματόσχοινο αγκύρωσης (Stillborg, 1994).

### 1.3.3 Ήλοι αγκύρωσης τριβής

Οι ηλώσεις αγκύρωσης τριβής (ήλοι χωρίς ενεμάτωση) αποτελούν πρόσφατη εξέλιξη στις τεχνικές ενίσχυσης βραχομαζών και διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους. Τις ηλώσεις τύπου Split Set και τις ηλώσεις τύπου Swellex. Αυτού του τύπου οι ηλώσεις αποτελούν το μόνο είδος κατά το οποίο το φορτίο του σχηματισμού μεταφέρεται στο στοιχείο ενίσχυσης, χωρίς τη χρήση βοηθητικού μέσου, όπως η μηχανική διαστολή, το ένεμα ή η ρητίνη. Επιπλέον, η πλήρης επαφή με το σχηματισμό εμποδίζει την ελεύθερη κίνηση του υπόγειου νερού κατά μήκος του ήλου. Βέβαια στους ήλους τύπου Split Set η κίνηση του νερού γίνεται ελεύθερα από το εσωτερικό τους (Stillborg, 1994). Γενικά όμως σε περιπτώσεις που η εγκατάσταση του ήλου θα είναι μακροχρόνιας χρήσης θα απαιτηθεί οπωσδήποτε αντιδιαβρωτική προστασία (ελαστική επικάλυψη), που δεν θα ρωγματώνεται αλλά θα ανέχεται τις όποιες παραμορφώσεις του στελέχους. Η προστασία αυτή, αν έχει προηγηθεί της εγκατάστασης, είναι μεν εύκολο να διατηρηθεί στους ήλους Swellex ενώ σε αυτούς τύπου Split Set η διαδικασία εγκατάστασης την καταστρέφει. Στην τελευταία περίπτωση κυρίως, αλλά και γενικά για μόνιμη χρήση του ήλου απαιτείται διπλή αντιδιαβρωτική προστασία, γαλβάνισμα ή και χρήση ενέματος/ρητίνης. Στην τελευταία περίπτωση εξυπακούεται το ακριβές κεντράρισμα του ήλου για την επιβολή του ενέματος ή της ρητίνης.

Οι κύριες διαφορές αναφέρονται στον μηχανισμό αγκύρωσης, στον τρόπο υποστήριξης, καθώς και στη διαδικασία εγκατάστασης.

#### 1.3.3.1 Ηλώσεις Split Set

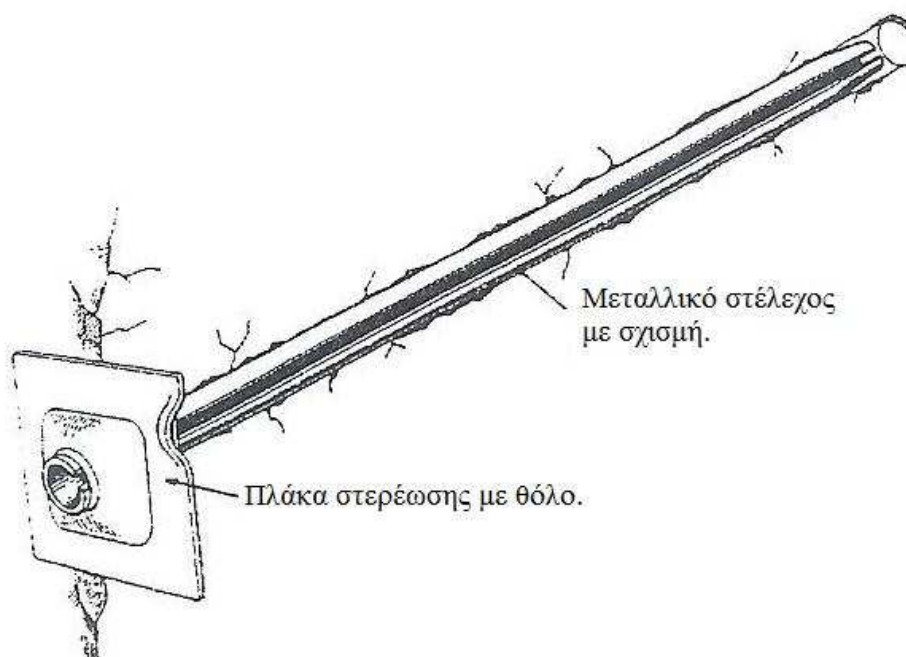
Στην περίπτωση ηλώσεων τύπου Split Set, ο ήλος που χρησιμοποιείται είναι απλός και αποτελείται από μία χαλύβδινη ράβδο υψηλής αντοχής με μια επιμήκη σχισμή και την πλάκα στερέωσης. Η προσαρμογή της ράβδου στην πλάκα γίνεται με μια ημισφαιρική ροδέλλα, ενώ η σχισμή της επιτρέπει να ασκεί πίεση στο περιβάλλον πέτρωμα όταν ωθείται μέσα σε οπή ελαφρά μικρότερης διαμέτρου, εξασφαλίζοντας έτσι πλήρη εφαρμογή.

Ο μηχανισμός αγκύρωσης σε αυτή την περίπτωση επιτρέπει στον ήλο να φέρει φορτίο που αντιστοιχεί περίπου στο μισό της εφελκυστικής αντοχής της ράβδου πριν αρχίσει η ολίσθηση της. Επομένως μπορεί να δέχεται μεγάλες μετατοπίσεις χωρίς να αστοχεί. Η εφαρμογή γίνεται καλύτερη με το χρόνο και τις μετακινήσεις του πετρώματος οπότε δεν χρειάζεται καμιά πρόσθετη σύσφιξη. Οι ηλώσεις αυτές εφαρμόζονται ευρέως τόσο στη μεταλλευτική, αλλά έχουν περιορισμένη χρήση στα μεγάλα τεχνικά έργα.

Γενικά, παρουσιάζουν απλή εφαρμογή, δίνουν άμεση υποστήριξη με την εγκατάσταση που δεν απαιτεί πολύπλοκα μηχανήματα και δεν εμποδίζουν την εφαρμογή πλέγματος. Στα μειονεκτήματα μπορεί να ενταχθούν το κόστος, η δυσκολία στην επιτυχή εγκατάσταση μεγάλου μήκους τέτοιων ήλων, αλλά και η αντίσταση στη διάβρωση που απαγορεύει τη μακροχρόνια ωφέλιμη χρήση.

Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά	Μονάδες SI	Μετρικό σύστημα	Αμερικάνικο σύστημα
Διάμετρος ράβδου	39/46mm	70 kp/ mm <sup>2</sup>	102 kpsi
Όριο διαρροής χαλύβδινης ράβδου	90/135 kN	9/13.5 tn	10/15 tn
Οριακό φορτίο χαλύβδινης ράβδου	110/163 kN	11/16.3tn	12/18 tn
Οριακή αξονική τροπή μεταλλικού στελέχους	16/16%	16/16%	16/16%
Βάρος ήλου χωρίς την πλάκα στερέωσης	1.8/2.8 kg/m	1.8/2.8 kg/m	1.2/1.9 lb/ft
Μήκος ήλου	0.9-3/0.9-3.6 m	0.9-3/0.9-3.6 m	3-10/3-12 ft
Προτεινόμενη διάμετρος διατρήματος	35-38/41-45 mm	35-38 mm (Κρίσιμη)	1 3/8 in

Πίνακας 5 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου τύπου Split Set (Stillborg, 1994).



Σχήμα 6 Ήλος αγκύρωσης τριβής τύπου Split Set (Stillborg, 1994).

### 1.3.3.2 Ηλώσεις Swellex

Οι ήλοι τύπου Swellex πρωτοεμφανίστηκαν στην αγορά το 1980 και αποτελούνται από πτυχωμένο μεταλλικό στοιχείο (ράβδος) με λεπτά τοιχώματα, τα άκρα του οποίου εγκλωβίζονται και στεγανοποιούνται με σχετική συγκόλληση μέσα σε μεταλλικές θήκες. Η μία από αυτές φέρει μικρή οπή που χρησιμοποιείται για την εισπίεση του νερού υψηλής πίεσης που θα διογκώσει το σωλήνα. Κατά τη διάρκεια της διόγκωσης ο ήλος συμπιέζει το σχηματισμό στα τοιχώματα του διατρήματος και προσαρμόζεται στις ανωμαλίες της επιφάνειας.

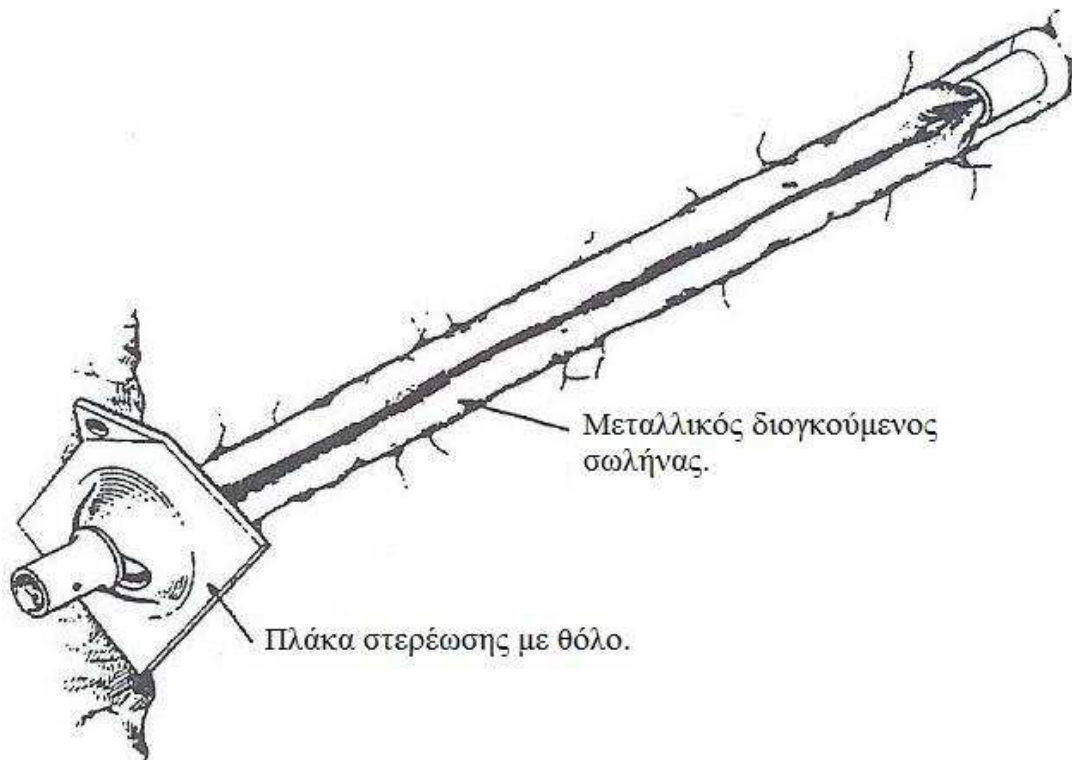
Ο μηχανισμός αγκύρωσης των ήλων τύπου Swellex είναι αποτέλεσμα τριβής και μηχανικής συναρμογής στη διεπιφάνεια βραχομάζας και ήλου. Ο συγκεκριμένος ήλος αρχίζει να ολισθαίνει όταν υποστεί την εφαρμογή φορτίου που προσεγγίζει την εφελκυστική αντοχή του υλικού κατασκευής του. Έτσι μπορεί να δέχεται μεγάλες μετατοπίσεις χωρίς αστοχία. Στην περίπτωση σκληρών βραχωδών μαζών, τον κύριο ρόλο στην αγκύρωση διαδραματίζει η μηχανική συναρμογή στην τραχεία επιφάνεια της οπής εγκατάστασης. Αντίθετα στους μαλακούς βραχώδεις σχηματισμούς η τριβή είναι εκείνη που παίζει το σοβαρότερο ρόλο στην ικανότητα αγκύρωσης του ήλου.

Οι ηλώσεις τύπου Swellex εγκαθίστανται γρήγορα και εύκολα, δίνουν άμεση υποστήριξη με την εγκατάσταση και μπορεί να τύχουν εφαρμογής σε ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών. Επιπλέον, η εγκατάσταση προκαλεί μείωση στο μήκος του ήλου, κάτι που επιφέρει πλήρη εφαρμογή της πλάκας στερέωσης στην επιφάνεια του βράχου. Στα μειονεκτήματα μπορεί να ενταχθούν το αυξημένο κόστος, η αντίσταση στη διάβρωση που απαγορεύει τη μακροχρόνια ωφέλιμη χρήση άνευ δαπανηρής επένδυσης και τέλος η χρήση ειδικών μηχανημάτων κατά την εγκατάσταση όπως αντλίας, κλπ.

Πέρα από τους βραχώδεις σχηματισμούς, ηλώσεις χρησιμοποιούνται και σε περιπτώσεις εδαφικών υλικών, όπου αναλαμβάνουν δυνάμεις διάτμησης ή εφελκυσμού αλλά και ροπές κάμψης (για παράδειγμα στην περίπτωση συγκράτησης ολισθαίνουσας μάζας ή αντιστήριξης τεχνητού πρανού).

Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά	Μονάδες SI	Μετρικό σύστημα	Αμερικάνικο σύστημα
Διάμετρος σωλήνα	26/36mm	26/36mm	1 / 1 3/8 in
Όριο διαρροής χαλύβδινου σωλήνα	100/205 kN	10/20 tn	11/22 tn
Οριακό φορτίο χαλύβδινου σωλήνα	110/215 kN	11/22 tn	12/24 tn
Οριακή αξονική τροπή μεταλλικού στελέχους	20/15%	20/15%	20/15%
Βάρος ήλου χωρίς την πλάκα στερέωσης	2/4 kg/m	2/4 kg/m	1.34/2.68 lb/ft
Μήκος ήλου		Όσο μήκος απαιτείται	
Προτεινόμενη διάμετρος διατρήματος	35±4/48±4mm	35±4/48±4mm (Κρίσιμη)	1 3/8 / 17/8in

Πίνακας 6 Τυπικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ήλου τύπου Swellex (Stillborg, 1994).



Σχήμα 7 Ήλος αγκύρωσης τριβής τύπου Swellex (Stillborg, 1994).

### 1.3.3.3 Ήλοι απορρόφησης ενέργειας - D-bolt

Πρόκληση στις υπόγειες εκσκαφές είναι η σταθεροποίηση του πετρώματος που περιβάλλει ένα υπόγειο άνοιγμα. Η βασική διαφορά μεταξύ ενός πετρώματος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και ενός πετρώματος σε μεγάλο βάθος είναι η αύξηση των επί τούτου τάσεων του πετρώματος. Σαν συνέπεια της αύξησης των τάσεων, μπορεί να υπάρξει εκτίναξη βράχου (rock burst) σε σκληρά πετρώματα ή μεγάλες συνθλίψεις (squeezing) σε πετρώματα μαλακά και ασθενή. Έχει παρατηρηθεί πολλές φορές σε πολλά ορυχεία πως τέτοια φαινόμενα ξεκινούν σε βάθος περίπου 600-800 m κάτω από την επιφάνεια και είναι πιο έντονα σε βάθος 1000 m. Σε πολλά μεταλλεία στην Σουηδία, στον Καναδά, στην Δυτική Αυστραλία και στην Νότιο Αφρική διενεργούνται εργασίες σε βάθος μεγαλύτερο των 1000 m, μέχρι και 3000 m. Σε τέτοια βάθη, τα συνήθη μέτρα υποστήριξης δεν λειτουργούν επαρκώς σε τέτοιες συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, ήλοι πλήρους ενεμάτωσης χρησιμοποιούνται ακόμα σε ορυχεία μεγάλου βάθους για την αντιμετώπιση εκτινάξεων βράχων. Οι ήλοι πλήρους ενεμάτωσης έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν υψηλά φορτία αλλά δεν μπορούν να αντέξουν μεγάλη διαστολή του πετρώματος. Συνήθως, μπορούν μόνο να αντέξουν παραμόρφωση των 2-3cm. Η λογική της χρήσης ήλων είναι ότι μπορούν να στηρίξουν ικανοποιητικά ασταθή τεμάχια και να εμποδίσουν τυχόν καταπτώσεις. Η χρήση ήλων τύπου rebar θεωρείται ικανοποιητική σε μικρού βάθους έργα καθώς οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι μικρές και οι καταπτώσεις μπορούν να συμβούν κυρίως λόγω βαρύτητας. Σε βάθη που οι τάσεις είναι μεγάλες η χρήση τους είναι ακατάλληλη. Όταν χρησιμοποιούνται σε μαλακά και ασθενή πετρώματα συχνά παρατηρείται πως η πλάκα στήριξης φορτίζεται πάρα πολύ ή το σπείρωμα τους αστοχεί. Σε σκληρά πετρώματα, το πέτρωμα θρυμματίζεται και αποσπάται πίσω από την πλάκα με αποτέλεσμα ένα μέρος του ήλου να εξέχει της επιφάνειας του πετρώματος. Επίσης, έχει παρατηρηθεί πως σε βαθιά μεταλλεία παλιοί ήλοι αστοχούν εξαιτίας μικρής μετατόπισης ασυνεχιών λόγω διάτμησης. Η γρήγορη αστοχία των ήλων φανερώνει πως είναι πολύ άκαμπτοι για να αντέξουν την διαστολή πετρώματος με υψηλές τάσεις. Οι ήλοι τύπου Split Set παρ' όλα αυτά, αντέχουν σε μεγάλη διαστολή και μεγάλες παραμορφώσεις, αλλά έχουν χαμηλή ικανότητα ανάληψης φορτίων. Και οι δύο κατηγορίες ήλων, Split Set και rebar, είναι εξοπλισμός χαμηλής ενεργειακής απορρόφησης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 διαπιστώθηκε πως ο εξοπλισμός των μεταλλείων μεγάλου βάθους πρέπει να είναι σε θέση να μεταφέρει υψηλά φορτία και να αντέχει σε μεγάλες παραμορφώσεις, δηλαδή να είναι ικανός να απορροφά μεγάλα ποσά ενέργειας πριν αστοχήσει. Ο ήλος «cone bolt» είναι από τους πρώτους που κατασκευάστηκε για την αντιμετώπιση των εκτινάξεων βράχων. Οι ήλοι

τέτοιου τύπου έχουν θεωρηθεί ως εξοπλισμός δυναμικής υποστήριξης. Η χρήση εξοπλισμού απορρόφησης ενέργειας για δυναμική υποστήριξη πετρώματος αρχίζει να κερδίζει έδαφος σταδιακά, κυρίως στην μεταλλευτική.

Ο ήλος «D bolt» είναι ένας νέος τύπος υποστήριξης που απορροφά ενέργεια και εφευρέθηκε το 2006. Αυτού του τύπου ο ήλος διαφέρει από τους άλλους, καθώς φέρει πολλαπλά σημεία αγκύρωσης. Όλοι οι άλλοι ήλοι ενεργειακής απορρόφησης αγκυρώνονται σε δύο σημεία εντός του διατρήματος. Στους ήλους D το σύστημα πολλαπλών σημείων αγκύρωσης είναι αρκετά αξιόπιστο, καθώς αν αστοχήσει ένα τμήμα του ήλου δεν επηρεάζεται αρνητικά η ενίσχυση του πετρώματος που προσφέρουν τα υπόλοιπα τμήματα.

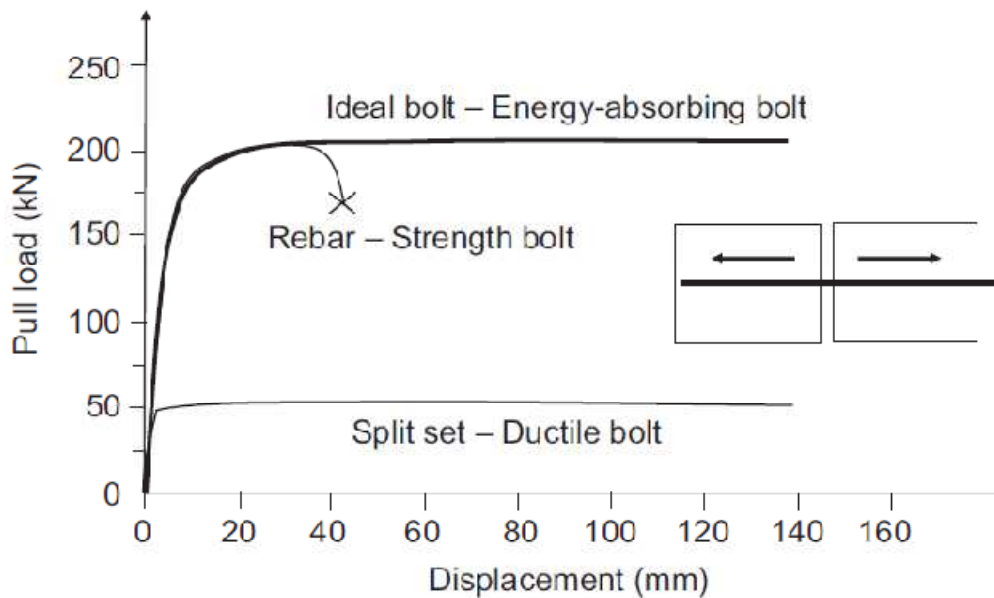
### **Ιδανικός ήλος**

Όλοι οι συνήθεις ήλοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες αναλόγως με τον μηχανισμό αγκύρωσης τους:

- μηχανικοί ήλοι με δύο σημεία αγκύρωσης (π.χ. ήλοι με διαστελλόμενο περίβλημα),
- ήλοι πλήρους ενεμάτωσης και
- ήλοι τριβής (π.χ. Split Set).

Ένας ιδανικός ήλος θα ήταν αυτός που θα είχε την αντοχή μίας ράβδου (rebar) και την ικανότητα παραμόρφωσης των ήλων Split Set και θα ενεργοποιείται σχεδόν αυτόματα σε ένα φορτίο σχεδόν ίσο με αυτό της αντοχής του υλικού. Επίσης, θα είχε την δυνατότητα παραμόρφωσης σε μεγάλα μήκη καθώς το φορτίο παραμένει υψηλό. Κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί. Παλαιότερη προσπάθεια έγινε με τον συνδυασμό δύο ήλων τύπου τριβής, Split Set και Swellex για ενισχυθεί η φέρουσα ικανότητα. Ο ήλος, προερχόμενος από τον συνδυασμό αυτών των δύο, είχε μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα από αυτή του Split Set, παρ' όλα αυτά ο μηχανισμός αγκύρωσης παρέμεινε να βασίζεται στην τριβή και για αυτό η φέρουσα ικανότητα επηρεαζόταν από τις τάσεις στην διεπιφάνεια ήλου – πετρώματος.

Οι ήλοι ακόμη χωρίζονται σε ήλους ενίσχυσης, όλκιμους ήλους ή ήλους απορρόφησης ενέργειας. Ήλοι ενίσχυσης είναι αυτοί που παρέχουν φορτίο υποστήριξης ίσο με αυτό της εγγενούς αντοχής του ήλου. Όλκιμοι ήλοι είναι αυτοί που αντέχουν μεγάλες παραμορφώσεις όπως οι Split Set και οι ήλοι απορρόφησης ενέργειας χαρακτηρίζονται από μεγάλη φέρουσα ικανότητα και δέχονται μεγάλες παραμορφώσεις.



Σχήμα 8 Οι τρεις κατηγορίες ήλων και η ικανότητά τους όσον αφορά την ανάληψη φορτίων και την αντοχή σε μεγάλες παραμορφώσεις.

### Σύντομη Περιγραφή Ήλων Απορρόφησης Ενέργειας

Η ιδέα για την κατασκευή τέτοιων ήλων προτάθηκε πρώτη φορά στην Νότιο Αφρική στις αρχές του 1990. Ο πρώτος ήλος αυτής της κατηγορίας ήταν ο ήλος ονομαζόμενος «cone bolt» και αποτελείται από μία λεία χαλύβδινη ράβδο με ένα πεπλατυσμένο κωνικό άνοιγμα τοποθετημένο (σφυρηλατημένο) στο ένα άκρο. Η ράβδος καλύπτεται από μία λεπτή στρώση λιπαντικής ουσίας όπως π.χ. κερί, έτσι ώστε να αποσπάται εύκολα από το ένεμα όταν υπόκειται σε εφελκυστικό φορτίο. Ο ήλος ενεματώνεται σε όλο το μήκος με τσιμεντένεμα ή ρητίνη εντός του διατρήματος. Η διαστολή του πετρώματος ανάμεσα στον κώνο και στην πλάκα του ήλου προκαλεί την ύπαρξη εφελκυστικού φορτίου στον ήλου. Ο κώνος σχεδιάζεται έτσι ώστε το κωνικό άκρο να υποχωρεί μέσα στο ένεμα όταν το φορτίο ξεπερνά μία προκαθορισμένη τιμή. Έτσι, ο ήλος λειτουργεί και απορροφά ενέργεια από το πέτρωμα. Οι ήλοι τέτοιου τύπου αρχικά σχεδιάστηκαν να λειτουργούν με τσιμεντένεμα και αργότερα διαμορφώθηκαν για να χρησιμοποιούνται και με ρητίνη. Ο τροποποιημένος ήλος (MCB – modified cone bolt) έχει μία μεταλλική λεπίδα στο κωνικό άκρο που χρησιμεύει και σαν αναδευτήρας της ρητίνης. Παρατηρήσεις επί τόπου έχουν δείξει ευαισθησία στο εξωτερικό σημείο αγκύρωσης του ήλου και στην πλάκα στήριξης. Η αγκύρωση μπορεί να χαθεί αν οι ρωγμές πίσω από την πλάκα ανοίξουν κάνοντας τον ήλο να χάσει την ενισχυτική του λειτουργία. Επίσης, έχει παρατηρηθεί πως



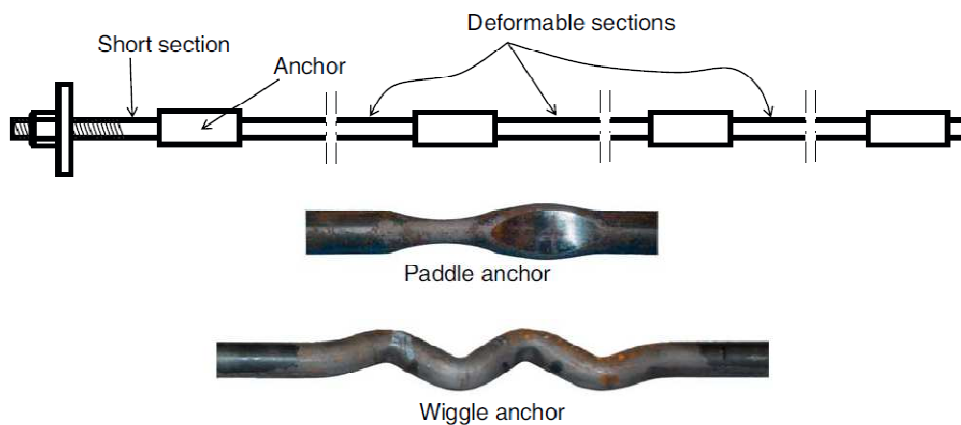
η ρητίνη αποτυγχάνει να πήξει υποδηλώνοντας έτσι πως η ανάδευση της δεν μπορεί να εξασφαλισθεί από τους MCBs.

Ο Durabar είναι άλλος τύπος ήλου που απορροφά ενέργεια, που επίσης εφευρέθηκε στην Νότιο Αφρική. Έχει δύο σημεία αγκύρωσης, το εσωτερικό σημείο είναι ένα λυγισμένο τμήμα της χαλύβδινης ράβδου που ολισθαίνει σε ένα προκαθορισμένο φορτίο και το εξωτερικό σημείο είναι η πλάκα στήριξης.

Άλλοι τύποι που υπάρχουν στην αγορά είναι: ο ήλος Garford, ο ήλος Secura και Roofex. Όλοι αυτοί οι τύποι είναι ήλοι δύο σημείων αγκύρωσης.

### D bolt

Ο ήλος D αποτελείται από μία ράβδο που έχει πολλά ενσωματωμένα σημεία αγκύρωσης που συνήθως ισαπέχουν κατά μήκος του ήλου (Σχήμα 9). Σε αυτούς τους ήλους οι αγκυρώσεις είναι πιο ισχυρές από την ράβδο του ήλου και χρησιμοποιείται και η αντοχή και η ικανότητα επιμήκυνσης της ράβδου όταν ο ήλος υπόκειται σε διαστολή πετρώματος. Η ράβδος και όχι οι αγκυρώσεις διαρρέει και επιμηκύνεται πλαστικά μέχρι να αστοχήσει. Οι ήλοι αυτοί έχουν διαφορετικά σχήματα και στο σχήμα 3 που ακολουθεί φαίνονται ενδεικτικά δύο τύποι.



Σχήμα 9 Ήλοι τύπου D.

Οι αγκυρώσεις είναι μεγαλύτερου πλάτους από τον ήλο έτσι ώστε η ράβδος να κεντράρεται αυτόματα εντός του διατρήματος μετά την τοποθέτηση. Αυτό εξασφαλίζει πως ο ήλος βρίσκεται πλήρως εντός ενέματος. Το μέγεθος της λαιμοειδούς αγκύρωσης (paddle anchor) είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από την ράβδο επιτρέποντας την τοποθέτηση

σε μικρής διαμέτρου διάτρημα. Οι λαιμοειδείς αγκυρώσεις είναι κατάλληλες και για ενέματα ρητίνης αλλά και για τσιμεντένεμα.

### **Αρχή λειτουργίας**

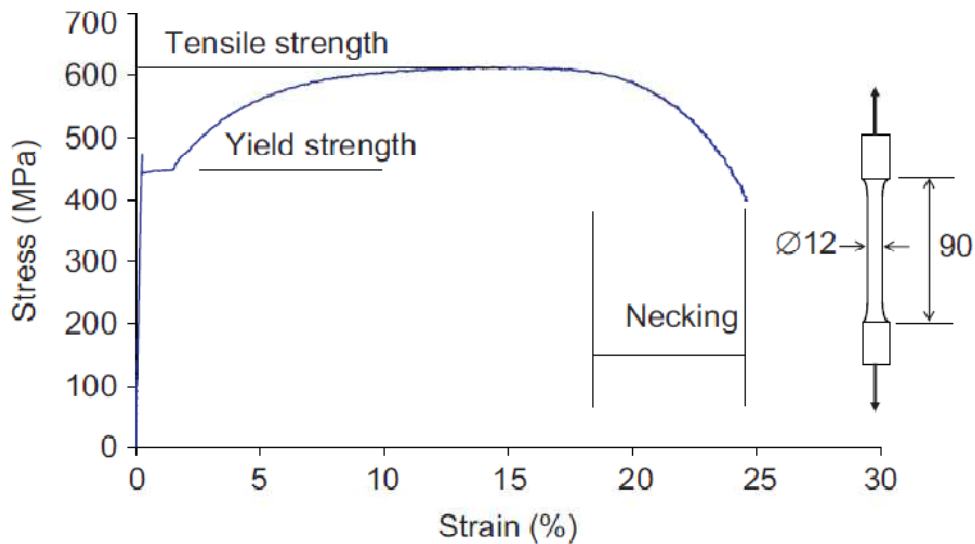
Ο ήλος τύπου D μπορεί να ενεματωθεί και σε ρητίνη και σε τσιμεντένεμα. Οι αγκυρώσεις πακτώνονται πλήρως στο ένεμα ενώ η ράβδος έχει ελάχιστη έως καθόλου συνάφεια με το ένεμα. Όταν το πέτρωμα διαστέλλεται μεταξύ δύο διαδοχικών αγκυρώσεων, οι αγκυρώσεις θα περιορίσουν την διαστολή έτσι ώστε εφελκυστικό φορτίο να δημιουργηθεί μεταξύ ράβδου και αγκυρώσεων. Η ράβδος επιμηκύνεται ελαστικά στην αρχή, αλλά σύντομα διαρρέει μετά από μικρή διαστολή πετρώματος. Μετά από αυτό η ράβδος παραμορφώνεται πλαστικά μέχρι να φτάσει στο οριακό όριο τροπής. Και η ικανότητα παραμόρφωσης αλλά και αντοχής δρουν σε αυτή την διαδικασία.

Ο ήλος D βασίζεται στην αρχή της πλήρους ενεργοποίησης της παραμόρφωσης και αντοχής του ήλου. Ας υποθέσουμε πως ένας ήλος από χάλυβα B500C, μήκους 2.7m, διαμέτρου 20 mm έχει τέσσερα σημεία αγκύρωσης κατά μήκος του. Το μήκος του ήλου που μπορεί να παραμορφωθεί είναι 2.3m αφαιρώντας το συνολικό μήκος των αγκυρώσεων. Ο ήλος θα μπορεί να παραμορφωθεί έως 0.41m ( $=2.3 \times 18\%$ ). Αν το μέσο οριακό φορτίο είναι 180 kN, τότε η στατική απορρόφηση ενέργειας θα είναι περίπου ίση με 74 kJ. Για αυτούς τους ήλους είναι ζωτικής σημασίας η ράβδος να είναι λεία και ικανή να αποσπάται από το ένεμα επιτρέποντας την πλήρη επιμήκυνση της ράβδου. Λόγω της επίδρασης του λόγου Poisson καθώς το αξονικό φορτίο αυξάνεται η διάμετρος της ράβδου μειώνεται. Η συστολή της διατομής επιτρέπει στην ράβδο να αποσπάται από το ένεμα. Για την εξασφάλιση της απόσπασης της ράβδου η επιφάνεια του ήλου μπορεί να καλυφθεί από λιπαντικό υλικό.

Επιπλέον, κάθε λείο τμήμα που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αγκυρώσεις δρα ανεξάρτητα. Η αστοχία ενός τμήματος έχει μόνο τοπική επίδραση στην ικανότητα αγκύρωσης του ήλου. Τα υπόλοιπα τμήματα εξακολουθούν να προσφέρουν ενίσχυση στο πέτρωμα. Αυτή η ανεξαρτησία μεταξύ των τμημάτων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την συμπεριφορά κατά την αστοχία έναντι των ήλων με δύο σημεία αγκύρωσης.

Οι πλάκες στήριξης έχει παρατηρηθεί πως υπερφορτίζονται και για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο το πρώτο σημείο αγκύρωσης βρίσκεται πολύ κοντά στην πλάκα και έτσι ο ήλος

αναλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό της εδαφικής πίεσης που διαφορετικά θα μεταφερόταν στην πλάκα.

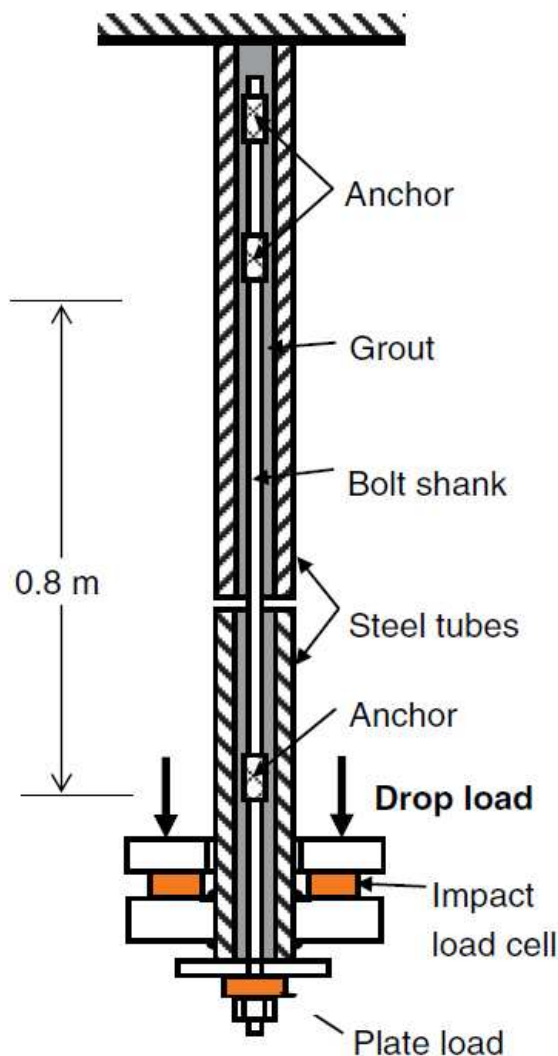


Σχήμα 10 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης χαλύβδινης ράβδου B500C υπό εφελκυστικό φορτίο.

### Δοκιμές

Ο Charlie Chunlin Li αναφέρει πως έχουν γίνει δοκιμές στατικού εφελκυσμού για τον έλεγχο της αντοχής των αγκυρώσεων των ήλων D καθώς και δοκιμές πτώσης φορτίου για την εκτίμηση της απορρόφησης ενέργειας. Στις δυναμικές δοκιμές πτώσης φορτίου το διάτρημα προσομοιώνεται από ένα διασπώμενο χαλύβδινο σωλήνα. Η διάταξη της δοκιμής φαίνεται στο σχήμα 11.

Και οι δύο δοκιμές έδειξαν πως η μέγιστη παραμόρφωση μίας λείας ενεματωμένης ράβδου είναι σχεδόν ίση με την οριακή παραμόρφωση του χάλυβα. Αυτό υποδηλώνει πως η ράβδος αποσπάται πλήρως από το ένεμα. Η επικάλυψη της ράβδου ίσως να ενισχύει ελαφρώς την επιμήκυνση του ήλου αλλά για να επιβεβαιωθεί ένα τέτοιο συμπέρασμα, πρέπει να γίνουν περισσότερες δοκιμές στο μέλλον.



Σχήμα 11 Διάταξη δοκιμής

Για την δυναμική φόρτιση το μέγιστο κρουστικό φορτίο είναι περίπου ίσο με το κατά μέσο όρο φορτίο. Η τοποθέτηση της αγκύρωσης κοντά στην πλάκα είχε σαν αποτέλεσμα την προστασία της πλάκας και παρατηρήθηκε πως μόνο το 25 % του κρουστικού φορτίου μεταφέρθηκε στην πλάκα.

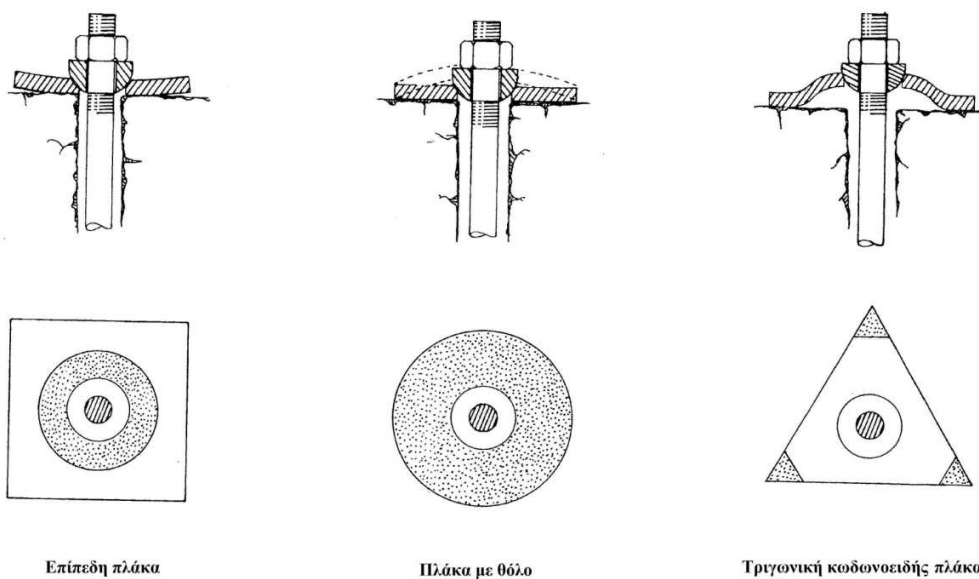
Τέλος, δοκιμές στην πράξη έδειξαν πως οι ήλοι rebar φορτίζονται άνισα κατά μήκος με το μέγιστο φορτίο στην πλάκα στήριξης ενώ οι ήλοι D φορτίζονται ισόποσα σε κάθε τμήμα τους και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

## 1.4 Εξαρτήματα συστημάτων ηλώσεως.

Οι γεωλογικές συνθήκες ποικίλουν και αυτό υποδηλώνει ότι τα προβλήματα ευστάθειας αναμένονται διαφορετικά, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Τα μέτρα υποστήριξης πρέπει να προσαρμόζονται στις συνθήκες του πετρώματος. Οι ήλοι πολύ συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα εξωτερικά μέτρα υποστήριξης. Ο στόχος της εξωτερικής υποστήριξης είναι να παρέχει περιορισμό της επιφάνειας του ρωγματομένου πετρώματος και ως εκ τούτου, στήριξη του πετρώματος μεταξύ των θέσεων ήλωσης. Τα δυο αυτά μέτρα συνδυαστικά συμβάλλουν στην διατήρηση της ακεραιότητας της βραχομάζας. Παραδείγματα τύπων εξωτερικής στήριξης αποτελούν οι πλάκες στήριξης, τα πλέγματα και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

### 1.4.1 Πλάκες στήριξης

Οι πλάκες στήριξης σχεδιάζονται έτσι ώστε να μεταβιβάζουν το φορτίο από την κεφαλή του ήλου ομοιόμορφα στο περιβάλλον πέτρωμα. Για να διατηρηθεί η ελαστικότητα και η ικανότητα ανάληψης φορτίου του συστήματος ηλώσεως, η επιλογή της πλάκας στήριξης είναι καθοριστική. Ορισμένες συνήθεις πλάκες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 12 Είδη πλακών στήριξης και η αντίστοιχη ενεργή επιφάνεια επαφής (Stillborg, 1994).

Η επίπεδη πλάκα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η επιφάνεια του πετρώματος είναι λεία (ομαλή) και ο ήλος είναι τοποθετημένος κάθετα στην επιφάνεια του πετρώματος. Ωστόσο, η συνήθης ανώμαλη επιφάνεια των πετρωμάτων ή οι κεκλιμένοι ήλοι επιφέρουν

μη επιθυμητή φόρτιση στην κεφαλή του αγκυρίου. Εάν ένα ημισφαιρικό έδρανο προστεθεί στο περικόχλιο, ο ήλος μπορεί να τοποθετηθεί διαγωνίως στην επιφάνεια του πετρώματος, χωρίς να επιφέρει ανεπιθύμητες εφελκυστικές τάσεις στον ήλο. Άλλο ένα πλεονέκτημα του ημισφαιρικού εδράνου είναι ότι το περικόχλιο θα είναι τοποθετημένο επίπεδα προς την βάση του. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη τάνυση του ήλου. Η ρυθμιζόμενη πλάκα με θόλο για ήλους τύπου Swellex είναι σχεδιασμένη να εξασφαλίζει την βέλτιστη τοποθέτηση του ήλου ανεξαρτήτως της γεωμετρίας της επιφάνειας του πετρώματος ή της κλίσεως του ήλου. Η επίπεδη πλάκα στήριξης όταν φορτισθεί, στηρίζεται μόνο σε μερικά σημεία με υψηλή τάση στην επιφάνεια του πετρώματος (Σχήμα 12).

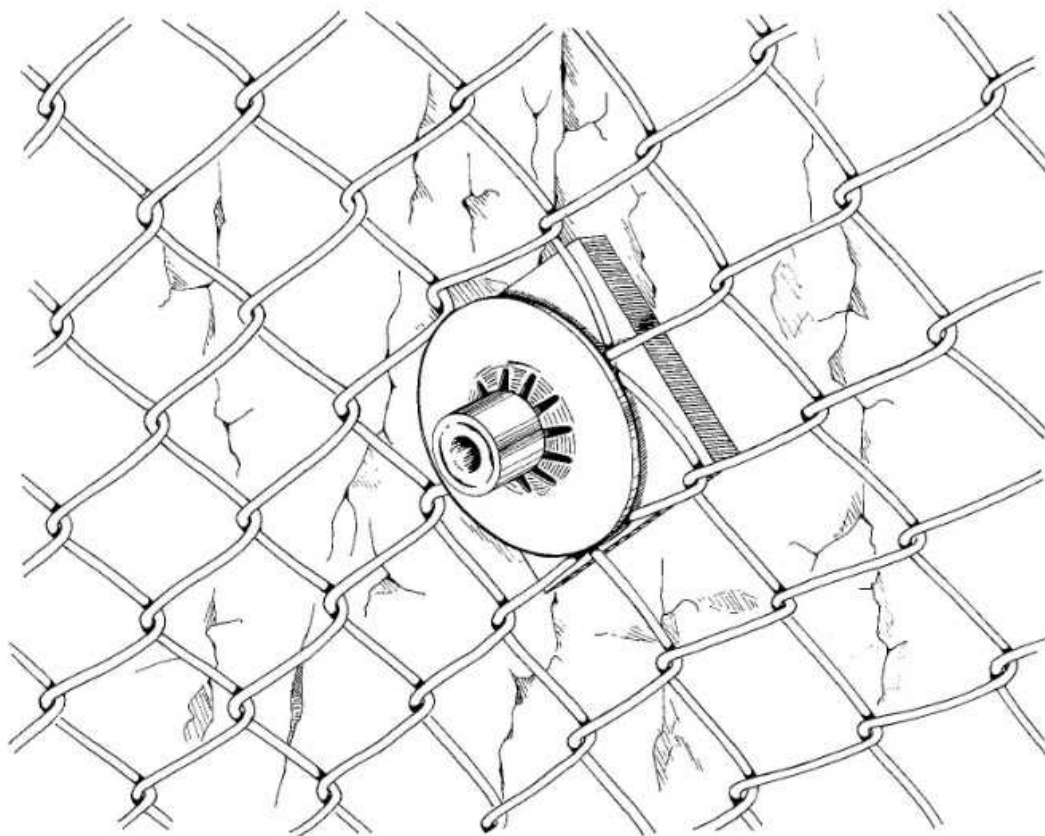
Υπό επαρκώς υψηλή πίεση, το πέτρωμα μπορεί να αστοχήσει σε εκείνα τα σημεία. Η ένταση στον ήλο τότε θα μειωθεί. Ένα έδρανο του 1 ή 2 mm μπορεί να μειώσει την ένταση του ήλου κατά 20-70% και ο ήλος πρέπει να τανυσθεί ξανά. Αυτή η αδυναμία της επίπεδης πλάκας περιορίζεται αρκετά με τις πλάκες με θόλο ή τριγωνικές κωδωνοειδείς πλάκες οι οποίες έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής. Επιπλέον, αυτές οι πλάκες δίνουν στο σύστημα ηλώσεως μεγαλύτερη ευκαμψία. Εάν ο ήλος έχει τανυσθεί και μετά ενεματωθεί πλήρως, η ένταση του ήλου διατηρείται και η δράση του ήλου δεν εξαρτάται πλέον από την πλάκα στήριξης. Όταν χρησιμοποιούνται ήλοι που δεν έχουν τανυσθεί, μία απλή πλάκα στήριξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτό θα εμποδίσει την απόσπαση του ήλου από το διάτρημα στην επιφάνεια του βράχου. Επιπροσθέτως, οι πλάκες στήριξης παρέχουν κάποια υποστήριξη στην επιφάνεια του πετρώματος αν το περικόχλιο έχει συσφιχθεί με γαλλικό κλειδί για να εξασφαλισθεί η έδραση της πλάκας στήριξης.

#### **1.4.2 Πλέγμα**

Οι τύποι πλέγματος που χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με ηλώσεις είναι δύο: το «αλυσιδωτό» πλέγμα και το δομικό πλέγμα.

Το αλυσιδωτό πλέγμα είναι εύκαμπτο και ανθεκτικό. Χρησιμοποιείται συνήθως κατευθείαν πάνω στο μέτωπο για την προστασία του προσωπικού αλλά και του μηχανικού εξοπλισμού από μικρότερα τεμάχια πετρώματος ή από θραύσματα. Το πλέγμα τοποθετείται στο πέτρωμα σε κατά διαστήματα του 1 και 1.5m. Πείροι μικρού μήκους ή ήλοι χρησιμοποιούνται ανάμεσα στον συνήθη κάρναβο. Το αλυσιδωτό πλέγμα μπορεί να συγκρατήσει ένα αρκετά μεγάλο βάρος ρωγματομένου βράχου. Δοκιμές έχουν δείξει πως με διάστημα του 1.5–2.0 m μεταξύ των σημείων στήριξης, το πλέγμα μπορεί να συγκρατήσει κατά προσέγγιση 2.5 tn ανά m<sup>2</sup> σπασμένου βράχου. Ωστόσο, είναι

ακατάλληλο σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, καθώς προκαλεί σημαντική αναπήδηση και μειώνει σημαντικά την ενισχυτική του ικανότητα.

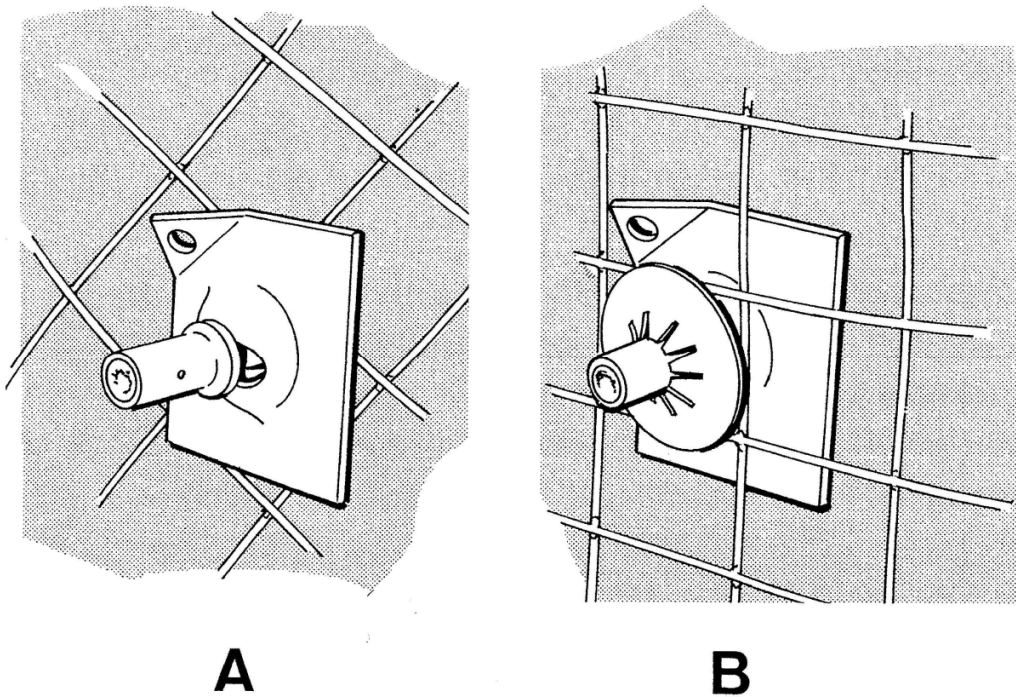


Σχήμα 13 Αλυσιδωτό πλέγμα (Stillborg, 1994).

Όσον αφορά το δομικό πλέγμα, αποτελείται από χαλύβδινες ράβδους διατεταγμένες σε τετραγωνικό ή ορθογώνιο σύστημα και συγκολλημένα σε κάθε σημείο που τέμνονται. Χρησιμοποιείται για συγκράτηση του πετρώματος μεταξύ των ηλώσεων και για ενίσχυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το πλέγμα αυτού του τύπου είναι πολύ πιο στέρεο (άκαμπτο) από το αλυσιδωτό, γεγονός που αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα έναντι του αλυσιδωτού. Ακόμη επιτρέπει την τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος αν αυτή απαιτείται σε μεταγενέστερο στάδιο.

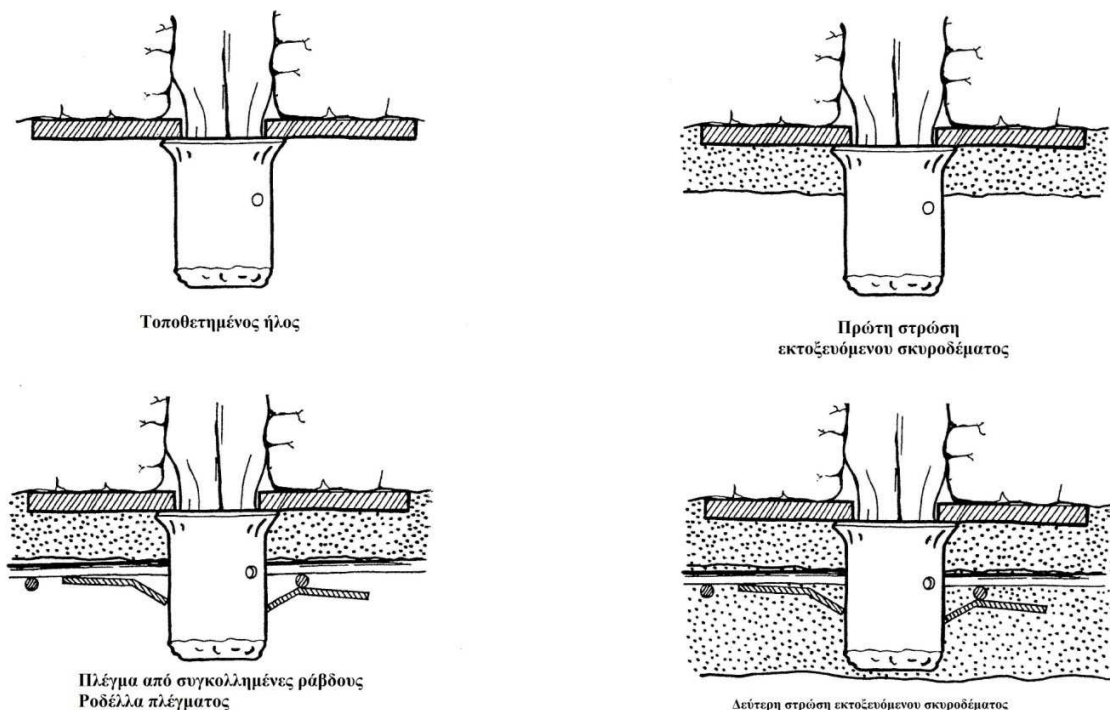
Η ακαμψία αυτή αποτελεί ωστόσο και μειονέκτημα, διότι είναι πιο δύσκολο να προσαρμοστεί στις ανωμαλίες της επιφάνειας του πετρώματος. Το πλέγμα (αλυσιδωτό ή δομικό), τοποθετείται στην επιφάνεια του πετρώματος διά μέσου της πλάκας στήριξης

του ήλου ή με δεύτερη ροδέλλα πάνω στους ήδη υπάρχοντες ήλους (Σχήμα 14). Συνήθως, ράβδοι 4 mm τοποθετημένες κατά διαστήματα 100 mm χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η εφαρμογή του πλέγματος από συγκολλημένες ράβδους σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 14 Πλέγμα τοποθετημένο στο πέτρωμα δια μέσου της πλάκας στήριξης του ήλου (A) και με μία δεύτερη πλάκα ροδέλλα στον υπάρχοντα ήλο (B) (Stillborg, 1994).





Σχήμα 15 Εφαρμογή δομικού πλέγματος σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Stillborg, 1994).

### 1.4.3 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με ηλώσεις σε μια πληθώρα γεωλογικών συνθηκών. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εκτοξευόμενου σκυροδέματος: του ξηρού μείγματος, όπου το μείγμα είναι ξηρό και το νερό για την ενυδάτωση προστίθεται υπό πίεση στο ακροφύσιο αμέσως πριν την εκτόξευση και του υγρού μείγματος, όπου το μείγμα έχει σχεδόν τα ίδια συστατικά με το ξηρό με την μόνη διαφορά ότι το μείγμα περιλαμβάνει ήδη το νερό. Το μείγμα πρέπει να είναι επαρκώς υγρό για να μπορεί να αντληθεί. Το σκυρόδεμα επομένως περιέχει πολύ περισσότερο νερό από αυτό που χρειάζεται για την ενυδάτωση του για αυτό επιβάλλεται η πρόσθεση υπερ-ρευστοποιητικού στο ακροφύσιο.

Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τις αναλογίες τους στο μείγμα. Ωστόσο, η ποιότητα αλλά και η μέθοδος τοποθέτησης εξαρτώνται από την ικανότητα και την κρίση των χειριστών. Ένα σύνηθες μείγμα περιέχει τις παρακάτω αναλογίες ξηρών συστατικών κατά βάρος:

Τσιμέντο	15-20 %
Χονδρομερή αδρανή	30-40%
Λεπτομερή αδρανή ή άμμος	40-50%
Επιταχυντής	2-5%

Η αναλογία νερού/τσιμέντου (κατά βάρος) σε ξηρής μείξης εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κυμαίνεται από 0.3 έως 0.5 και προσαρμόζεται από τον χειριστή για να ταιριάζει στις τοπικές συνθήκες. Ακόμη, η προσθήκη ινών χάλυβα διαμέτρου 0.4 - 0.8 mm και μήκους 50mm, έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την ανθεκτικότητα, την διάρκεια ζωής του σκυροδέματος αλλά και την διατμητική του αντοχή, ενώ μειώνει τις ρωγμές συστολής. Οι χαλύβδινες ίνες προστίθενται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Κατά την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το ακροφύσιο πρέπει να είναι όσον το δυνατόν κάθετο προς την επιφάνεια του σκυροδέματος και σε μία σταθερή απόσταση περίπου 1m. Μια μόνιμη στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι συνήθως πάχους 100 mm έως 500 mm.

### **1.5 Τεχνικά και κατασκευαστικά στοιχεία ήλων εμπορίου.**

Υπάρχουν πολλές εταιρείες που εξειδικεύονται στην κατασκευή ήλων ακολουθώντας τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Κάποιες από αυτές τις εταιρείες είναι οι: ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε., Atlas Corco, Dywidag κοκ. Ενδεικτικά αναφέρονται οι τύποι ήλων που κατασκευάζονται από την εταιρεία ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε. που είναι οι εξής:

- Ήλοι Βράχου –Αγκύρια Rebar (νευροχάλυβα)
- Αγκύρια Ολόσωμου Σπειρώματος ELEBAR®-G (Full-length threaded ELEBAR®-G)
- Αυτοδιατρήοντα Αγκύρια Βράχων ELEBAR®-SD (Self-Drilling Injection Anchors)
- Διάτρητοι σωλήνες (Perforated Tubes)
- Fiberglass

## 1. Ήλοι Βράχου –Αγκύρια Rebar (νευρογάλυβα)

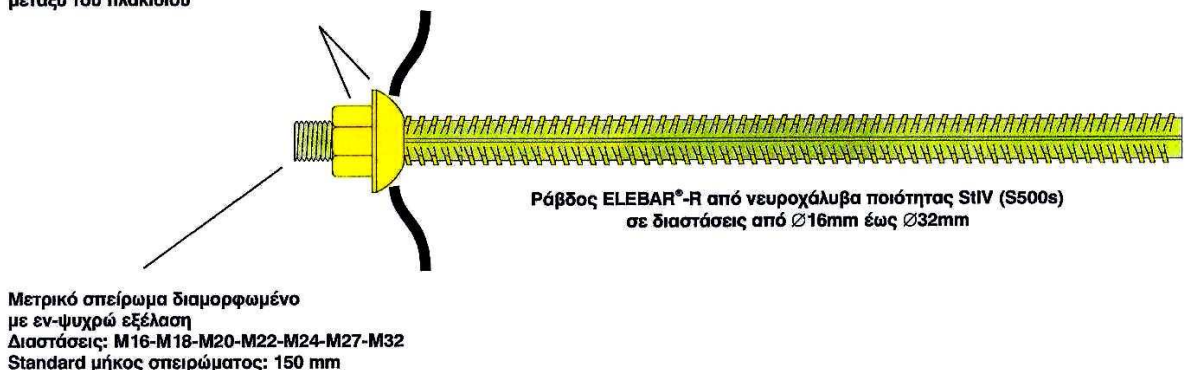
Οι αγκυρώσεις με ήλους ELEBAR<sup>®</sup> - R (Rebar) μπορεί να είναι:

- απλοί ήλοι βράχου (αγκύρια Rebar) ολόσωμης τσιμενταρισμένης ή ρητινικής πάκτωσης (παθητική αγκύρωση),
- ήλοι βράχου μηχανικής αγκύρωσης με τη χρήση κατάλληλης διαστελλόμενης αγκυροκεφαλής (ενεργή αγκύρωση),
- σημειακής αγκύρωσης με πάκτωση τμήματος στο βάθος του διατρήματος.

Οι ήλοι ELEBAR<sup>®</sup> - R αποτελούνται από:

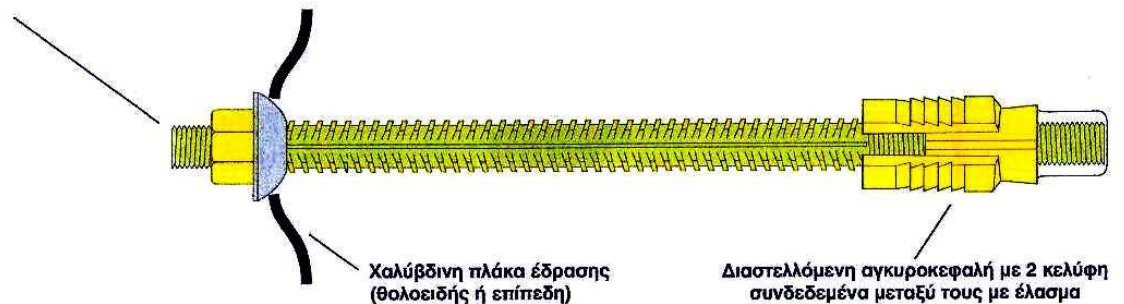
- ❖ τη χαλύβδινη ράβδο οπλισμού με νευρώσεις ποιότητας StIV (S500s) με σπείρωμα στο ένα άκρο (για τους απλούς ήλους βράχου και τα σημειακής αγκύρωσης βλήτρα) ή με δύο (2) σπειρώματα (για τους ήλους βράχου τύπου διαστελλόμενης αγκυροκεφαλής) διαμορφωμένα με εξέλαση εν ψυχρώ
- ❖ χαλύβδινο πλακίδιο έδρασης
- ❖ εξάγωνο περικόχλιο βαρέος τύπου και ημισφαιρική έδρα (προαιρετική) ή εξάγωνο ημισφαιρικό περικόχλιο
- ❖ διαστελλόμενη αγκυροκεφαλή (για τους ήλους μηχανικής αγκύρωσης).

Εξάγωνο περικόχλιο βαρέος τύπου  
με παρεμβολή (ή όχι) ημισφαιρικής έδρας  
μεταξύ του πλακιδίου



Σχήμα 16 Ράβδος ELEBAR<sup>®</sup> - R παθητικής αγκύρωσης (1 σπείρωμα).

Μετρικό σπειρώμα διαμορφωμένο  
με εν-ψυχρώ εξέλαση  
Διαστάσεις: M16-M18-M20-M22-M24-M27-M32  
Standard μήκος σπειρώματος: 150 mm



Σχήμα 17 Ράβδος ELEBAR® - R μηχανικής αγκύρωσης (2 σπειρώματα).

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

#### ➤ Υλικά κατασκευής

Οι ήλοι βράχου ELEBAR® - R (Rebar) κατασκευάζονται από νευροχάλυβα ποιότητας StIV (S500s) σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ 971, DIN 488 και EURONORM 80-85.

#### ➤ Διαστάσεις - Μεγέθη

Οι ήλοι βράχου ELEBAR® - R (Rebar) κατασκευάζονται σε μήκη έως και 12 m και σε διαμέτρους από 16 έως και 32 mm .

#### ➤ Εν-ψυχρώ Εξέλαση Σπειρωμάτων

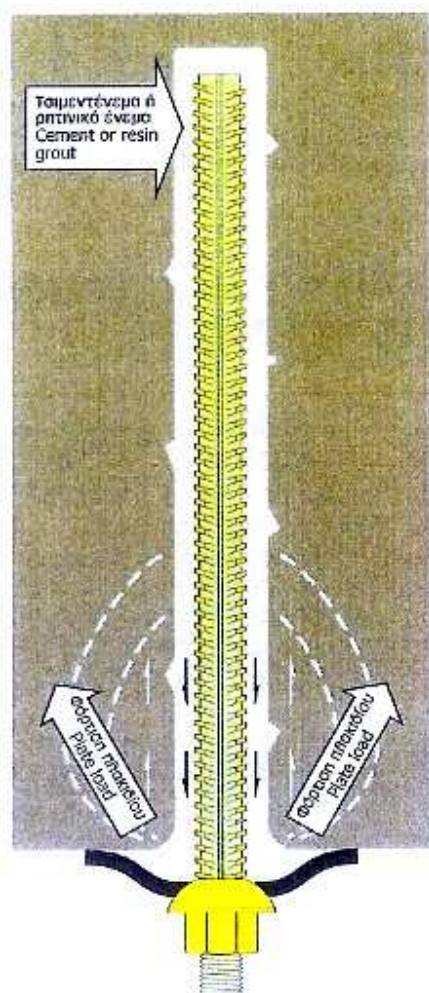
Τα σπειρώματα διαμορφώνονται με εν-ψυχρώ εξέλαση σε ράουλα. Οι σπείρες μορφοποιούνται με συμπίεση και διόγκωση χωρίς την αφαίρεση υλικού όπως συμβαίνει στη διαμόρφωση σε τόρνο.

Η μέθοδος της εν-ψυχρώ εξέλασης ενδοτραχύνει τον χάλυβα στην περιοχή του σπειρώματος προσδίδοντας του αντοχές που μπορούν ακόμα και να ξεπεράσουν αυτές της ράβδου παρότι η πραγματική διάμετρος στον πυρήνα του σπειρώματος είναι ελαφρώς μικρότερη. Η ενισχυμένη αντοχή των σπειρωμάτων που επιτυγχάνεται βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες των ήλων και την ικανότητα παραλαβής φορτίων της βραχομάζας.

## Μηχανικές Ιδιότητες Ράβδου

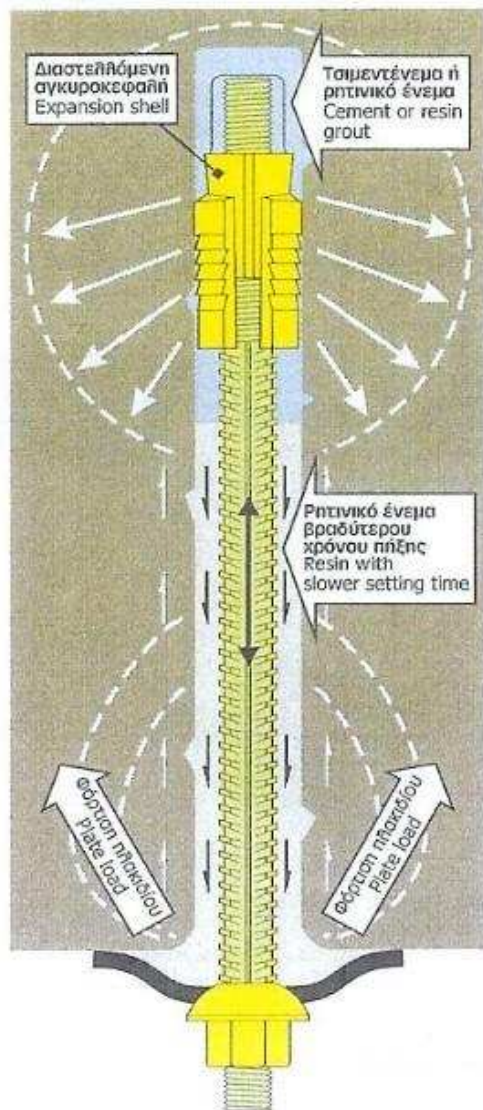
Όριο διαρροής	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	500
Αντοχή στον εφελκυσμό	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	550
Επιμήκυνση	%	12

## Βασικοί τρόποι εγκατάστασης Αγκυρίων ELEBAR® - R



Σχήμα 18 Απλό βλήτρο βράχου ολόσωμης πάκτωσης – Παθητική αγκύρωση.

Αγκύριο ELEBAR® - R τοποθετημένο σε διάτρημα το οποίο προηγουμένως έχει πληρωθεί με τσιμεντένεμα ή ρητινικό ένεμα. Η σύσφιξη του περικοχλίου γίνεται αφότου στερεοποιηθεί το ένεμα. Η χρήση ρητινικών ενεμάτων προσφέρει καλύτερους χρόνους στερεοποίησης, καλύτερη πρόσφυση με το περιβάλλον πέτρωμα και αντιδιαβρωτική προστασία της ράβδου.



Σχήμα 19 Μηχανική αγκύρωση ολόσωμης πάκτωσης με χρήση ρητίνης ή τσιμεντένεματος.

Φυσίγγια ρητίνης τοποθετούνται στο βάθος του διατρήματος ενώ το υπολοιπούμενο μήκος πληρώνεται με φυσίγγια ρητίνων βραδύτερου χρόνου πήξεως. Το αγκύριο ELEBAR<sup>®</sup> - R με προσαρμοσμένη την κεφαλή ωθείται μέσα στο διάτρημα ώστε να διαρρήξει την μεμβράνη συσκευασίας των φυσιγγίων. Η τάνυση με σύσφιξη του περικοχλίου γίνεται προτού στερεοποιηθεί το ρητινικό ένεμα στο βάθος του διατρήματος. Αντί της ρητίνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυσίγγια τσιμεντενέματος διαφορετικών χρόνων πήξεως ακολουθώντας την ίδια διαδικασία.

Παρελκόμενος Εξοπλισμός Απλών Ήλων Βράχου.

**Χαλύβδινα Πλακίδια Έδρασης (Washer Plates).**



Σχήμα 20 Χαλύβδινα Πλακίδια Έδρασης.

Οι διαστάσεις των πλακιδίων είναι 120x120 mm, 140x140 mm, 150x150 mm, 200x200mm. Και το πάχος μπορεί να είναι 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 15mm.

**Ημισφαιρικές Έδρες (Hemispherical Seats).**

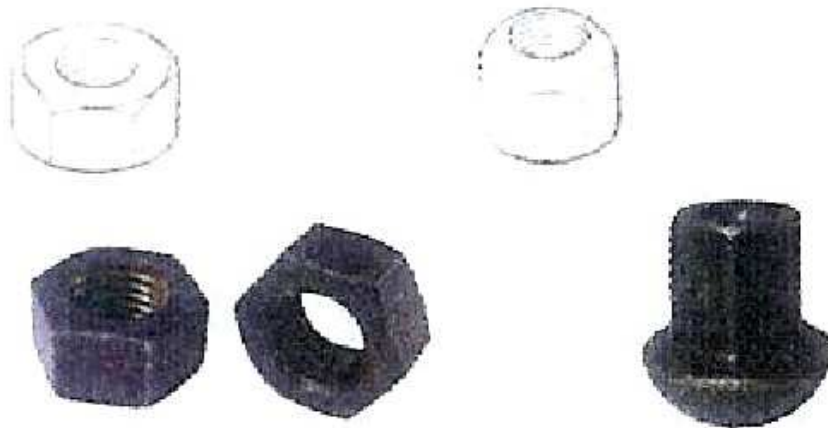
Η ημισφαιρική έδρα επιτρέπει καλύτερη εφαρμογή του πλακιδίου στο πέτρωμα ανεξάρτητα από την διεύθυνση του διατρήματος και παράλληλα εξασφαλίζει την ομοιόμορφη διανομή των φορτίων του πλακιδίου.



Σχήμα 21 Ημισφαιρικές Έδρες.

### **Εξάγωνα Περικόχλια.**

Τα εξάγωνα περικόχλια είναι βαρέος τύπου και εξασφαλίζουν την παραλαβή φορτίων τουλάχιστον όσο είναι το συνολικό φορτίο θραύσης της ράβδου στην περιοχή του σπειρώματος (που αποτελεί συνήθως το πιο ασθενές σημείο).



**Σχήμα 22 Εξάγωνα Περικόχλια.**



## **2. Αγκύρια Ολόσωμου Σπειρώματος ELEBAR®-G (Full-length threaded ELEBAR®-G).**

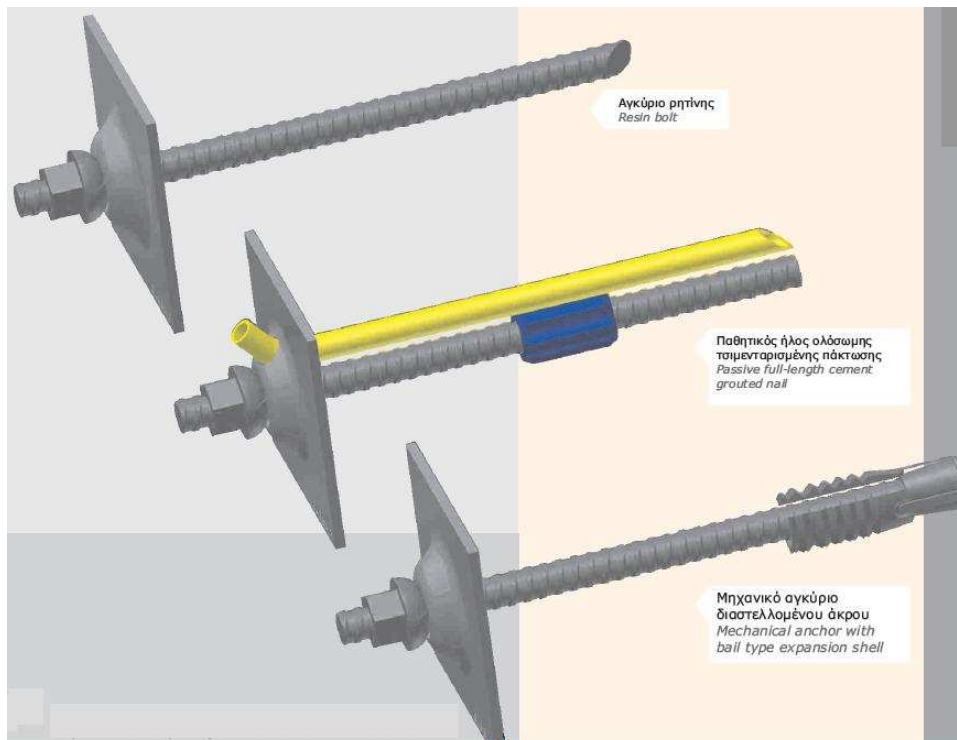
Τα αγκύρια, ήλοι ή κοχλίες με χρήση ράβδων ολόσωμου σπειρώματος ELEBAR® - G αποτελούν την εξέλιξη των απλών αγκυρίων νευροχάλυβα και είναι πλέον ο Standard τύπος σε όλες τις προηγμένες χώρες με υψηλά επίπεδα ασφαλείας (Αμερική, Καναδά, Γερμανία, Βόρεια Ευρώπη, Νότιος Αφρική κλπ.).

Τα αγκύρια ολόσωμου σπειρώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για παθητικές αγκυρώσεις (απλοί ήλοι βράχου) όσο και για σημειακές ή μηχανικές αγκυρώσεις διαστελλομένου άκρου, αποτελούμενα συνήθως από:

- τη χαλύβδινη ράβδο με ολόσωμο συνεχές αριστερόστροφο ή δεξιόστροφο σπείρωμα διαμορφωμένο με εξέλαση εν-θερμώ,
- χαλύβδινο πλακίδιο εδράσεως (θολοειδές, επίπεδο ή με νευρώσεις),
- εξάγωνο περικόχλιο βαρέος τύπου και ημισφαιρική έδρα (προαιρετική) ή εξάγωνο ημισφαιρικό περικόχλιο
- διαστελλόμενη αγκυροκεφαλή κατάλληλη για κοχλίωση στο ειδικό σπείρωμα G της ράβδου (εφόσον θα πραγματοποιηθεί μηχανική αγκύρωση)
- σωληνάκι τσιμεντενέσεως
- φορετούς ή περαστούς κεντραδώρας για το κεντράρισμα της ράβδου εντός του διατρήματος (προτείνεται για χρήση στις παθητικές αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης).

Το σύστημα αγκύρωσης ELEBAR® - G μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μόνιμες ηλώσεις βράχων. Υπάρχουν οι τύποι:

- ❖ ολόσωμης τσιμενταρισμένης ή ρητινικής πάκτωσης (παθητική αγκύρωση)
- ❖ μηχανικής αγκύρωσης με τη χρήση κατάλληλης διαστελλόμενης αγκυροκεφαλής (ενεργή αγκύρωση)
- ❖ σημειακής αγκύρωσης.



Σχήμα 23 Τύποι ήλων ELEBAR® - G.

### Πλεονεκτήματα

- ✓ Υψηλή εφελκυστική αντοχή

Το ολόσωμο συνεχές σπείρωμα της ράβδου ELEBAR® - G διαμορφώνεται σε ράουλα με εν-θερμώ εξέλαση. Οι σπείρες μορφοποιούνται με συμπίεση και διόγκωση χωρίς αφαίρεση υλικού, όπως αντιθέτως συμβαίνει στις διαμορφώσεις σπειρωμάτων σε τόρνο. Η εξέλαση ενδοτραχύνει τον χάλυβα σε όλο το μήκος της ράβδου αυξάνοντας την αντοχή της σε σχέση με την αρχική αντοχή της πρώτης ύλης χάλυβα.

- ✓ Αγκύριο που διαρρέει - Αγκύριο που "προειδοποιεί"

Λόγω του ότι το ολόσωμο συνεχές σπείρωμα της ράβδου ELEBAR® - G διαμορφώνεται σε ράουλα με εν-θερμώ εξέλαση, επιτυγχάνεται μεγάλη περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης (διαφορά ορίου διαρροής από σημείο θραύσης). Έτσι το αγκύριο έχει την ικανότητα να διαρρέει προειδοποιώντας ότι πλέον φορτίζεται πλαστικά και αποφεύγεται το ξαφνικό και απροειδοποίητο σπάσιμο. Έτσι μπορούν άμεσα να παρθούν επιπρόσθετα μέτρα υποστύλωσης και να αποφευχθούν ξαφνικές μετακινήσεις με καταστροφικές συνέπειες.

✓ Ανθεκτικό σπείρωμα (τύπου G)

Το ολόσωμο σπείρωμα είναι ειδικού σχεδιασμού ("χοντρότερης" κατασκευής) ανθεκτικού στη βαριά μεταχείριση στο εργοτάξιο (δεν "τραυματίζεται" εύκολα) και μεγάλου βήματος ώστε να προσφέρει αυξημένη ταχύτητα κοχλίωσης.

✓ Αυξημένη πρόσφυση με το ένεμα και το πέτρωμα

Λόγω του ολόσωμου σπειρώματος και της αυξημένης επιφάνειας επαφής με το περιβάλλον ένεμα και επιτυγχάνεται αυξημένη πρόσφυση.

✓ Επανένταση

Στη περίπτωση που για κάποιο λόγο ολισθήσει το αγκύριο (π.χ. αγκύριο πολύ κοντά στο μέτωπο εκρήξεως) δεν αχρηστεύεται. Λόγω του ότι το σπείρωμα είναι ολόσωμο υπάρχει ανεξάντλητη δυνατότητα κοχλίωσης κάτι το οποίο δεν είναι δυνατόν με τα αγκύρια στα οποία το μήκος σπειρώματος είναι περιορισμένο.

✓ Κοπή στο επιθυμητό μήκος

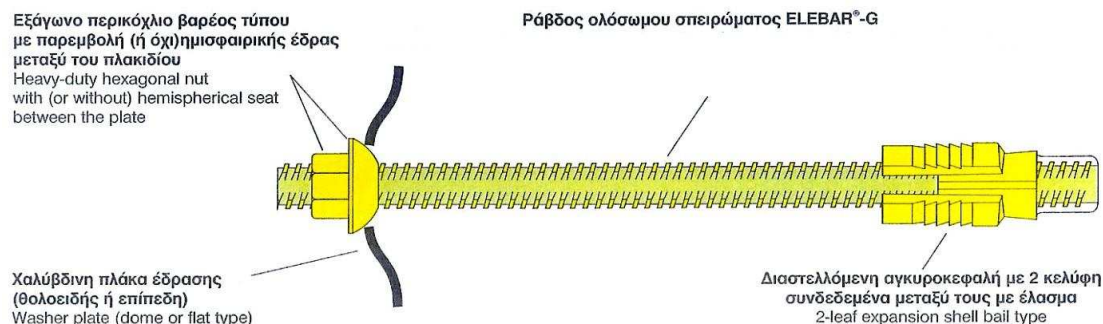
Το ολόσωμο σπείρωμα επιτρέπει την κοπή της ράβδου στο επιθυμητό μήκος. Αυτό δίνει τη δυνατότητα παράδοσης ράβδων σε μεγάλα μήκη (5.8 m ή 11.8 m) για επίτευξη της μέγιστης δυνατής μείωσης των μεταφορικών εξόδων. Οι ράβδοι μπορούν να κοπούν στα απαιτούμενα μήκη, ικανοποιώντας παράλληλα και ενδεχόμενη απαίτηση για διαφορετικά μήκη αγκυρίων στα διάφορα σημεία του έργου.

✓ Άριστη ανάμιξη της ρητίνης

Το ολόσωμο σπείρωμα είναι ειδικού σχεδιασμού που επιτυγχάνει εξαιρετική ανάδευση του καταλύτη με τη ρητίνη κατά τη φάση της περιστροφής του αγκυρίου εντός του διατρήματος.

✓ Δυνατότητα γαλβανισμού

Το προφίλ του σπειρώματος είναι ιδανικό για γαλβανισμό θερμής εμβάπτυσης διατηρώντας την ικανότητα κοχλίωσης του συστήματος.



Σχήμα 24 Ράβδος ολόσωμου σπειρώματος ELEBAR® - G.

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

#### ➤ Υλικά κατασκευής

Η ράβδος ELEBAR® - G κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής εφελκυστικής αντοχής κατά το πρότυπο SABS-920 (BS-4449) και διαθέτει συνεχές ολόσωμο σπείρωμα διαμορφωμένο με εξέλαση εν-θερμό.

Η εξέλαση στην οποία υποβάλλεται η ράβδος για τη διαμόρφωση του σπειρώματος ενισχύει τη ράβδο έτσι ώστε η αντοχή της να υπερκαλύπτει την ποιότητα St-IV (S500s) του νευροχάλυβα REBAR (απλά βλήτρα βράχου REBAR).

#### ➤ Διαστάσεις – Μεγέθη

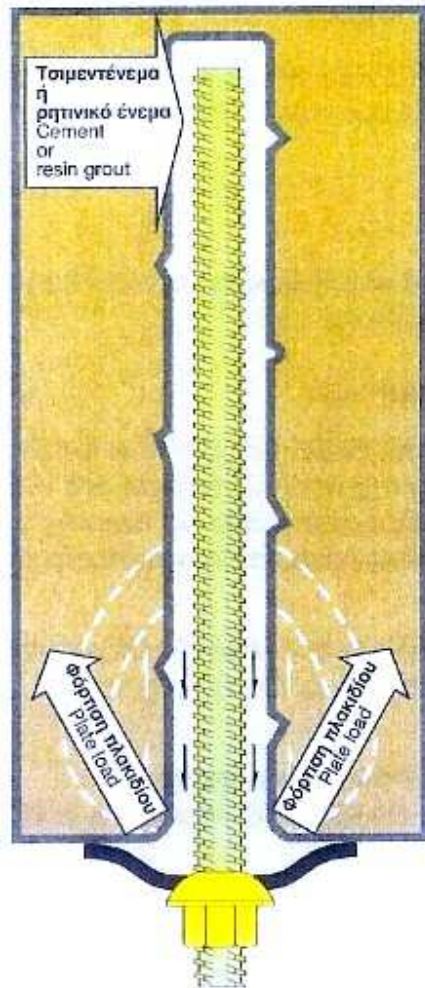
Οι ήλιοι βράχου ELEBAR® - G διατίθενται σε μήκη έως και 11.8 m και σε ονομαστικές διαμέτρους από 16, 20 και 25 mm .

#### ➤ Εν-θερμό Εξέλαση του Ολόσωμου Σπειρώματος

Το ολόσωμο σπείρωμα G διαμορφώνεται εν-θερμό με εξέλαση σε ράουλα. Οι σπείρες μορφοποιούνται με συμπίεση και διόγκωση χωρίς την αφαίρεση υλικού όπως συμβαίνει στη διαμόρφωση σε τόρνο.

Η μέθοδος της εξέλασης ενδοτραχύνει τον χάλυβα στην περιοχή του σπειρώματος αυξάνοντας την αντοχή σε σχέση με την αρχική ράβδο. Η ενισχυμένη αντοχή των σπειρωμάτων που επιτυγχάνεται βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες των αγκυρίων ELEBAR® - G και την ικανότητα παραλαβής φορτίων της βραχομάζας.

## Βασικοί τρόποι εγκατάστασης Αγκυρίων ELEBAR® - G



Σχήμα 25 Απλό βλήτρο βράχου ELEBAR® - G -

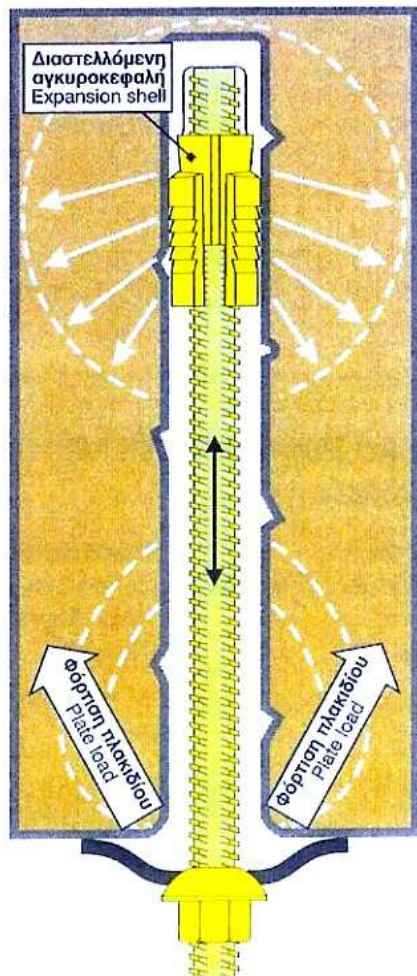
Ολόσωμη πάκτωση – Παθητική αγκύρωση.

Αγκύριο ELEBAR® - G τοποθετημένο σε διάτρημα το οποίο πληρώνεται σε όλο το μήκος με τσιμεντένεμα ή ρητινικό ένεμα.

Η πλήρωση μπορεί να γίνει είτε από το σωληνάκι ή εναλλακτικά το διάτρημα μπορεί να έχει προηγουμένως πληρωθεί με το ενέμα και κατόπιν να εισαχθεί το αγκύριο στο διάτρημα.

Η σύσφιξη του περικοχλίου γίνεται αφότου στερεοποιηθεί το ένεμα.

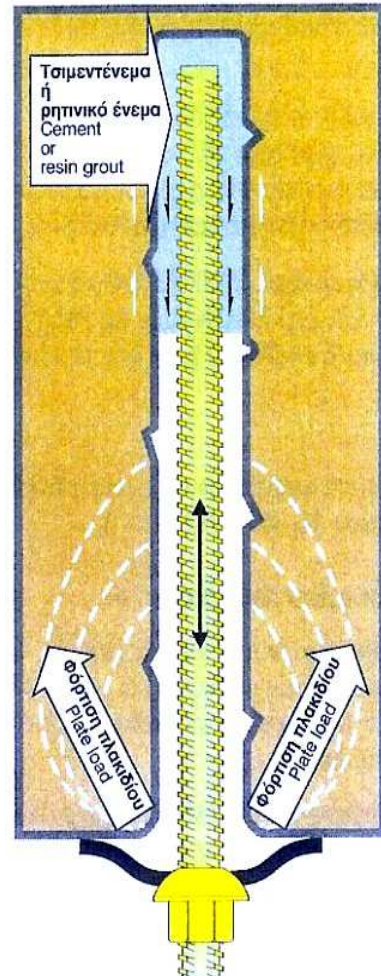
Η χρήση ρητινικών ενεμάτων προσφέρει ταχύτερους χρόνους στερεοποίησης, καλύτερη πρόσφυση με το περιβάλλον πέτρωμα και αντιδιαβρωτική προστασία της ράβδου.



Σχήμα 26 Βασική μηχανική αγκύρωση ELEBAR® - G.

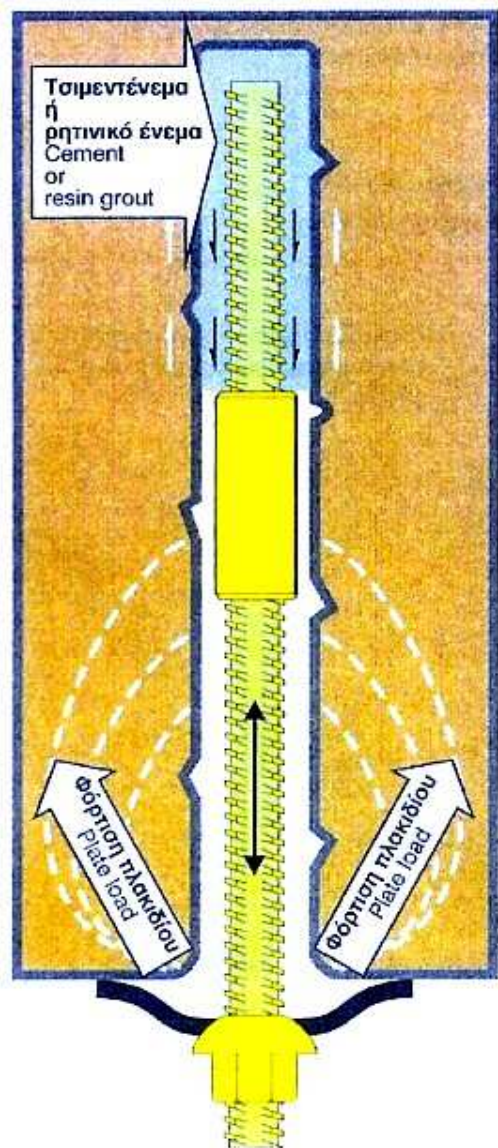
Αγκύριο ELEBAR® - G με προσαρμοσμένη την αγκυροκεφαλή τοποθετείται σε διάτρημα κατάλληλης διαμέτρου όπως ορίζουν οι προδιαγραφές της αγκυροκεφαλής.

Η τάνση πραγματοποιείται με σύσφιξη του περικοχλίου.



Σχήμα 27 Σημειακής Πάκτωσης - Προεντεταμένη αγκύρωση ELEBAR® - G.

Κατάλληλος αριθμός φυσιγγίων ρητίνης τοποθετείται στο διάτρημα. Το αγκύριο ELEBAR®-G ωθείται μέσα στο διάτρημα και περιστρέφεται ώστε να διαρρήξει την μεμβράνη συσκευασίας των φυσιγγίων. Η τάνση με σύσφιξη του περικοχλίου γίνεται πριν στερεοποιηθεί το ρητινικό ένεμα στο βάθος του διατρήματος. Αντί της ρητίνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί τσιμεντενέματος ακολουθώντας την ίδια διαδικασία.



Σχήμα 28 Συνδυασμένη αγκύρωση ELEBAR® - G

Η συνδυασμένη διάταξη αγκύρωσης αποτελείται από δύο ανεξάρτητες ράβδους ELEBAR® - G. Η πρώτη ράβδος πακτώνεται στο βάθος του διατρήματος στο υγιές πέτρωμα σε όλο της το μήκος με τρόπο αντίστοιχο της σημειακής πάκτωσης. Η δεύτερη ράβδος κοχλιώνεται στον σύνδεσμο τανύοντας έτσι την διάταξη αγκύρωσης.

Η συνδυασμένη αυτή διάταξη προσφέρει ταυτόχρονα όλα τα πλεονεκτήματα της ενεργούς και παθητικής αγκύρωσης.

## Παρελκόμενος Εξοπλισμός

- Χαλύβδινα Πλακίδια Έδρασης (Washer Plates).



Σχήμα 29 Χαλύβδινο Θολοειδές Πλακίδιο Έδρασης.



Σχήμα 30 Χαλύβδινο Θολοειδές Πλακίδιο Έδρασης με κεκαμμένο άκρο και οπή αναρτήσεως.



➤ **Διαστελλόμενες Αγκυροκεφαλές.**

Οι διαστελλόμενες αγκυροκεφαλές των αγκυρίων ELEBAR® - G διαθέτουν τρία (3) πτερύγια ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή φορτίων στο σημείο αγκύρωσης.

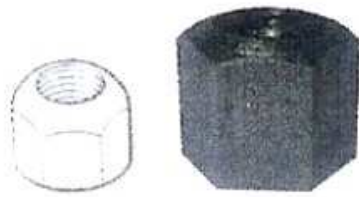
Τα πτερύγια συγκροτούνται από ειδική κεφαλή συγκράτησης που διαθέτει ένα πώμα το οποίο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να σπάει και να ανοίγει όταν δεχθεί αυξημένη φόρτιση. Κατά την τοποθέτηση του αγκυρίου η κεφαλή αρχικά παραμένει άθικτη έως ότου επιτευχθεί η αρχική αγκύρωση. Στη συνέχεια και αυξανόμενης της φόρτισης το πώμα υποχωρεί και σπάει επιτρέποντας πλέον στη ράβδο ELEBAR® - G να μπορεί να διαπεράσει τη κεφαλή συγκράτησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πλήρης τάνυση του αγκυρίου και η ασφαλής έδραση και εφαρμογή του πλακιδίου στο πέτρωμα.

Οι οδοντώσεις των πτερυγίων είναι στρογγυλεμένες ώστε να μειώνονται οι σημειακές φορτίσεις στα σημεία επαφής της αγκυροκεφαλής με το πέτρωμα. Αυτό ελαττώνει τον θρυμματισμό και ρωγμάτωση του πετρώματος, επιτρέποντας έτσι την εκμετάλλευση στο μέγιστο της αντοχή του αδιατάρακτου πετρώματος στο σημείο αγκύρωσης.



Σχήμα 31 Διαστελλόμενη αγκυροκεφαλή.

➤ **Περικόχλια και Ημισφαιρικές Έδρες Βαρέος Τύπου.**



**Ημισφαιρικό Περικόχλιο**  
Hemispherical Nut



**Ημισφαιρική Έδρα**  
Hemispherical Seat



**Ημισφαιρικό Εξάγωνο Περικόχλιο (μασίφ) με ενσωματωμένη Ημισφαιρική Έδρα**  
Hexagonal Domenut

Σχήμα 32 Περικόχλια και Ημισφαιρικές Έδρες.

**Φυσίγγια ρητινικών ενεμάτων**

Τα φυσίγγια ρητίνης είναι κυλινδρικής μορφής και αποτελούνται από δύο ανεξάρτητα διαμερίσματα στα οποία περιέχονται το ρητινικό ένεμα και ο σκληρυντής σε ημίρρευστη κατάσταση. Τα δύο συστατικά είναι αεροστεγώς σφραγισμένα εντός της πλαστικής κυλινδρικής ζελατίνης. Στο ένα άκρο είναι προσαρμοσμένο ένα ειδικό πλαστικό καπάκι που διαθέτει κατάλληλες προεξοχές και λειτουργεί ως συγκρατητήρας αποτρέποντας την ολίσθηση των φυσιγίων από το διάτρημα.

Η επιλογή του κατάλληλου φυσιγγίου ρητίνης εξαρτάται από τη διάμετρο της ράβδου αγκύρωσης και τη διάμετρο του διατρήματος. Ένα διάκενο της τάξης των 3mm θεωρείται ιδανικό ώστε να επιτρέπει τόσο την διάρρηξη της μεμβράνης των φυσιγίων αλλά και την επαρκή ανάμιξη των δύο συστατικών.



Σχήμα 33 Φυσιγγια ρητίνης.

Μετά το πέρας της διατρήσεως, ο επιθυμητός αριθμός φυσιγγίων ρητίνης ωθούνται εντός του διατρήματος ακολουθούμενα από το αγκύριο. Το άκρο εισχώρησης της ράβδου αγκύρωσης έχει κοπεί κατάλληλα έτσι ώστε να σχηματίζει αιχμηρή ακμή και να επιτρέπει την εύκολη διάρρηξη της μεμβράνης. Κατά την εισαγωγή στο διάτρημα το αγκύριο περιστρέφεται έτσι ώστε να ευνοηθεί η ανάμιξη της ρητίνης με το σκληρυντή. Όταν το αγκύριο εισχωρήσει πλήρως εντός του διατρήματος διακόπτεται η περιστροφή και το αγκύριο τίθεται σε ακινησία προκειμένου να ενεργοποιηθεί η αντίδραση της σκλήρυνσης.

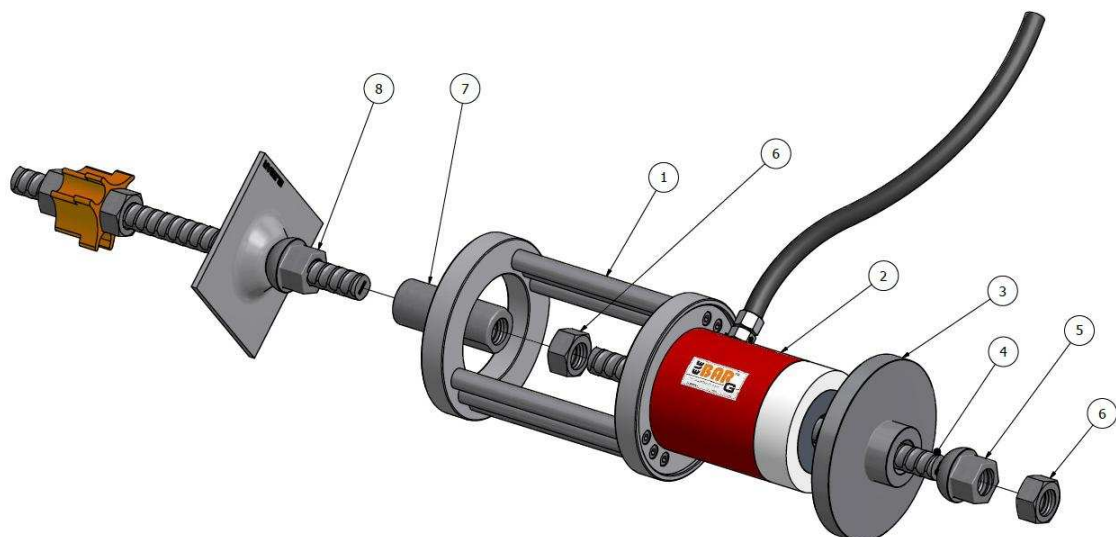
Ο χρόνος σκλήρυνσης εξαρτάται από τον τύπο της ρητίνης, τη θερμοκρασία καθώς και την ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα κατά την διείσδυση του αγκυρίου στο διάτρημα.

Τα βασικά πλεονεκτήματα από τη χρήση φυσιγγίων ρητίνης είναι:

- ❖ Η μεγάλη αντοχή του δεσμού της ρητίνης με το περιβάλλον πέτρωμα επιτρέπει υψηλό βαθμό μεταφοράς φορτίων
- ❖ Μικροί χρόνοι σκλήρυνσης επιτρέπουν ταχεία υποστήριξη καθώς και τοποθέτηση αγκυρίων οροφής
- ❖ Ευκολία και ταχύτητα τοποθέτησης
- ❖ Απλή και ασφαλής χρήση
- ❖ Δυνατότητα ολόσωμης αλλά και σημειακής πάκτωσης

- ❖ Κατάλληλα για αυτοματοποιημένες αγκυρώσεις λόγω της δυνατότητας πνευματικής εκτόξευσης των φυσιγγίων εντός του διατρήματος.

### Εξοπλισμός εξόλκευσης.



Σχήμα 34 Εξοπλισμός εξόλκευσης

Υπόμνημα εξαρτημάτων	
Εξάρτημα	Περιγραφή
1	Βάση έδρασης κυλίνδρου
2	Υδραυλικός κύλινδρος δυναμικότητας 30 tn
3	Πλάκα κεντραρίσματος
4	Ράβδος με σπείρωμα
5	Περικόγλιο με ενσωματωμένη ημισφαιρική έδρα
6	Περικόγλιο ασφαλείας
7	Σύνδεσμος
8	Εγκατεστημένος ήλος

### **3. Διατρητικά Αγκύρια Βράχων ELEBAR®-SD (Self-Drilling Injection Anchors).**

Τα διατρητικά αγκύρια ELEBAR®-SD (Self-Drilling) αποτελούν ένα σύστημα αγκύρωσης όπου το ίδιο το αγκύριο αποτελεί και τη διατρητική στήλη με την οποία πραγματοποιείται η διάτρηση στο επιθυμητό μήκος αγκύρωσης και ακολούθως αφήνεται να παραμείνει μέσα στο διάτρημα για να ακολουθήσει η ενεμάτωση.

Τα αγκύρια αυτά αποτελούνται από ράβδους που διαθέτουν ολόσωμο εξωτερικό σπείρωμα και συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους για τη δημιουργία αγκυρίων μεγάλου μήκους. Στο ένα ελεύθερο άκρο τους διαθέτουν μία φθηνή διατρητική κεφαλή μίας χρήσεως με την οποία πραγματοποιείται η διάτρηση ενώ στο άλλο ελεύθερο άκρο τοποθετείται το πλακίδιο εδράσεως και το περικόχλιο σύσφιξης/τάνυσης του αγκυρίου. Η διάτρηση πραγματοποιείται με τα συμβατικά μέσα και η πάκτωση του διατρήματος γίνεται με τσιμεντένεμα μέσω της κεντρικής οπής των ράβδων.

Τα διατρητικά αγκύρια χρησιμοποιούνται συνήθως σε χαλαρούς σχηματισμούς πετρωμάτων/εδαφών όπου τα διατρήματα καταρρέουν προτού να εισαχθεί στο διάτρημα το επιθυμητό αγκύριο σύμφωνα με τη συμβατική μέθοδο αγκύρωσης των τεσσάρων (4) σταδίων (δηλ. διάνοιξη διατρήματος, εξαγωγή διατρητικής στήλης, εισαγωγή αγκυρίου και πάκτωση).

Η διαδικασία της αγκύρωσης με τα διατρητικά αγκύρια είναι γρήγορη και απλή και αποτελείται από μόνο δύο στάδια (διάτρηση και τσιμεντένεση).

#### **Εφαρμογές**

Τα διατρητικά αγκύρια είναι κατάλληλα για μαλακά αλλά και εδάφη δύσκολων γεωλογικών συνθηκών όπως αμμώδη, άργιλοι, ρωγματομένα πετρώματα κλπ.

#### **Ολόσωμο Σπείρωμα τύπου R (Rope)**

Τα αγκύρια ELEBAR®-SD διαθέτουν ράβδους με ολόσωμο εξωτερικό σπείρωμα τύπου R (rope) όμοιο με το διεθνώς τυποποιημένο σπείρωμα των διατρητικών εξοπλισμών. Αυτό εξασφαλίζει απόλυτη συμβατότητα με το διατρητικό εξοπλισμό και δίνει τη δυνατότητα χρήσης φθαρμένων διατρητικών κεφαλών και συνδέσμων συμβάλλοντας σε περαιτέρω οικονομία του έργου της αγκύρωσης.

Το ολόσωμο εξωτερικό σπείρωμα συμβάλλει στην βελτίωση της πρόσφυσης του αγκυρίου με το περιβάλλον ένεμα και πέτρωμα.

## Εν-ψυχρώ Εξέλαση των Σπειρωμάτων

Το ολόσωμο σπείρωμα τύπου R (rope) της ράβδου ELEBAR®-SD διαμορφώνεται με εν-ψυχρώ εξέλαση. Οι σπείρες μορφοποιούνται σε ραούλα με συμπίεση και διόγκωση του χάλυβα χωρίς να αφαιρείται υλικό όπως συμβαίνει στην κατασκευή σπειρωμάτων σε τόρνο. Η μέθοδος της εν-ψυχρώ εξέλασης ενδοτραχύνει το χάλυβα αυξάνοντας την αντοχή της ράβδου σε σχέση με το αρχικό υλικό, βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες της αγκυρίων και την ικανότητα για παραλαβή φορτίων της βραχομάζας.

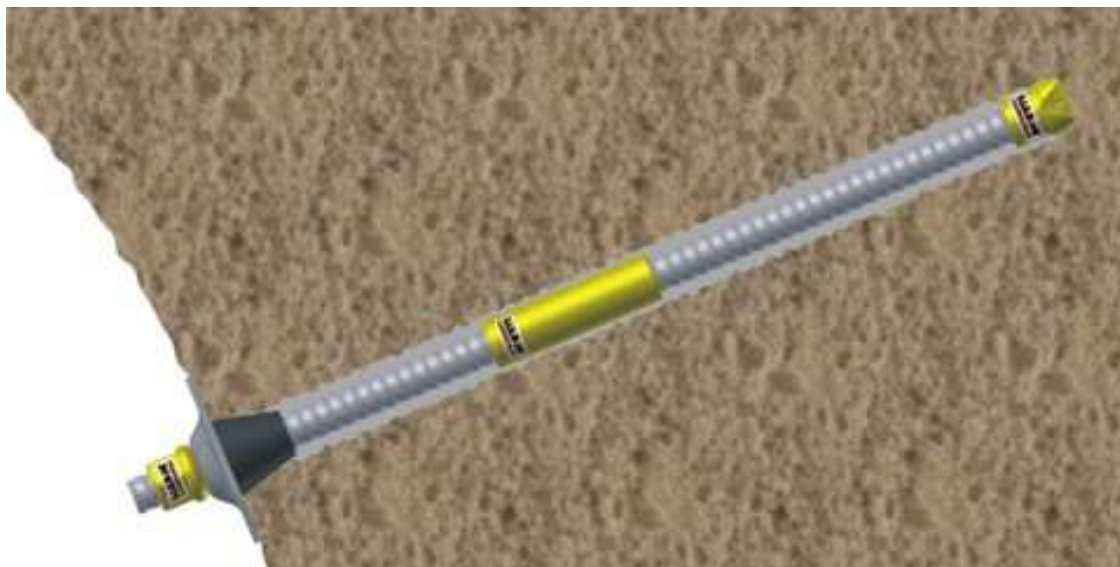
Όνομαστική εξωτερική διάμετρος ράβδου	25	32	mm
Όνομαστική διάμετρος εσωτερικής οπής ράβδου	13	18	mm
Βάρος ράβδου	2.35	3.65	Kg/m
Όνομαστική αντοχή σε εφελκυσμό	770	770	MPa (N/mm <sup>2</sup> )
Όνομαστικό όριο διαρροής σε εφελκυσμό	645	645	MPa (N/mm <sup>2</sup> )
Φορτίο θραύσεως ράβδου σε εφελκυσμό	220	340	kN
Φορτίο διαρροής σε εφελκυσμό	180	280	kN

Πίνακας 7 Τεχνικά χαρακτηριστικά Self-drilling ήλων.

Χαλύβδινη πλάκα έδρασης (θολοειδής ή επίπεδη)



Σχήμα 35 Self-Drilling ήλος τύπου ELEBAR®-SD



Σχήμα 36 Απεικόνιση τοποθετημένου Self-Drilling ήλου.

#### 4. Διάτρητοι σωλήνες (Perforated Tubes) .

Οι ράβδοι αγκυρώσεως τύπου Perfo συνίστανται από διάτρητο στρογγυλό σωλήνα, που είναι κομμένος κατά μήκος σε δύο τεμάχια. Τα δύο μισά τεμάχια δένονται με σύρμα. Η χαλύβδινη ράβδος που παραλαμβάνει τα φορτία είναι συνήθως ονομ. διαμέτρου 25 mm με νευρώσεις (REBAR) ποιότητας χάλυβα StIV (S500s). Η τσιμεντοκονία για την πλήρωση του σωλήνα Perfo αποτελείται από μίγμα τσιμέντου ή ειδικών κονιών ανάλογα με τις προδιαγραφές του έργου.



Σχήμα 37 Διάτρητοι σωλήνες (Perforated Tubes).

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα κελύφη Perfo παράγονται από διάτρητο χαλύβδινο έλασμα πάχους έως και 1 mm, μήκους 3 m και διαμέτρου 40 mm.

## **5. Fiberglass**

### ➤ **Σύνθετα Υλικά - Αρχή Λειτουργίας**

Τα σύνθετα υλικά έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της γνώσης της τεχνολογίας των υλικών και της ανάγκης σχεδιασμού υλικών με βάση τις ανάγκες που καθορίζουν οι εκάστοτε υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές.

Δύο ή περισσότερα διακριτά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας ένα σύνθετο υλικό το οποίο να κατέχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τις ιδιότητες των συστατικών υλικών για ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών. Σε πολλές περιπτώσεις σύνθετων υλικών, ένα άκαμπτο, ανθεκτικό και υψηλής αντοχής υλικό εμβαπτίζεται σε ένα εύκαμπτο και πλαστικό υλικό. Το υψηλής αντοχής υλικό αποτελεί τον «οπλισμό» και λειτουργεί ως φορέας παραλαβής των φορτίων, ενώ το πλαστικό υλικό αποτελεί τη «μήτρα» που προσδίδει συνοχή στο σύνθετο και μεταβιβάζει τα ασκούμενα φορτία στον οπλισμό.

Παραδείγματα τέτοιων σύνθετων υλικών αποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα τα αδαμαντοφόρα εργαλεία, τα προηγμένα σύνθετα με ανθρακονήματα ή οργανικές ίνες Aramid που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη κ.α.

Ανάλογος τύπος σύνθετου υλικού είναι τα αγκύρια Fiberglass τα οποία αποτελούνται από μία πλαστική μήτρα πολυμερών ενισχυμένη με ίνες υάλου υψηλής αντοχής και ακαμψίας.

### ➤ **Ίνες Υάλου**

Στα δομικά σύνθετα υλικά κατασκευών όπως και στα αγκύρια Fiberglass χρησιμοποιείται συνήθως η ποιότητα ινών υάλου E (electrical). Οι ίνες E-υάλου χαρακτηρίζονται από καλή αντοχή και ακαμψία, υψηλό λόγο αντοχής-βάρους, σταθερότητα διαστάσεων, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και αντοχή και ανθεκτικότητα στη διάβρωση σε διάφορα περιβάλλοντα (υγρασία, υψηλή θερμοκρασία κλπ.).

Οι πίνακες που ακολουθούν δίνουν την τυπική σύσταση των ινών E-υάλου καθώς και τη σύγκριση μερικών βασικών ιδιοτήτων με άλλα υλικά.



### Σύσταση Ινών Υάλου

Συστατικό Constituent	Εύρος Τυπικής Σύστασης Basic Composition Range %
SiO <sub>2</sub>	52 - 56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (+ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12 - 16
CaO	16 - 25
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 - 13
MgO	4 - 5
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	< 1

### Σύγκριση αντοχής σε εφελκυσμό

Ιδιότητα Property		Ίνες E-υάλου E-glass	Χάλυβας Steel S500s (StIV)
Πυκνότητα Density	gr/cm <sup>3</sup>	2,55	7,84-7,86
Εφελκυστική αντοχή Tensile Strength	MPa	2000 - 3450 (2-3,45 GPa)	550

#### ➤ Μήτρες

Δύο είναι οι βασικοί τύποι ρητινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά με ινοπλισμό υάλου (G-FRP):

- πολυεστερικές ρητίνες
- εποξειδικές ρητίνες.

#### Περιγραφή

Τα αγκύρια fiberglass τύπου Dureglass FL ® είναι ένα συναρμολογημένο σύστημα αποτελούμενο από ράβδους του ινοενισχυμένου υλικού, το σωλήνα ενεμάτωσης και

σειρά καταλλήλων δακτυλίων που τοποθετούνται σε τακτά μήκη και εξασφαλίζουν τη συγκράτηση των ράβδων με το σωλήνα ενεμάτωσης και παράλληλα κεντράρουν την όλη διάταξη στο διάτρημα (κεντραδόροι - αποστάτες). Ανάλογα με τον τύπο των ράβδων μπορεί να χρησιμοποιηθούν πλάκα εδράσεως και σειρά από περικόχλια ή ειδικές σφήνες για την προένταση των αγκυρίων στο διάτρημα.

Οι ράβδοι Dureglass FL ® αποτελούνται από ίνες E-υάλου που περιέχονται σε πολυεστερική μήτρα και κατασκευάζονται με την πιο σύγχρονη μέθοδο παραγωγής. Τα χαρακτηριστικά των υλικών δίνονται στους πίνακες της σελίδας 49.

Οι ράβδοι Dureglass FL ® παράγονται σε διάφορες διατομές που είτε χρησιμοποιούνται αυτόνομα με το κατάλληλο σύστημα αποστατών-κεντραδόρων, είτε μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους και να αποτελέσουν στοιχεία αγκύρωσης αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων. Η επιλογή συνδυασμού περισσοτέρων από μίας ράβδους εξαρτάται κυρίως από τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

### **Πλεονεκτήματα**

- Υψηλή εφελκυστική αντοχή: Ικανότητα παραλαβής μεγάλων φορτίων.
- Αντοχή στη διάβρωση: Είναι ανθεκτικό στη διάβρωση σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (το οποίο δεν ισχύει για τα μεταλλικά αγκύρια). Είναι κατάλληλα για αγκυρώσεις μέσης διάρκειας ή και μακράς υπό προϋποθέσεις (αλλαγή ρητίνης).
- Κόβονται εύκολα Αποφυγή εκτεταμένων φθορών στον εξοπλισμό εκσκαφής στα μέτωπα των σιηράγγων ή κατά τη διεύρυνση πιλοτικών σιηράγγων όπου έχουν να χρησιμοποιηθεί για προ ενίσχυση των πετρωμάτων.
- Μικρό βάρος: Το βάρος τους είναι περίπου το 1/4 του βάρους των μεταλλικών αγκυρίων, παρέχοντας οικονομία στα μεταφορικά κόστη και ευκολία χρήσης στο εργοτάξιο.
- Επίστρωση χαλαζιακής άμμου: Οι ράβδοι διαθέτουν επίστρωση από χαλαζιακή άμμο που αυξάνει τις δυνάμεις τριβής με το περιβάλλον ένεμα και πέτρωμα. Η αυξημένη πρόσφυση του αγκυρίου επιτρέπει την καλύτερη μεταφορά των φορτίων στις ίνες υάλου.
- Υψηλή ευκαμψία: Επιτρέπει την τοποθέτηση αγκυρίων μεγάλου μήκους ακόμα και σε σιηραγγες ή υπόγειες γαλαρίες με περιορισμένο χώρο. Οι επίπεδες ράβδοι μπορούν να τυλιχθούν με συνέπεια την οικονομία στα μεταφορικά έξοδα και τη

δυνατότητα διάθεσης ράβδων σε πολύ μεγάλα μήκη (που μπορεί να ξεπεράσουν και τα 50m).

### **Εφαρμογές αγκυρίων Fiberglass.**

- Σηραγοποιΐα: Ενίσχυση/σταθεροποίηση πετρωμάτων στο μέτωπο και στα πλαϊνά σηράγγων.
- Πιλοτικές σηράγγες: Ενίσχυση πετρωμάτων στο μέτωπο σηράγγων
- Σηραγοποιΐα - Διεύρυνση σηράγγων
- Ενίσχυση διαφραγματικού τοίχου σε φρεάτια πρόσβασης TBM (τεχνική γνωστή ως “Soft-eye”).
- Σταθεροποίηση πρανών
- Σταθεροποίηση τοιχιών
- Αγκύρωση μεταλλικών πλεγμάτων
- Προσωρινά προεντεταμένα αγκύρια

## **1.6 Διάβρωση**

### **1.6.1 Αιτίες διάβρωσης**

Οι ήλιοι καθώς και οι τένοντες των αγκυρίων είναι φέροντα δομικά στοιχεία τοποθετημένα εντός του εδάφους εκτεθειμένα σε διαβρωτικούς παράγοντες, όπως το νερό και η σύσταση του εδάφους.

Η σύσταση του εδάφους και ιδίως η ικανότητα του να προσβάλλει τα μέταλλα είναι ουσιώδης παράγοντας που επηρεάζει πολύ τα μέτρα προστασίας.

Διακρίνονται τρεις κατηγορίες εδαφών :

- Αδρανή (μη διαβρωτικά) εδάφη
- Διαβρωτικά (τοξικά) εδάφη
- Πολύ διαβρωτικά (τοξικά) εδάφη.

**Τα αδρανή (μη διαβρωτικά) εδάφη** περιέχουν πόσιμα νερά, χωρίς τοξικότητα, με μικρές μεταβολές στάθμης, ή μπορεί να μην έχουν καθόλου στάθμη υπόγειου νερού και δεν βρίσκονται σε τοξικό περιβάλλον (π.χ. κοντά σε εργοστάσια χημικών προϊόντων).

**Διαβρωτικά εδάφη** είναι εκείνα που έχουν υπόγεια νερά με όξινο pH ή με τέτοιο pH που επιτρέπει διαβρώσεις. Σε αυτά υπάγονται επίσης τα εδάφη εκείνα που έχουν συχνές

και μεγάλες μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού ή που βρίσκονται σε περιοχές με ατμόσφαιρα μέτρια διαβρωτική.

**Τα πολύ διαβρωτικά εδάφη** βρίσκονται κοντά στις ακτές της θάλασσας, κοντά σε εργοστάσια χημικών προϊόντων ή γενικότερα σε τοξικό περιβάλλον.

Η διαβρωσιμότητα του εδάφους εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό και σε τοξικά ιόντα, π.χ. χλωρίδια και θειικά ιόντα, καθώς και από τη διαπερατότητα.

Τα αδρανή εδάφη χαρακτηρίζονται από :

- ❖ Οξύτητα:  $pH < 6.5$
- ❖ Χλωρίδια: λιγότερα από 300 ή 500 mgr/lit νερού
- ❖ Θειικό νάτριο: λιγότερα από 500 mgr/lit  $Na_2SO_4$  νερού
- ❖ Θειικό μαγνήσιο: λιγότερα από 250 mgr/lit  $MgSO_4$  νερού.

Οι περιεκτικότητες σε χλωρίδια και θειικά άλατα αναφέρονται σε στάσιμα νερά. Όταν υπάρχει υπόγεια ροή, τα όρια πρέπει να κατεβούν στο 40% των αρχικών τιμών.

Στο έδαφος η διαβρωσιμότητα μπορεί να ελεγχθεί συνολικά με βάση την ηλεκτρική συμπεριφορά του. Η ειδική αντίσταση και η διαφορά δυναμικού αναγωγής - οξειδωσης περιγράφουν τη διαβρωτική ικανότητα του εδάφους πάνω στα μέταλλα. Στον πίνακα 8 δίνεται ο χαρακτηρισμός της διαβρωσιμότητας σε ομοιόμορφα εδάφη.

Χαρακτηρισμός	Ειδική αντίσταση	Διαφορά δυναμικού αναγωγής - οξειδωσης
	$\Omega cm$	mV
Πολύ διαβρωτικό	< 700	< 100
Διαβρωτικό	700 έως 2.000	100 έως 200
Μέτρια διαβρωτικό	2.000 έως 5.000	200 έως 400
Αδρανές ή λίγο διαβρωτικό	> 5.000	> 400 έως 430

Πίνακας 8 Χαρακτηρισμός της διαβρωσιμότητας του εδάφους.

Τα πολύ διαπερατά εδάφη ευνοούν τη διάβρωση, διότι επιτρέπουν την υπόγεια ροή.

Τα υπόγεια ύδατα διακρίνονται σε:

- **Πολύ καθαρό νερό.**

Θεωρείται επικίνδυνο εάν η συγκέντρωση του CaO είναι λιγότερη από 300mg/lit. Τέτοιου είδους ύδατα διαλύουν την άσβεστο και υδρολύουν τα πυριτικά και τα αργιλικά άλατα στο τσιμέντο.

➤ **Όξινα ύδατα.**

Αν το pH είναι μικρότερο του 6.5, θεωρούνται επικίνδυνα καθώς μπορούν να προσβάλλουν τα πυριτικά συστατικά του τσιμέντου. Συνήθως είναι βιομηχανικά ύδατα, ύδατα με διαλελυμένο διοξείδιο του άνθρακα, ή ύδατα που περιέχουν χουμικά οξέα.

➤ **Νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε θειϊκά άλατα.**

Το θειϊκό άλας αντιδρά με το αργιλικό τριασβέστιο ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) του τσιμέντου και δημιουργούν άλατα που αποδιοργανώνουν το τσιμέντο προκαλώντας διόγκωση. Ανάμεσα τους είναι α) το σεληνιώδες νερό, με υψηλή ποσότητα διαλελυμένου θειϊκού νατρίου ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), και β) μαγνησιακό νερό, με υψηλή ποσότητα διαλελυμένου θειϊκού μαγνησίου ( $\text{MgSO}_4$ ). Ύδατα που περιέχουν τέτοια άλατα θεωρούνται πολύ επικίνδυνα όταν η συγκέντρωση των αλάτων ξεπερνά τα 0.5gr/lit σε σεληνιώδες νερό και 0.25gr/lit σε μαγνησιακό. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές αναφέρονται σε στάσιμα ύδατα ενώ όταν υπάρχει υπόγεια ροή οι συγκεντρώσεις είναι 40% πάνω από αυτές.

### 1.6.2 Μηχανισμοί διάβρωσης

Ο σίδηρος, όπως και τα περισσότερα μέταλλα, παράγονται από τα οξειδία τους με αναγωγή. Αυτό σημαίνει ότι το οξείδιο του σιδήρου είναι πιο σταθερή χημική ένωση και επομένως ο καθαρός σίδηρος, όταν βρεθεί σε κατάλληλες συνθήκες έχει την τάση να ξαναγίνει οξείδιο. Οι κατάλληλες συνθήκες διαμορφώνονται, όταν εκτός από το οξυγόνο συνυπάρχουν επίσης νερό, θειϊκά ή χλωριούχα άλατα και γενικά ουσίες που δρουν σαν καταλύτες ή συμμετέχουν σε ενδιάμεσες χημικές αντιδράσεις.

Γενικά, κανένα μέταλλο δεν είναι χημικώς καθαρό, αντίθετα όλα περιέχουν απειροελάχιστες ποσότητες από άλλα μέταλλα ή επιφανειακές οξειδώσεις. Τα διαφορετικά μέταλλα ή οι οξειδώσεις του ίδιου του μετάλλου προκαλούν διαφορές δυναμικού και δημιουργούν τοπικά ηλεκτρικά ρεύματα. Τότε με την παρουσία της υγρασίας ή του νερού και των διαλυμένων αλάτων αρχίζει ένα κανονικό φαινόμενο ηλεκτρόλυσης, όπως ακριβώς συμβαίνει σε μια μικροσκοπική ηλεκτρική στήλη. Το μέταλλο παίζει το ρόλο ανόδου, εφόσον φορτίζεται με ηλεκτραρνητικό φορτίο και το οξείδιο του μετάλλου το ρόλο της καθόδου.

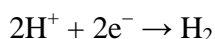
Υπάρχουν τρεις κύριοι μηχανισμοί διάβρωσης:

### 1. Διάβρωση με βελονισμούς (pitting).

Κάτω από συνθήκες χημικής ή/και φυσικής ανομοιογένειας της ράβδου, επέρχεται ιονισμός και στην άνοδο και στην κάθοδο σχηματίζοντας ένα διμεταλλικό κελί.

### 2. Διάβρωση με δημιουργία ρωγμής κάτω από τασικές συνθήκες (Hydrogen embrittlement).

Αυτός ο μηχανισμός διάβρωσης επηρεάζει συνήθως τους χάλυβες υψηλής αντοχής. Η πιο γνωστή αιτία θρυμματισμού είναι το H<sub>2</sub>. Η αντίδραση :

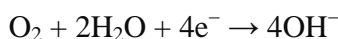


ευνοείται σε όξινο περιβάλλον, όπου το υδρογόνο που παράγεται έχει την τάση να επιδρά αρνητικά στην μικροδομή του χάλυβα.

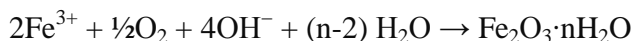
Έρευνες που έχουν γίνει σχετικά με την ψαθυρή συμπεριφορά λόγω σχηματισμού υδρογόνου (H<sub>2</sub>) δείχνουν ότι οι χάλυβες που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε λάδι καθώς και αυτοί που έχουν υποστεί επαναφορά είναι πολύ πιο επιρρεπείς στο να παρουσιάσουν ψαθυρή συμπεριφορά από τους εξελασμένους. Αυτή η άποψη βέβαια δεν είναι ομόφωνα αποδεκτή για τους προεντεταμένους χάλυβες όσον αφορά το πόσο επιρρεπείς είναι όταν βρίσκονται εντός αλκαλικού ενέματος.

### 3. Διάβρωση με παρουσία οξυγόνου.

Χαμηλότερη συγκέντρωση οξυγόνου στην κάθοδο επιταχύνει την διάβρωση:



Η αντίδραση ευνοείται από αλκαλικές συνθήκες και η συγκέντρωση οξυγόνου στην άνοδο οδηγούν στον σχηματισμό μίας στρώσης σκουριάς:



Σε αλκαλικό περιβάλλον με την χρήση αρκετά πυκνού ενέματος η ράβδος παθητικοποιείται. Ωστόσο, η σκουριά που σχηματίζεται μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα με κυκλοφορία ή διείσδυση νερού, οδηγώντας στην προοδευτική διάλυση της ράβδου.

Υπάρχουν δύο κύριοι χημικοί ρυθμιστές αυτών των αντιδράσεων – το νερό και ηλεκτροχημικό δυναμικό.

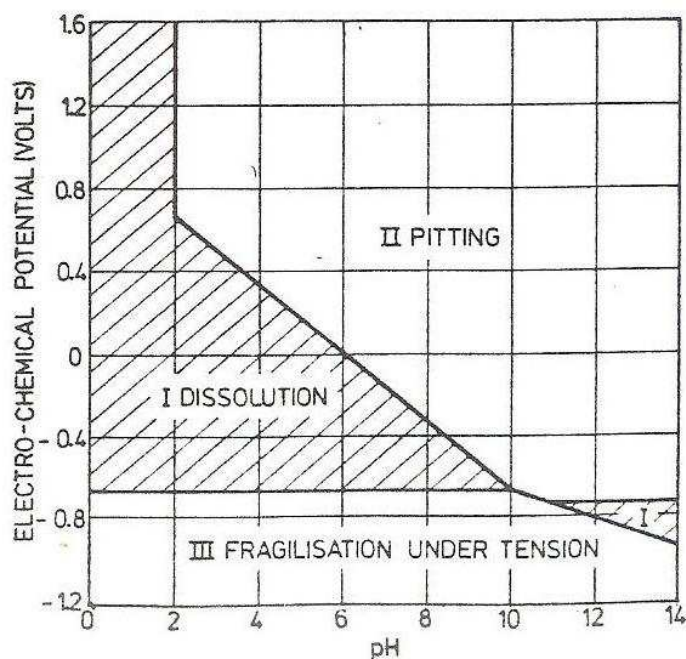
#### I. Νερό.

Ανεξάρτητα από το είδος της διάβρωσης, μπορεί να συμβεί μόνο σε ένα ιοντικό μέσο, και υπό φυσικές συνθήκες το νερό είναι ο πιο ευρύς φορέας. Η ανανέωση του νερού αυξάνει τον κίνδυνο διάβρωσης, ενώ παράλληλα η υγρασία είναι πολύ

πιο επικίνδυνη παράμετρος. Οι παράγοντες αυτοί είναι στενά αλληλένδετοι: η παροχή οξυγόνου, η ένταση του φαινομένου της μικροκυψέλης (microcell) από τον σχηματισμό καθόδου στην διεπιφάνεια νερού/αέρα, και η δράση της διάβρωσης με δημιουργία ρωγμής κάτω από τασικές συνθήκες.

## II. Ηλεκτροχημικό δυναμικό.

Παρατηρώντας το επόμενο σχήμα (Σχήμα 38), παρατηρούμε πως στην περιοχή I σχηματίζονται σιδηρούχα ιόντα και γενικότερη διάλυση. Άρα για να αποφευχθεί η διάβρωση πρέπει να βρισκόμαστε σε pH 8.5-13.5. Ωστόσο, αυτό δεν είναι αρκετό καθώς είναι γνωστό (περιοχή II) πως παρά την παθητικοποιητική δράση του  $Fe_2O_3$  μπορεί να υπάρξει διάβρωση με βελονισμούς κάτω από την επίδραση ιόντων, όπως  $Cl^-$  αν βρίσκονται στο ένεμα. Επίσης στην περιοχή III, διάβρωση με δημιουργία ρωγμής μπορεί να συμβεί.



Σχήμα 38 Σχέση του τύπου διάβρωσης με το pH και το ηλεκτροχημικό δυναμικό (Caton, 1972).

### 1.6.3 Περιορισμός διάβρωσης.

Οι κίνδυνος της διάβρωσης μπορεί να περιορισθεί με τους εξής τρόπους:

- Το pH του ενέματος να κυμαίνεται από 9 έως 12. Χλωρίδια, σουλφίδια, θειικά και ανθρακικά ιόντα μειώνουν το pH του ενέματος και ενισχύουν την ηλεκτρολυτική δράση.
- Αποφεύγοντας την πιθανότητα βλαβερών ιόντων να έρθουν σε επαφή με τον χάλυβα.
- Επιλέγοντας χάλυβες με μικρή ευαισθησία στην διάβρωση υπό τάση και αφαιρώντας ανιόντα από το ένεμα που ευνοούν την διόδο του υδρογόνου.
- Εμποδίζοντας όσο το δυνατόν περισσότερο την κυκλοφορία του νερού.

Η διάβρωση βοηθάται και από το πορώδες ένεμα ή τσιμέντο και σε αυτές τις περιπτώσεις μία στρώση 25mm δεν είναι αρκετή. Επομένως πρέπει να ορίζεται και το πορώδες του ενέματος και όχι μόνο το πάχος του.

Η προένταση του χάλυβα μπορεί να επιταχύνει τον ρυθμό και την ένταση της διάβρωσης του, αν και οι ελαστικές ιδιότητες και οι αντοχές μη εντεταμένων χαλύβων επηρεάζονται περίπου το ίδιο. Οι χάλυβες που έχουν υποστεί βαφή καθώς και αυτοί που έχουν υποστεί επαναφορά είναι πολύ πιο επιρρεπείς στην διάβρωση από χάλυβες ψυχρής εξέλασης. Η διάβρωση υπό τάση είναι πιο οξεία από την συνηθισμένη διάβρωση για τρεις κυρίως λόγους:

- 1) Η ένταση και χαλάρωση όταν είναι επαναλαμβανόμενες καταστρέφουν συνεχώς κάθε προστατευτικό όξινο στρώμα.
- 2) Η ένταση βοηθά την δημιουργία μικρο-ρωγματώσεων και
- 3) Οι προεντεταμένοι χάλυβες είναι πιο επιρρεπείς από τους συνηθισμένους.

### 1.6.4 Προστασία ήλων από την διάβρωση.

Πολλοί τρόποι προστασίας έναντι της διάβρωσης έχουν εφαρμοστεί – και σε μερικές περιπτώσεις εγκαταλειφθεί – σε ηλώσεις. Ένας διαχωρισμός των μέτρων προστασίας είναι σε μέτρα προστασίας πριν την τοποθέτηση και σε μέτρα προστασίας μετά την τοποθέτηση.

Επαρκής προστασία ενός ήλου από την διάβρωση συνήθως επιτυγχάνεται από την πλήρη τοποθέτηση της ράβδου εντός ενέματος. Επιπρόσθετη προστασία στο ελεύθερο μήκος μπορεί να επιτευχθεί με θερμο-συστελλόμενο σωληνοειδές περίβλημα (heat-shrink), με θύλακα πλαστικό ή από ανοξείδωτο χάλυβα και με ρητινική επίστρωση ή επίστρωση



ουρεθάνης. Για τους πλαστικούς ή ανοξειδωτού χάλυβα θύλακες, το κενό μεταξύ του θύλακα και της ράβδου πρέπει να καλύπτεται με κατάλληλο λιπαντικό τύπου πάστας με την απαιτούμενη διάρκεια ζωής.

Για επιπλέον προστασία του πακτωμένου τμήματος, η ράβδος πρέπει να επικαλυφθεί, να γαλβανισθεί ή να επιμεταλλωθεί. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ράβδοι από ανοξειδωτο χάλυβα. Επίσης, μόνο οι παραμορφωμένες ράβδοι πρέπει να επικαλύπτονται. Επιπλέον, πρέπει να διεξάγονται αυστηροί έλεγχοι για την διασφάλιση της μη μείωσης της ικανότητας πάκτωσης από την πρόσθετη προστασία.

Ακόμη όταν χρησιμοποιούνται ήλοι πλήρους συνάφειας, συνήθως το περικόχλιο και η πλάκα στήριξης αφήνονται χωρίς επεξεργασία αν και εμποτισμένες ταινίες, εποξειδικές ενώσεις, μοργιά, λιπαντικά και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχουν εφαρμοσθεί επιτυχώς.

## **1.7 Κόστος ηλώσεων**

Σε οποιαδήποτε μελέτη εκσκαφής ενός πετρώματος, είναι σημαντικό να προσδιορίζεται το κόστος υποστήριξης. Οι πληροφορίες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ως εξής:

- Στην εκτίμηση και σύγκριση των διαφόρων συστημάτων υποστήριξης από άποψη κόστους.
- Στην βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους της εκσκαφής, ή σε περίπτωση μεταλλείου, του κόστους παραγωγής.

Το συνολικό κόστος ενός συστήματος υποστήριξης με ήλους μπορεί να χωριστεί σε άμεσο και έμμεσο κόστος.

### **1.7.1 Άμεσο κόστος.**

Το άμεσο κόστος είναι όλα τα κόστη που περιλαμβάνονται στις ενέργειες αγκύρωσης μέχρι να ολοκληρωθεί η τοποθέτηση του ήλου. Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- Κόστος υλικού: ήλος, πλάκα στήριξης, κόστος ενέματος.
- Απώλειες υλικού: ορισμένα από τα υλικά αγκύρωσης που αγοράζονται θα χαθούν ή θα καταστραφούν κατά την τοποθέτηση.
- Μεταφορά υλικού: τα υλικά αγκύρωσης συνήθως πωλούνται από εργοστάσια ή κέντρα διανομής. Το κόστος μεταφοράς στο εργοτάξιο πρέπει να προστεθεί. Η

απόσταση καθώς και το βάρος των υλικών πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά την εκτίμηση κόστους των διαφόρων συστημάτων.

- Κόστος διατήρησης: ένας αριθμός από παραμέτρους, για παράδειγμα η διάμετρος του διατρήματος και το μήκος του, η διατρησιμότητα του πετρώματος και ο εξοπλισμός διάτρησης αποτελούν το κόστος διάτρησης.
- Κόστος τοποθέτησης: περιλαμβάνει το κόστος του εξοπλισμού τοποθέτησης, το κόστος συντήρησης, κλειδιά στρέψης, αντλίες ενέματος ή νερού.
- Κόστος εργασιών: πρέπει να υπολογίζεται στις ηλώσεις με βάση τις βάρδιες, από την αρχή της βάρδιας, χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν οι ώρες μεταφοράς στο χώρο εργασίας, το διάλειμμα φαγητού κλπ.

### **1.7.2 Έμμεσο κόστος.**

Το έμμεσο κόστος εξαρτάται από το αν η ενίσχυση είναι αναπόσπαστο τμήμα του κύκλου εκσκαφής ή όχι. Αν η τοποθέτηση ήλων δεν είναι αναπόσπαστο τμήμα του κύκλου εκσκαφής, αλλά εκτελείται σαν ανεξάρτητη δραστηριότητα, το έμμεσο κόστος είναι το ίδιο με το πάγιο κόστος για το εργοτάξιο.

### **1.7.3 Ελαχιστοποίηση κόστους ηλώσεων.**

Η βέλτιστη ενίσχυση, από οικονομικής απόψεως, επιτυγχάνεται όταν το άμεσο και έμμεσο κόστος ελαχιστοποιούνται. Στην περίπτωση μιας μεγάλης πτώσεως τεμάχους, τα έμμεσα κόστη θα συσχετισθούν με τα άμεσα, εάν η αιτία της πτώσης είναι η ανεπαρκής ήλωση. Έμμεσα κόστη μιας πτώσεως δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν εύκολα πριν συμβεί. Ωστόσο, το κόστος μπορεί να είναι τάξεις μεγαλύτερο από το κόστος επαρκούς ήλωσης. Αυτό δείχνει ότι η πιο οικονομική ενίσχυση καθορίζεται από τα έμμεσα κόστη και όχι τα άμεσα. Σε δύσκολες γεωτεχνικές συνθήκες ή σε περιπτώσεις που μπορεί να υπάρξει μεγάλο έμμεσο κόστος το άμεσο είναι δευτερευούσης σημασίας από οικονομικής πλευράς.

## **2 Κεφάλαιο - Τοποθέτηση Ηλώσεων - Δοκιμές και μετρήσεις ελέγχου συστήματος ήλωσης.**

Η τοποθέτηση των ηλώσεων και των μεταλλικών καλωδίων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του κύκλου εκσκαφής και να δίνει προσωρινή υποστήριξη στο πέτρωμα. Καθώς υπάρχουν πολλοί τύποι ηλώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μόνιμα συστήματα υποστηρίξεως, είναι σημαντικό να θεωρούνται τα προσωρινά συστήματα υποστήριξης σαν τμήμα ενός μετέπειτα επιπρόσθετα εγκατεστημένου και μακροχρόνιου συστήματος υποστήριξης. Η τοποθέτηση πρέπει να γίνεται από κατάλληλα εκπαιδευμένο και έμπειρο προσωπικό.

Γενικώς, στην τοποθέτηση ηλώσεων και μεταλλικών καλωδίων το μόνο πρόβλημα είναι η πρόσβαση στο περιβάλλον τοποθέτησης. Η χειρονακτική διαδικασία εξακολουθεί να είναι η πιο συνήθης τεχνική τοποθέτησης. Ωστόσο, είναι διαθέσιμος πλήρως μηχανοποιημένος εξοπλισμός κοχλίωσης για κάθε τύπο ηλώσεως. Ο εξοπλισμός αυτός είναι σε θέση να εκτελέσει όλο τον κύκλο της τοποθέτησεως. Η ικανότητα κοχλίωσης είναι συνήθως μεγάλη καθώς και η ομοιογένεια στην ποιότητα είναι γενικώς καλύτερη από την αυτήν της χειρονακτικής τοποθέτησης. Επιπλέον, από άποψη ασφάλειας και υγιεινής, ο πλήρως μηχανοποιημένος εξοπλισμός κοχλίωσης προσφέρει πολύ καλές συνθήκες εργασίας για τον χειριστή.

Υπάρχουν πολυάριθμες τεχνικές τοποθέτησης οι οποίες εφαρμόζονται για να καλύψουν τις τοπικές απαιτήσεις και περιορισμούς. Όμως, πριν από την τοποθέτηση πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στο απαραίτητο «ξεσκάρωμα». Η πιο συχνή αιτία ατυχημάτων στις υπόγειες εκσκαφές είναι η ανεπαρκής απόξεση μετά από μία ανατίναξη. Η μηχανική απόξεση προτιμάται καθώς παρέχει καλύτερα αποτελέσματα και είναι πιο ασφαλής για το προσωπικό. Ωστόσο, εκτεταμένη απόξεση μπορεί να επιφέρει το δυσμενές αποτέλεσμα της αστάθειας του πετρώματος για αυτό χρειάζεται μεγάλη προσοχή έτσι ώστε η σφύρα απόξεσης να μην λειτουργεί σαν εκσκαφέας.

### **2.1 Τοποθέτηση ήλων μηχανικής αγκύρωσης.**

Η διάμετρος του διατρήματος είναι μεγίστης σημασίας όσον αφορά την τοποθέτηση ήλων με μηχανικά διαστελλόμενο κωνικό περιβλήμα. Ο ήλος δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε μία κάτω του κανονικού μεγέθους ή υπερμεγέθη οπή. Για να τοποθετηθεί, ο ήλος πιέζεται προς το εσωτερικό της οπής μέχρι η πλάκα στήριξης να έρθει σε επαφή με το πέτρωμα. Τότε το περικόχλιο στρέφεται μέχρι να επιτευχθεί μια προκαθορισμένη ροπή στρέψεως. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με

την χρήση ενός οργάνου το οποίο αυτόματα απενεργοποιείται φτάνοντας σε πίεση αντίστοιχη με την προκαθορισμένη ροπή στρέψεως. Η προτεινόμενη ροπή στρέψης κυμαίνεται από 135 έως 340 Nm (100 – 250 ft-lb) ή 4,5 kN (1000 lb) φορτίο, πάνω ή κάτω από το 50% του ορίου διαρροής του ήλου ή της φέρουσας ικανότητας της αγκύρωσης αναλόγως με το πιο είναι χαμηλότερο. Καθώς η ροπή στρέψεως εφαρμόζεται στον ήλο, ο ήλος εφελκύεται εφόσον το διογκούμενο κωνικό περίβλημα μαγκώνει σταθερά στα τοιχώματα της οπής. Η σχέση ανάμεσα σε ροπή και τάνυση ήλου είναι η εξής:

$$P = CT$$

όπου P η δύναμη τάνυσης σε N

T η ροπή στρέψεως σε Nm και

C σταθερά.

Η σταθερά C είναι ίση με 50 για ήλο 16 mm και 40 για ήλο 19 mm. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η εφαρμοζόμενη ώθηση στον ήλο κατά την τοποθέτηση και η γωνία κατά την οποία τοποθετείται ο ήλος.

Η αποτελεσματικότητα των ήλων με μηχανικά διαστελλόμενο κωνικό περίβλημα εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες, την αγκύρωση του περιβλήματος πάνω στα τοιχώματα της οπής και από την επαφή ανάμεσα στο πέτρωμα και την πλάκα στερέωσης. Εκτός από το μέγεθος του διατρήματος και τον τύπο του πετρώματος, η ακεραιότητα του πετρώματος στην ζώνη αγκύρωσης επηρεάζει την δύναμη αγκύρωσης. Σε συνθήκες σκληρών πετρωμάτων μπορούν να επιτευχθούν υψηλά φορτία. Ωστόσο, αν ο ήλος τοποθετηθεί σε απόσταση μεταξύ 10-20 m από μία ανατίναξη ο ήλος μπορεί να χάσει την ένταση του και πρέπει να επαναενταθεί. Σε ασθενέστερα πετρώματα, η λειτουργικότητα του ήλου μειώνεται από τοπικό θρυμματισμό του πετρώματος από το κέλυφος. Επίσης, ασυνέχειες πληρωμένες με αργλικό υλικό μπορούν σε κατά άλλα καλές συνθήκες να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα όταν συναντηθούν. Σε πολύ ασθενή πετρώματα όπως ρωγματομένη σχιστή άργιλος ή πηλίτης, η χρήση ήλων μηχανικής αγκύρωσης δεν συνιστάται.

Η τοποθέτηση και η αποτελεσματικότητα του ήλου είναι ανεξάρτητη των υδατικών συνθηκών εντός του διάτρηματος όταν ο ήλος χρησιμοποιείται για προσωρινή χρήση. Ακολουθεί post-grouting (μετένεση) αν ο ήλος αποτελεί μέρος της μόνιμης υποστήριξης.

Ο χρόνος τοποθέτησης ενός ήλου, με μηχανικά διαστελλόμενο κωνικό περίβλημα, μήκους 2 m είναι 75 sec αν παραλειφθεί ο χρόνος που απαιτείται για την διάνοιξη του διατρήματος.



Σχήμα 39 Ένταση ήλου με μηχανικά διογκούμενο κωνικό περίβλημα με χρήση κλειδιού ελέγχου ροπής στρέψεως (Stillborg, 1994).

## **2.2 Τοποθέτηση ήλων που αγκυρώνονται με χρήση ενέματος ή ρητίνης και μεταλλικών καλωδίων.**

Η διαδικασία τοποθέτησης ήλων που αγκυρώνονται με χρήση ενέματος ή ρητίνης και η διαδικασία τοποθέτησης μεταλλικών καλωδίων παρουσιάζουν διαφορές καθώς και ομοιότητες. Μία βασική διαφορά είναι ότι οι ρητίνες δεν χρησιμοποιούνται ποτέ με μεταλλικά καλώδια, ενώ η τοποθέτηση με τη χρήση τσιμεντένεματος είναι σχεδόν πανομοιότυπη.

### **2.2.1 Τοποθέτηση ήλων που αγκυρώνονται με χρήση ενέματος ή ρητίνης.**

Η διαδικασία τοποθέτησης ηλώσεων με ένεμα είναι σχεδόν όμοιες, είτε πρόκειται για τσιμεντένεμα είτε για ρητίνη. Το ένεμα τοποθετείται στο διάτρημα είτε με χρήση αντλιών είτε με φυσίγγια. Όταν το ένεμα εισέρχεται στο διάτρημα μία συνηθισμένη τακτική είναι ο σωλήνας του ενέματος να πιέζεται μέχρι τον πυθμένα του διατρήματος και να γεμίζει το διάτρημα καθώς ανακτάται από τον πυθμένα. Είναι σημαντική η

εξασφάλιση της συνεχούς επαφής του σωλήνα με το ένεμα (τσιμέντο/ρητίνη), καθώς ανακτάται, για να μην δημιουργηθούν θύλακες αέρα. Όταν γεμίσει το διάτρημα, ο ήλος εισπιέζεται στο διάτρημα εν μέσω ενέματος, μέχρι να φτάσει στον πυθμένα του διατρήματος ή μέχρι να υπάρξει πλήρης επαφή ανάμεσα στην πλάκα στερέωσης και την επιφάνεια του πετρώματος.

Για να διατηρηθεί το ένεμα σε κατακόρυφα και ανιούσας κλίσης διατρήματα πρέπει να είναι αρκετά παχύρρευστο. Είναι αρκετά συνηθισμένο να χρησιμοποιείται ένεμα με αναλογία νερού/τσιμέντου (κατά βάρος) από 0.30 έως 0.35. Το τσιμεντένεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με χρήση ενός πρόσθετου που θα επιταχύνει τη σκλήρυνση του. Εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί τσιμεντοκονίαμα προτείνεται χρήση έτοιμου κονιάματος (ready mixed mortar).

Όταν το ένεμα εισέρχεται στο διάτρημα υπάρχει το πρόβλημα του σφραγίσματος του στομίου του διατρήματος. Το σωστό σφράγισμα είναι απαραίτητο, ειδικά σε κατακόρυφα διατρήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σφράγισμα εμποδίζει την υπερβολική απομάκρυνση ενέματος από το διάτρημα μετά την τοποθέτηση του ήλου και επιπλέον εμποδίζει την πτώση του ήλου μέχρι να πραγματοποιηθεί η σκλήρυνση του τσιμεντένεματος. Επιπλέον, το μέγεθος του διατρήματος δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της ενεμάτωσης.

Μια πιο εύχρηστη και γρήγορη μέθοδος είναι η τοποθέτηση με χρήση φυσιγγίων. Υπάρχουν φυσίγγια και για τσιμέντο αλλά και για ρητίνη. Τα πιο συνήθη φυσίγγια τσιμέντου περιέχουν τσιμέντο και πρόσθετα μέσα σε έναν πορώδες δοχείο το οποίο, πριν τοποθετηθεί στο διάτρημα, βυθίζεται μέσα σε νερό.

Όσον αφορά τις ρητίνες, για το φυσίγγιο ρητίνης είναι απαραίτητη η ανάμειξη. Η ανάμειξη της ρητίνης γίνεται καθώς ο ήλος περιστρέφεται κατά την τοποθέτηση. Ένας τρόπος μείωσης του κόστους χρήσεως ρητινών είναι η συνδυαστική χρήση φυσιγγίων ρητίνης με φυσίγγια τσιμέντου.

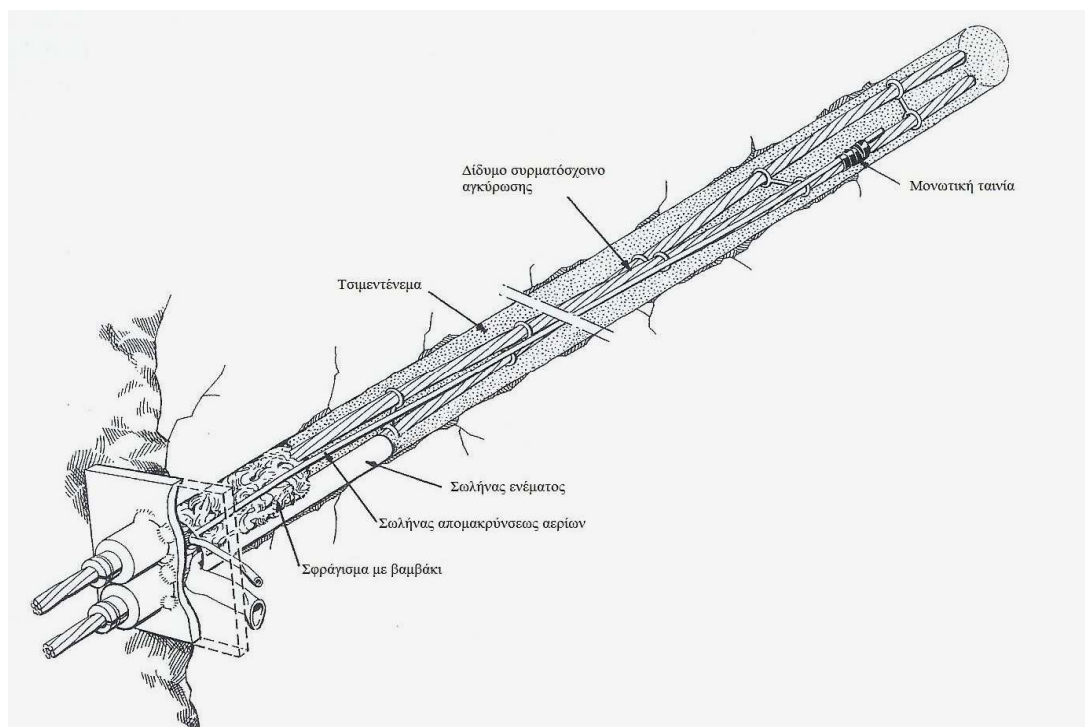
Το πρόβλημα της απώλειας υπερβολικής ποσότητας ενέματος από το διάτρημα δεν υπάρχει όταν χρησιμοποιούνται φυσίγγια καθώς αυτά παρέχουν πιο πυκνό μείγμα. Το πρόβλημα όμως συγκράτησης των ήλων εντός του διατρήματος μέχρι να σκληρυνθεί το τσιμέντο όταν πρόκειται για κατακόρυφα διατρήματα, εξακολουθεί να υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση. Ακόμη, στην περίπτωση των φυσιγγίων τσιμέντου το μέγεθος του διατρήματος επηρεάζει την ποιότητα της ενεμάτωσης.

### 2.2.2 Τοποθέτηση μεταλλικών καλωδίων.

Μικρού μήκους μεταλλικά καλώδια (μήκους μικρότερου των 6 m) μπορούν να αντικαταστήσουν την μεταλλική ράβδο ή την ράβδο με σπείρωμα (threaded bar) σε ένα σύστημα υποστήριξης. Η διαδικασία τοποθέτησης είναι ίδια με αυτή για τους ήλους με ένεμα με μόνη διαφορά ότι ρητίνη ή φυσίγγια δεν χρησιμοποιούνται. Ο χρόνος τοποθέτησης ενός μεταλλικού καλωδίου μήκους 2m (6.5 ft) όπου η ενεμάτωση είναι σε όλο το μήκος του, αν παραλειφθεί ο χρόνος που απαιτείται για την διάνοιξη του διατρήματος, είναι 100 sec.

Για την ενεμάτωση μεγάλων μεταλλικών καλωδίων, μεγαλύτερων των 6m, χρησιμοποιείται μόνο τσιμέντο. Η διαδικασία τοποθέτησης μεταλλικών καλωδίων μεγάλου μήκους σε οριζόντια και κατιούσας κλίσης διατρήματα είναι η εξής: ο σωλήνας ενέματος εισέρχεται έως τον πυθμένα του διατρήματος και ανακτάται καθώς το διάτρημα γεμίζει με τσιμέντο, και αφού γεμίσει το διάτρημα, το μεταλλικό καλώδιο πιέζεται εντός του διατρήματος μέχρι να φτάσει στον πυθμένα. Συνιστάται το μήκος του καλωδίου να είναι μετρημένο με ακρίβεια έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η πλήρης εισαγωγή του καλωδίου εντός του διατρήματος.

Όσον αφορά την τοποθέτηση μεταλλικών καλωδίων μεγάλου μήκους σε οριζόντια και ανιούσας κλίσης, αρχικά το καλώδιο εισέρχεται έως το πυθμένα του διατρήματος μαζί με έναν δύσκαμπτο σωλήνα απομακρύνσεως αερίων από νάυλον ή πολυαιθυλένιο. Όταν ο σωλήνας ενέματος εισέλθει περίπου 0.5 m (1.5 ft) μέσα στο διάτρημα, τότε το διάτρημα σφραγίζεται στο στόμιο. Σε αρκετά απότομης κλίσεως διατρήματα το καλώδιο πρέπει να στερεώνεται στη θέση του για αποφυγή ολισθήσεως του εκτός διατρήματος. Το καλώδιο στερεώνεται με διάταξη αγκύρωσης στη κορυφή ή με κάποια διάταξη ασφάλισης (κλειδώματος) στο στόμιο του διατρήματος. Μόλις σφραγισθεί το διάτρημα και το καλώδιο είναι «κλειδωμένο» στην θέση του, το διάτρημα αρχίζει να γεμίζει με τσιμεντένεμα και ταυτόχρονα ο αέρας που είναι στο εσωτερικό εξέρχεται από τον σωλήνα εξαέρωσης. Το διάτρημα έχει γεμίσει με τσιμεντένεμα όταν αρχίζει να βγαίνει από τον σωλήνα. Τέλος, ο σωλήνας ενεμάτωσης σφραγίζεται και κόβεται.



Σχήμα 40 Τοποθέτηση μεταλλικού καλωδίου μεγάλου μήκους (Stillborg, 1994).

Έχει επιπλέον αποδειχθεί (Stillborg, 1984) πως παρά το γεγονός ότι η δύναμη συνάφειας ανάμεσα στο μεταλλικό καλώδιο και το ένεμα αυξάνεται όσο η αναλογία νερού/τσιμέντου μειώνεται, η επιλογή της αναλογίας αυτής περιορίζεται από την ικανότητα του διαθέσιμου εξοπλισμού μείξεως και εισπίεσεως. Η καταλληλότερη αναλογία στην πράξη είναι 0.4 (κατά βάρος). Ακόμη, η δύναμη συνάφειας αυξάνεται και με χρήση προσθέτων στο τσιμεντένεμα. Ωστόσο, πολύπλοκες εργασίες στην πράξη έχουν επίδραση στην ενεμάτωση που είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Συμπερασματικά, η χρήση οποιουδήποτε προσθέτου, συμπεριλαμβανομένης και της άμμου, θα κάνει την τοποθέτηση πιο ακριβή και πιο δύσκολη στο να ελεγχθεί.

Μηχανικός εξοπλισμός για την τοποθέτηση καλωδίων προς οποιαδήποτε κατεύθυνση είναι διαθέσιμος στο εμπόριο. Επιπλέον, η τοποθέτηση καλωδίων σε αρκετά απότομες και ανοδικής κλίσεως διατρήματα, μπορεί να είναι πολύ δύσκολη και μη αποδοτική.

Τέλος, ο χρόνος τοποθέτησης ενός μεταλλικού καλωδίου μήκους 20m (65ft) με πλήρη ενεμάτωση, αν παραλειφθεί ο χρόνος που απαιτείται για την διάνοιξη του διατρήματος, αλλά με την συμβολή ενός μηχανικού τροφοδότη, είναι, σε ένα διάτρημα καθοδικής κλίσεως, συνήθως, 30 min.



### 2.3 Τοποθέτηση ήλων αγκύρωσης τριβής.

Η διαδικασία τοποθέτησης των δύο τύπων ηλώσεων αγκύρωσης τριβής, του τύπου Split Set και του τύπου Swellex, είναι αρκετά διαφορετική.

Ο ήλος τύπου Split Set πιέζεται εντός του διατρήματος. Το διάτρημα είναι ελαφρώς μικρότερης διαμέτρου από αυτήν του ήλου. Συχνά χρησιμοποιείται διατρητική αερόσφουρα ανιούσης διάτρησης ή διατρητικό jack-leg. Η μη ακριβής διάμετρος του διατρήματος είναι η μεγαλύτερη αιτία αστοχίας κατά την τοποθέτηση. Επίσης, η διάμετρος (του διατρήματος) είναι καθοριστική και όσον αφορά την υποστηρικτική δράση του ήλου Split Set μετά την τοποθέτηση. Επιπλέον, εάν η διάμετρος είναι πολύ μικρή, ο ήλος είναι πολύ δύσκολο να τοποθετηθεί, ενώ εάν είναι πολύ μεγάλη, τότε η δύναμη συγκράτησης του ήλου δεν είναι επαρκής. Ο ήλος δεν μπορεί να τανυσθεί αλλά δίνει άμεση υποστήριξη μετά την τοποθέτηση. Ο ήλος Split Set δεν είναι κατάλληλος για μόνιμη ενίσχυση, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικιλία συνθηκών, όμως είναι λιγότερο κατάλληλος σε πετρώματα που είναι ρωγματοωμένα ή/και μαλακά.

Ο χρόνος τοποθέτησης, για έναν ήλο τύπου Split Set μήκους 1.8 m (6 ft), είναι συνήθως 40 sec (εξαιρώντας τον χρόνο διάτρησης του διατρήματος).

Όσον αφορά την τοποθέτηση ήλων τύπου Swellex, είναι αρκετά απλή και δεν απαιτεί την συμβολή κανενός είδους μεταλλευτικού εξοπλισμού μετά την διάνοιξη του διατρήματος. Στην χειρωνακτική κοχλίωση, ο ήλος τοποθετείται στο διάτρημα και μία αντλία ύδατος υψηλής πίεσεως χρησιμοποιείται για την διόγκωση του ήλου εντός του διατρήματος. Η πίεση από την διόγκωση πιέζει το χαλύβδινο σωλήνα εντός των ανωμαλιών του διατρήματος και έτσι επιτυγχάνεται η αγκύρωση του ήλου. Ωστόσο, η διόγκωση του ήλου προκαλεί μείωση του μήκους του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εφελκύεται η πλάκα στήριξης προς την επιφάνεια του πετρώματος. Το φορτίο από την πλάκα έδρασης προς το πέτρωμα είναι περίπου 2tn. Ο ήλος έχει πλήρη υποστηρικτική δράση αμέσως μετά την τοποθέτηση του και η διάμετρος του διατρήματος δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Η σωστή τοποθέτηση του ήλου δεν βασίζεται στην κρίση του χειριστή καθώς η πίεση της αντλίας καθορίζεται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο από τον χειριστή και είναι το μόνο εισαχθέν στοιχείο στο σύστημα. Η αντλία σταματά αυτομάτως στην προκαθορισμένη πίεση, υποδηλώνοντας ότι ο ήλος έχει τοποθετηθεί σωστά.

Οι ήλοι τύπου Swellex χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος συνθηκών από πολύ μαλακά πετρώματα που μοιάζουν με εδάφη έως πολύ σκληρά και ρωγματοωμένα πετρώματα. Παρ' όλα αυτά ήλοι αυτού του τύπου δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μακροχρόνιες εγκαταστάσεις εκτός αν είναι προστατευμένοι από την διάβρωση. Ο χρόνος

τοποθέτησης, για έναν ήλο τύπου Swellex μήκους 2.4m (8ft), είναι συνήθως 25sec (εξαιρώντας τον χρόνο διάτρησης του διατρήματος). Τέλος, και οι δύο τύποι ηλώσεων αγκύρωσης τριβής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υδροφόρα πετρώματα.



Σχήμα 41 Τοποθέτηση ενός ήλου τύπου Split Set (Stillborg, 1994).



Σχήμα 42 Τοποθέτηση ήλου τύπου Swellex (Stillborg, 1994).

## 2.4 Αστοχίες συστημάτων υποστήριξης.

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού ενός συστήματος υποστήριξης είναι να συμβάλει στην συγκράτηση της βραχομάζας. Ο ήλος ενισχύει και κινητοποιεί την εσωτερική αντοχή της βραχομάζας περιορίζοντας τις κινήσεις τεμαχών του βράχου. Κινήσεις τεμαχών βράχου περιορίζονται όταν οι ήλοι διαπερνούν τις ασυνέχειες τους.

Τα χαρακτηριστικά του φορτίου-παραμορφώσεως, σε εφέλκυσμό ή διάτμηση, ενός πετρώματος ή ήλου εξαρτώνται από τον τύπο του ήλου. Για τον ίδιο τύπο ήλου τα χαρακτηριστικά του φορτίου-παραμορφώσεως μπορούν ωστόσο να ποικίλουν σημαντικά αναλόγως με το ποιοί παράγοντες σχετίζονται με την τοποθέτηση του ήλου.

Αστοχίες συστημάτων υποστήριξης μπορούν να οφείλονται στις ιδιότητες του υλικού του ίδιου του μέσου υποστήριξης π.χ. ήλου, πλαισίου κλπ. Ο αριθμός όμως, αυτών των περιπτώσεων είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με αυτόν των αστοχιών που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την ποιότητα της εργασίας και σ' αυτή καθ' αυτή την διαδικασία τοποθέτησης των ήλων. Συχνές αιτίες αστοχίας των συστημάτων ήλωσης είναι:

- Λανθασμένη επιλογή συστήματος ηλώσεων για μία δεδομένη εφαρμογή.
- Ακατάλληλη επιλογή θέσεως διατρήματος.
- Μικρό ή μεγάλο μήκος του διατρήματος.
- Λανθασμένη διάμετρος διατρήματος.
- Ανεπαρκής απόπλυση διατρήματος.
- Ανεπαρκής τοποθέτηση ενέματος.
- Ανεπαρκές μήκος συνάφειας.
- Χάλυβας με ακαθαρσίες.
- Ακατάλληλο μείγμα ενέματος.
- Βλάβη στον σωλήνα αναρρόφησης αέρα από τον πυθμένα του διατρήματος.
- Ανεπαρκές σφράγισμα του διατρήματος.
- Ανεπαρκής λίπανση περικοχλίου, ροδέλλας και σπειρώματος.
- Λανθασμένη διαδικασία τοποθέτησης.
- Ανεπαρκές πρόγραμμα ελέγχου.
- Απουσία συστήματος ελέγχου.

## 2.5 Δοκιμές και μετρήσεις ελέγχου συστήματος ήλωσης.

Ο αριθμός των αιτιών που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την συμπεριφορά ενός συστήματος ηλώσεως είναι αμέτρητος. Επομένως, οι εργασίες πρέπει να γίνονται από εξειδικευμένο προσωπικό. Παρ' όλα αυτά ο έλεγχος των ήλων είναι σημαντικός για το

τελικό αποτέλεσμα της υποστήριξης. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για να ελεγχθεί η ποιότητα ενός τοποθετημένου ήλου.

### Τύπος ήλου

### Δοκιμή ελέγχου

Ήλος διαστελλόμενου κελύφους.

Εξόλκευσης, στρεπτικής ροπής, κελί φορτίου.

Ράβδος με ένεμα.

Εξόλκευσης, πυρηνοληψίας και ηλεκτρονική μη καταστροφική.

Μεταλλικό καλώδιο με ένεμα.

Εξόλκευσης και πυρηνοληψίας.

Ήλοι αγκύρωσης τριβής.

Εξόλκευσης, πυρηνοληψίας και έμμεση μη καταστροφική.

### **2.5.1 Δοκιμή εξόλκευσης**

Η εν λόγω δοκιμή αποτελεί την πλέον συνήθη μέθοδο ελέγχου και μελέτης του συνόλου των εφαρμοζόμενων συστημάτων ήλωσης στα υπόγεια έργα. Εφαρμόζεται τόσο στα υπόγεια μεταλλευτικά, όσο και στα τεχνικά έργα, ενώ τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής αξιοποιούνται και λαμβάνονται ως βάση αφενός μεν για την αξιολόγηση και αποδοχή εγκατεστημένων ήλων, και αφετέρου για τη διερεύνηση της καταλληλότητας εφαρμογής νέων συστημάτων ήλωσης σε συγκεκριμένες συνθήκες υπόγειου έργου.

Η σκοπιμότητα εκτέλεσης της εν λόγω δοκιμής ποικίλει κατά περίπτωση. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται έμμεσα από τις διάφορες ονομασίες ή/και χαρακτηρισμούς με τους οποίους αναφέρεται η ίδια δοκιμή στα συναφή συγγράμματα και στις ανακοινώσεις ερευνητικών εργασιών. Συγκεκριμένα, εκτός από τους όρους δοκιμή εξόλκευσης και απόσπασης, ορισμένες από τις ονομασίες και τους χαρακτηρισμούς με τους οποίους συναντάται η εν λόγω δοκιμή είναι: δοκιμή εκρίζωσης, απόσπασης, εφελκυσμού, αστοχίας ή θραύσης του συστήματος ήλωσης κ.α. Ο κάθε ένας εκ των ανωτέρω όρων υποδηλώνει διαφορετική επιδίωξη και σκοπιμότητα της εκτέλεσης της εν λόγω δοκιμής ελέγχου των συστημάτων ήλωσης. Η ίδια δοκιμή εφαρμόζεται σε ποικίλες περιπτώσεις, οι οποίες έχουν ως στόχο:

- Τον έλεγχο της ποιότητας της εγκατάστασης του συστήματος, επιβάλλοντας περιορισμένους μεγέθους φορτία χωρίς να προκαλείται βλάβη ή καταστροφή στον ήλο.
- Τον έλεγχο και την αξιολόγηση των επιμέρους στοιχείων ενός συστήματος ήλωσης.
- Τον έλεγχο και την αξιολόγηση συνολικά του συστήματος ήλωσης.
- Τον έλεγχο της επιτυγχάνομενης αγκύρωσης σε διάφορες συνθήκες πετρώματος.

- Την καθολική εκρίζωση του συστήματος ήλωσης και τη μελέτη της συμπεριφοράς του κατά την ολίσθηση του εντός του διατρήματος.
- Την ανάπτυξη εφελκυστικών φορτίων στα συστήματα ήλωσης προς έλεγχο της επιβαλλόμενης αρχικής προέντασης.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η εν λόγω δοκιμή χρησιμοποιείται ποικιλοτρόπως και εξυπηρετεί αρκετές ανάγκες των μελετητών της υποστήριξης υπόγειων έργων με ήλωση. Η σπουδαιότητα της δοκιμής εξόλκευσης είναι μεγάλη και κοινά αποδεκτή. Όμως, από την εκτενή εφαρμογή της μέχρι σήμερα έχει προκύψει ότι αντιμετωπίζονται συγκεκριμένα προβλήματα, τα οποία αφορούν την αναπαράσταση κατά τη διενέργεια της δοκιμής της πραγματικής εντατικής κατάστασης του ήλου, την αναπαράσταση της συνήθους διαδικασίας εγκατάστασης, την εκτέλεση των δοκιμών υπό αντιπροσωπευτικές συνθήκες πετρώματος, κ.α.

Η διαδικασία τοποθέτησης των ήλων οι οποίοι θα υποβληθούν σε δοκιμή εξόλκευσης, θα πρέπει να είναι ακριβώς ίδια με την εφαρμοζόμενη στο συγκεκριμένο εργοτάξιο. Επίσης, είναι απαραίτητο η τοποθέτηση να διενεργείται καταβάλλοντας την ίδια προσπάθεια και δείχνοντας την ανάλογη προσοχή με αυτή κατά την τοποθέτηση σε παραγωγική διαδικασία, δεδομένου ότι υπό το φόρτο της αυξημένης παραγωγικότητας που απαιτείται από όλες τις σύγχρονες εταιρείες, συχνά παραβλέπονται από τους εργαζόμενους ορισμένες βασικές λεπτομέρειες. Ένα μέτρο ελέγχου αποτελεί ο συνολικός χρόνος που καταναλώνεται από τους εργαζόμενους για την εγκατάσταση των ήλων εκείνων, για τους οποίους είναι γνωστό ότι θα υποβληθούν σε δοκιμή, σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο που χρειάζονται οι ίδιοι εργαζόμενοι για την τοποθέτηση του ίδιου συστήματος σε μια καθημερινή εργασία. Είναι προφανές ότι εάν καταβληθεί ιδιαίτερη προσοχή για την εγκατάσταση των υπό δοκιμή κοχλιών, τότε είναι ενδεχόμενη η επίτευξη καλύτερων συνθηκών εγκατάστασης, με καλύτερα αποτελέσματα στη συμπεριφορά και στη φέρουσα ικανότητα του συστήματος ήλωσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπως είναι φυσικό, κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα υπερεκτιμηθούν οι δυνατότητες του συγκεκριμένου συστήματος ήλωσης.

Οι εν λόγω δοκιμές είναι καταστροφικές, δεδομένου ότι μετά το πέρας της δοκιμής ο ήλος έχει υποστεί κατά κανόνα μόνιμη παραμόρφωση ή/και μετατόπιση. Κατά συνέπεια η πλάκα συγκράτησης δεν είναι πλέον σε επαφή με το πέτρωμα με αποτέλεσμα να μην υφίσταται επιφάνεια άσκησης αντίδρασης στην εκδήλωση των συγκλίσεων, επομένως δεν προσφέρεται πλέον υποστήριξη στο πέτρωμα. Επιπροσθέτως, η καταστροφή των ήλων κατά την εκτέλεση της δοκιμής είναι δυνατή και με τη θραύση της ράβδου του

ήλου ή άλλων επιμέρους στοιχείων του. Η μεμονωμένη καταστροφή ήλων βεβαίως δεν προκαλεί σημαντικό πρόβλημα, όμως, θα πρέπει να αποφεύγεται η συγκεντρωμένη εκτέλεση δοκιμών σε συστήματα ήλωσης τα οποία αποτελούν μέρος του συνόλου των ήλων που έχουν τοποθετηθεί για την υποστήριξη ενός υπόγειου έργου.

Επιπλέον, οι δοκιμές εξόλκευσης είναι απαραίτητο να διενεργούνται σε πραγματικές συνθήκες, τόσο όσον αφορά το πέτρωμα, όσο και τα υλικά κατασκευής του συστήματος ήλωσης. Για τα υλικά, η αντιστοιχία με την πραγματική κατάσταση είναι σχετικά απλή, αφού εάν χρησιμοποιηθούν κατά τις δοκιμές υλικά τα οποία αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα, τότε επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε ότι αφορά όμως το πέτρωμα αντιμετωπίζονται ορισμένες δυσκολίες. Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος καθώς και η συμπεριφορά του, παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα από θέση σε θέση και ιδιαίτερα στα υπόγεια τεχνικά έργα. Το εν λόγω στοιχείο σε συνδυασμό με το γεγονός ότι θα πρέπει να καταβάλλεται προσπάθεια ώστε να εκτελούνται δοκιμές υπό αντιπροσωπευτικές συνθήκες, επιβάλλει τη εκπόνηση προγράμματος δοκιμών οι οποίες να καλύπτουν ικανοποιητικά το σύνολο των συναντώμενων συνθηκών. Είναι αντιληπτό ότι θα πρέπει να γίνει επιλογή ορισμένων αντιπροσωπευτικών θέσεων προς εκτέλεση των δοκιμών. Στις εν λόγω θέσεις το πέτρωμα θα παρουσιάζει ορισμένες φυσικομηχανικές και άλλες ιδιότητες οι οποίες βεβαίως δεν θα ταυτίζονται με τις αντίστοιχες σε γειτονικές θέσεις. Προκειμένου λοιπόν να προσδιορισθούν αντιπροσωπευτικές θέσεις εκτέλεσης των δοκιμών θα πρέπει να καθορισθεί το εύρος των τιμών των χαρακτηριστικών μεγεθών του πετρώματος για το οποίο να οριοθετείται μια κατηγορία πετρώματος. Από τα μέχρι σήμερα γνωστά στοιχεία, δεν έχουν καθορισθεί το εύρος των μεταβολών στα χαρακτηριστικά μεγέθη του πετρώματος για το οποίο θα επιτρέπεται με ικανοποιητική ακρίβεια να θεωρείται ενιαία η συμπεριφορά του ως προς τη λειτουργία και τη δράση ενός συστήματος ήλωσης. Είναι συνεπώς απαραίτητο να προσδιορισθεί για ποιό μέγεθος μεταβολών θα πρέπει να εκτελείται νέα σειρά δοκιμών, ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά δεδομένων συστημάτων ήλωσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Στις προδιαγραφές της Διεθνούς Ενώσεως Μηχανικής των Πετρωμάτων αναφέρεται ότι η δοκιμή εξόλκευσης εκτελείται προκειμένου να εξετασθεί ο τρόπος δράσης του ήλου και να ελεγχθεί η αγκύρωση που έχει επιτευχθεί. Για τον λόγο αυτό συνιστάται το υπό μελέτη σύστημα κοχλίωσης να αποτελείται από ανθεκτικά επιμέρους τμήματα (ράβδο ενισχυμένη στο σπείρωμα, περικόχλιο, πλάκα συγκράτησης κτλ.).

Από την εφαρμογή της δοκιμής σε αρκετές περιπτώσεις, καθώς επίσης και από τη μελέτη των επισυμβαινόμενων αστοχιών, έχει προκύψει ότι ένα σημαντικό ποσοστό των

αστοχίων παρατηρείται στην περιοχή του περικοχλίου. Κατά συνέπεια θα πρέπει να υποβάλλονται σε δοκιμή και τα επιμέρους τμήματα του συστήματος ήλωσης, ώστε να διαμορφωθεί αντικειμενική εκτίμηση επί της λειτουργίας του συστήματος ήλωσης και των μορφών αστοχίας του, σε αντίθεση με ότι προτείνεται από την ISRM. Είναι σκόπιμο δηλαδή να μην επιλεγεί, προς εξέταση, σύστημα ήλωσης με ειδικά χαρακτηριστικά, το οποίο να εμφανίζεται ανθεκτικότερο στα σημεία στα οποία σημειώνεται συνήθως αστοχία στους χρησιμοποιούμενους ήλους, εκτός βεβαίως και αν υπάρχει πρόθεση εκ μέρους της εταιρείας να εφαρμόσει το τροποποιημένο σύστημα σε καθολική κλίμακα.

Οι προτεινόμενες από τους κατασκευαστές των συστημάτων κοχλίωσης διαδικασίες εγκατάστασης τους, απέχουν συνήθως από την πραγματικά εφαρμοζόμενη διαδικασία στην παραγωγή. Το εν λόγω γεγονός παρατηρείται κυρίως εξαιτίας των ιδιαίτερα αντίξοων συνθηκών οι οποίες υφίστανται στα υπόγεια έργα και ιδιαίτερα στα μεταλλευτικά, καθώς επίσης και στην περιορισμένη επίβλεψη και καθοδήγηση, σε αντίθεση με όταν εκτελείται η δοκιμή από τον κατασκευαστή - προμηθευτή του συστήματος ήλωσης. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να αναμένεται ότι το σύστημα ήλωσης δεν θα παρουσιάζει ακριβώς τα προβλεπόμενα από τον κατασκευαστή του χαρακτηριστικά (π.χ. τιμή φέρουσας ικανότητας), αλλά θα διαπιστωθούν διαφοροποιήσεις. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εκτελούνται δοκιμές ελέγχου των συστημάτων ήλωσης υπό τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν επιτόπου του έργου και υπό τη συνήθη πρακτική εγκατάστασης.

Επίσης, για την εκτέλεση δοκιμών εξόλκευσης απαιτείται η εγκατάσταση ήλων αποκλειστικά για το εν λόγω σκοπό. Δεν είναι δηλαδή γενικά εφικτό να εκτελεστούν δοκιμές σε συστήματα ήλωσης τα οποία να έχουν εγκατασταθεί χωρίς να είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι θα διενεργηθούν επ' αυτών δοκιμές εξόλκευσης. Το εν λόγω γεγονός εκτός των συστηματικών σφαλμάτων λόγω μεροληψίας που συνεπάγεται, δεν επιτρέπει την εξέταση συστημάτων ήλωσης τα οποία έχουν τοποθετηθεί πριν από αρκετό χρονικό διάστημα. Το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται σε μεμονωμένες περιπτώσεις και για ειδικούς τύπους ήλων, οι κατασκευαστές των οποίων προμηθεύουν και τον ειδικό εξοπλισμό για την εκτέλεση των δοκιμών εξόλκευσης. Οι εν λόγω διατάξεις έχουν περιορισμένη εφαρμογή, αφού αφορούν συγκεκριμένους μόνο τύπους συστημάτων ήλωσης. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων για τη διενέργεια δοκιμών σε ήδη εγκατεστημένους ήλους, απαιτείται η σχεδίαση και η κατασκευή ειδικών διατάξεων, ικανών να επιτύχουν την προσαρμογή του σχετικού εξοπλισμού προς άσκηση εφελκυστικού φορτίου στους ήλους.

Η εκτέλεση δοκιμών σε ήλους οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί πριν από κάποιο χρονικό διάστημα και σε ήλους οι οποίοι δεν έχουν τοποθετηθεί ειδικά για το σκοπό αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας. Η σπουδαιότητα των συγκεκριμένων δοκιμών συνίσταται στα εξής: Αφενός μεν, είναι σημαντική η γνώση της συμπεριφοράς του συστήματος ήλωσης που έχει εφαρμοσθεί στο υπόγειο έργο μετά από την πάροδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, ώστε να μελετηθεί η επίδραση επ' αυτού διαφόρων παραγόντων (π.χ. παράγοντες διάβρωσης, δονήσεις, χαλάρωση της οροφής κ.α.). Αφετέρου δε, με την εκτέλεση δοκιμών σε ήλους οι οποίοι τοποθετήθηκαν κατά την παραγωγική διαδικασία απαλείφονται σφάλματα μεροληψίας, τα οποία είναι ενδεχόμενο να υπεισέρχονται όταν εκτελούνται δοκιμές σε συστήματα ήλωσης τα οποία έχουν τοποθετηθεί αποκλειστικά προς εκτέλεση δοκιμών. Τα εν λόγω σφάλματα αφορούν τόσο στη διαδικασία τοποθέτησης, όσο και στο ότι προκειμένου να εκτελεστεί μια συνήθης δοκιμή εξόλκευσης απαιτείται να διατηρηθεί επαρκές μήκος ράβδου του ήλου εκτός του διατρήματος, ώστε να επιτευχθεί η προσαρμογή των διατάξεων εξόλκευσης. Αυτό συνεπάγεται ότι η αγκύρωση εντός του διατρήματος δεν θα πραγματοποιηθεί στη ζώνη του πετρώματος στην οποία αγκυρώνονται οι ήλοι κατά την παραγωγική διαδικασία, στοιχείο το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής σε σχέση με την πραγματική κατάσταση.

Από τη Διεθνή Ένωση Μηχανικής των Πετρωμάτων προτείνεται η χρησιμοποίηση κατάλληλης διάταξης με την οποία να επιτυγχάνεται η αξονική φόρτιση του συστήματος ήλωσης. Αυτό επιδιώκεται κατά την εκτέλεση των δοκιμών και μπορεί να θεωρηθεί ότι επιτυγχάνεται ως ένα βαθμό από τις διαθέσιμες σήμερα διατάξεις φόρτισης των συστημάτων ήλωσης. Όμως, δεδομένων των αντίξοων συνθηκών που επικρατούν στα υπόγεια έργα και οι οποίες αφορούν τόσο τις συνθήκες διενέργειας των εργασιών όσο και τις συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής, είναι αμφίβολο εάν το ποσοστό επιτυχίας στην εν λόγω επιδίωξη είναι το επιθυμητό. Ο προβληματισμός αυτός ενισχύεται από το γεγονός ότι σε ορισμένες δοκιμές παρατηρούνται ευδιάκριτα σημάδια μη αξονικής φόρτισης του ήλου, όπως για παράδειγμα κάμψη της ράβδου στην περιοχή της φόρτισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις βεβαίως είναι εύκολο να απορριφθούν τα αποτελέσματα της δοκιμής ή να υποβληθούν σε ειδική επεξεργασία, όμως σε εκείνες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν γίνεται αντιληπτό ότι το επιβαλλόμενο φορτίο δεν ήταν απολύτως αξονικό όπως προβλέπεται, πραγματοποιούνται εσφαλμένες εκτιμήσεις και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων γίνεται με εσφαλμένη θεώρηση.

Σε συνδυασμό με τα ανωτέρω κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί επίσης ο προβληματισμός που έχει δημιουργηθεί αναφορικά με τον τρόπο φόρτισης των συστημάτων ήλωσης υπό



πραγματικές συνθήκες. Διατυπώνονται αμφιβολίες σχετικά με το κατά πόσο η αξονική φόρτιση, η οποία επιβάλλεται κατά την εκτέλεση της δοκιμής εξόλκευσης, αντιπροσωπεύει τη συνήθη κατάσταση φόρτισης του μεγαλύτερου ποσοστού των εγκατεστημένων ήλων σε ένα υπόγειο έργο. Ο εν λόγω προβληματισμός πηγάζει κατ' αρχήν από το γεγονός ότι δεν μπορεί να είναι προκαθορισμένος ο τρόπος και ο μηχανισμός χαλάρωσης της μάζας του πετρώματος στην περιοχή τοποθέτησης του συστήματος ήλωσης, και κατ' επέκταση το δημιουργούμενο τασικό πεδίο. Επίσης, δεν ακολουθείται απολύτως σταθερή διάταξη τοποθέτησης των ήλων στο χώρο και σημειώνεται διαφοροποίηση των προσανατολισμών των αξόνων των εγκατεστημένων ήλων. Επιπροσθέτως, στο χώρο ενός υπόγειου έργου, η κατανομή των τάσεων περιφερειακά των ανοιγμάτων μεταβάλλεται από θέση σε θέση τόσο ως προς το μέτρο, αλλά κυρίως ως προς τη διεύθυνση. Το εν λόγω στοιχείο συμβάλλει σημαντικά στον τρόπο φόρτισης των εγκατεστημένων κοχλιών. Επιπροσθέτως, από τη μελέτη του τρόπου αστοχίας και της συμπεριφοράς των ήλων μετά την αστοχία, συνάγεται ότι η δυσμενέστερη και πλέον κρίσιμη επιβαλλόμενη φόρτιση από το πέτρωμα δεν επισυμβαίνει αξονικά κατά μήκος της ράβδου τους, αλλά έκκεντρα ή/και εγκάρσια. Άρα ένα ποσοστό των εγκατεστημένων ήλων δεν υποβάλλεται σε αξονική φόρτιση κατά τη λειτουργία του. Αντιθέτως, από την πρότυπη δοκιμή εξόλκευσης προβλέπεται η επιβολή αξονικού φορτίου για τον έλεγχο ενός συστήματος ήλωσης. Συνεπώς, τα εξαγόμενα από τη δοκιμή συμπεράσματα, υπό τις θεωρούμενες συνθήκες φόρτισης, τίθενται υπό αμφισβήτηση όσον αφορά στη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους αυτούσια και χωρίς ειδική επεξεργασία.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής συνήθως διενεργείται μέτρηση των επισυμβαίνομένων συνολικά παραμορφώσεων για κάθε τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου. Όμως η μετρηθείσα συνολική μήκυνση οφείλεται στο άθροισμα επιμέρους παραμορφώσεων ή/και μετατοπίσεων, προερχόμενων από την παραμόρφωση της ράβδου του συστήματος ήλωσης, της πλάκας συγκράτησης, του περικοχλίου, του ημισφαιρίου προσαρμογής, την ολίσθηση του κελύφους αγκύρωσης εντός του διατρήματος εφόσον πρόκειται για ανάλογου τύπου συστήματος ήλωσης, της σχετικής ολίσθησης της ράβδου στη διεπιφάνεια με το υλικό συγκόλλησης και του συστήματος ήλωσης στη διεπιφάνεια πετρώματος-υλικού συγκόλλησης όταν πρόκειται για συστήματα ήλωσης που αγκυρώνονται με συγκολλητική ύλη. Ακόμη, εξαιτίας της συγκέντρωσης υψηλών φορτίων στην περιοχή της πλάκας συγκρατήσεως, προκαλούνται μικροθρυμματισμοί και ρωγματώσεις του πετρώματος, οι οποίες συμμετέχουν σε ορισμένο ποσοστό στη συνολικά μετρούμενη μήκυνση. Ο ανωτέρω επιμερισμός της συνολικής μήκυνσεως είναι

ιδιαίτερα χρήσιμος διότι καθιστά γνωστή τη συμπεριφορά των επιμέρους συστατικών ενός συστήματος ήλωσης, επιτρέποντας την επιλογή των καταλληλότερων προς εφαρμογή. Όμως, η μέτρηση των επιμέρους παραμορφώσεων ή/και μετατοπίσεων απαιτεί τη χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων προσαρμοσμένων κατάλληλα επί των στοιχείων του υπό εξέταση συστήματος ήλωσης. Οι εν λόγω διατάξεις πέραν της αύξησης του κόστους εκτέλεσης της δοκιμής, την καθιστούν πιο ευαίσθητη και επιρρεπή σε αστοχία, δεδομένου ότι αυτές είναι κατά κανόνα ηλεκτρονικές με υψηλή ευαισθησία για τις συνθήκες που επικρατούν στα υπόγεια έργα. Επιπλέον, την καθιστούν περισσότερο χρονοβόρα, ενώ δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν τα υπόψη μεγέθη σε ήδη εγκατεστημένους ήλους, θα πρέπει δηλαδή να έχουν προετοιμαστεί ειδικά οι ήλοι στους οποίους θα γίνουν οι συγκεκριμένες μετρήσεις.

Για την περίπτωση που η δοκιμή εξόλκευσης εφαρμόζεται σε ήλους αγκυρωμένους σε όλο τους το μήκος με συγκολλητική ύλη, θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή η αξιολόγηση των μετρήσεων και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι ήλοι τέτοιου τύπου επηρεάζονται από την επιβαλλόμενη αξονική φόρτιση η οποία ασκείται από τον εξοπλισμό της δοκιμής σε μικρή μόνο απόσταση από τη θέση φόρτισης. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο κατά τη δοκιμή αποσβένεται σε μικρό μήκος του αγκυρωμένου ήλου, με αποτέλεσμα να μην υποβάλλεται σε φόρτιση το μεγαλύτερο μήκος του υπό εξέταση ήλου. Επομένως, κατά τον έλεγχο των ήλων ρητίνης είναι αμφίβολο κατά πόσο επιτυγχάνεται η φόρτιση του κοχλίου σε όλο του το μήκος, ενώ τα αποτελέσματα της δοκιμής θα πρέπει να ερμηνευθούν λαμβάνοντας υπόψη και τα ανωτέρω.

Ακόμη, η δυνατότητα αξιολόγησης των ήλων ρητίνης αγκυρωμένων σε όλο τους το μήκος, με την εν λόγω δοκιμή έλεγχου, είναι περιορισμένη και εξαιτίας του ότι δεν αναπαριστώνται οι πραγματικές συνθήκες φόρτισης των εν λόγω συστημάτων ήλωσης. Συγκεκριμένα, δεν είναι δυνατή η αναπαράσταση των συνθηκών φόρτισης στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η φόρτιση των ήλων οφείλεται στη χαλάρωση - αποκόλληση ενός στρώματος ή μιας ζώνης πετρώματος σε μια τυχαία θέση κατά μήκος του πακτωμένου στελέχους, γεγονός το οποίο συνεπάγεται την τοπική φόρτιση του ήλου και την ανακατανομή των τάσεων στη συγκεκριμένη θέση. Σε αυτή την περίπτωση, η πραγματική φόρτιση που επιβάλλεται δεν μπορεί να αναπαρασταθεί από τη δοκιμή εξόλκευσης, αφού το αξονικό φορτίο που ασκείται αποσβένεται σε μικρή απόσταση από την κεφαλή του ήλου.

Προκειμένου να εξεταστεί η καταλληλότητα της δοκιμής εξόλκευσης για τον έλεγχο των συστημάτων ήλωσης αγκυρωμένων σε όλο τους το μήκος δια συγκολλητικών υλών θα

πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά το εν λόγω μέγεθος. Επίσης, πρέπει να εξετάζεται ιδιαίτερα η περίπτωση των ήλων στους οποίους επιτυγχάνεται τμηματική αγκύρωσή τους με συγκολλητικές ύλες.

Με βάση τα παραπάνω, θα ήταν αναμενόμενο ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης σε ήλους με διαφορετικό μήκος αγκύρωσης δεν θα ήταν διαφοροποιημένα ανάλογα με το μήκος, δεδομένου ότι το επιβαλλόμενο κατά τη δοκιμή φορτίο θα επιδρούσε στο ίδιο κάθε φορά μήκος του πακτωμένου στελέχους. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί πειραματικά διαφοροποίηση τους για ήλους με διαφορετικό μήκος αγκύρωσης, γεγονός το οποίο δεν συμφωνεί με όσα σημειώνονται προηγουμένως. Αυτή η παρατήρηση σχετίζεται και με το γεγονός ότι στις περιπτώσεις όπου δεν υφίσταται πλήρης πάκτωση, δηλαδή υπάρχει ελεύθερο μήκος ήλου, τότε κατά τη φόρτιση είναι δυνατόν να συμβεί θραύση της ράβδου σε αυτό το τμήμα της. Εξαιτίας των ανωτέρω, δημιουργείται προβληματισμός ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της δοκιμής εξόλκευσης σε κοχλίες αγκυρωμένους σε όλο τους το μήκος με συγκολλητικές ύλες.

Όπως είναι φανερό, διαπιστώνεται κάποια αντίφαση σε σχέση με την απόσβεση του ασκούμενου αξονικού φορτίου από τη διάταξη εξόλκευσης. Για την αποκατάσταση και τη διασαφήνιση της κατάστασης είναι σκόπιμη η εκτέλεση κατάλληλα προσανατολισμένων ερευνητικών εργασιών, ώστε να προσδιοριστεί το φαινόμενο που κυριαρχεί σε κάθε περίπτωση και ο τρόπος δράσης του. Επίσης, κρίνεται ιδιαίτερος σκόπιμος ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων των δοκιμών εξόλκευσης σε ήλους αγκυρωμένους σε όλο τους το μήκος και σε ήλους μερικώς αγκυρωμένους.

Από τη διεξαχθείσα μέχρι σήμερα σχετική έρευνα, δεν έχει γίνει συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών εξόλκευσης με μετρήσεις κατά τη φυσική φόρτιση του ίδιου συστήματος ήλωσης. Πιο συγκεκριμένα, δεν αναφέρεται στη βιβλιογραφία εκτέλεση πειραμάτων σε πραγματικές συνθήκες με τα οποία να προσδιορίζεται ο πραγματικός τρόπος φόρτισης και το μέγεθος της σε ένα σύστημα ήλωσης, με τη βοήθεια συγκεκριμένων τεχνικών, και να συσχετίζεται αυτός με τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης.

Η διατύπωση των προβληματισμών και παρατηρήσεων αυτών δεν έχει πραγματοποιηθεί έως σήμερα συγκεντρωμένα και υπό το πρίσμα της αξιολόγησης της συγκεκριμένης δοκιμής ελέγχου. Από το σύνολο των ανωτέρω παρατηρήσεων και προβληματισμών επί της δοκιμής εξόλκευσης, η οποία εφαρμόζεται εκτενώς για τον έλεγχο της αποτελεσματικής ή μη δράσης των συστημάτων ήλωσης, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η δοκιμή αυτή παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες. Οι αδυναμίες αυτές ενδέχεται να

αλλοιώνουν σε μικρό βαθμό τις πραγματικές συνθήκες εκτέλεσης της δοκιμής και κατ' επέκταση να θίγουν ανάλογα την αξιοπιστία των μετρήσεων, όταν επιδρούν μεμονωμένα. Όμως, η επίδραση είναι πιο καθοριστική όταν συνδυάζονται, οπότε θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή εκ μέρους του μελετητή στην αξιολόγηση των μετρήσεων και στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι αδυναμίες της δοκιμής εξόλκευσης σχετίζονται κυρίως με την αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών τοποθέτησης και φόρτισης των δοκιμαζόμενων συστημάτων ήλωσης. Έχει αναλυθεί επαρκώς ότι είναι αμφίβολο το εάν επιτυγχάνονται κατά τη δοκιμή οι συνήθως υφιστάμενες επιτόπου συνθήκες φόρτισης των ήλων, ενώ παράλληλα διαπιστώνονται ορισμένες ατέλειες, οι οποίες δικαιολογούν την αμφισβήτηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Κατά συνέπεια, εκτιμάται ότι υφίσταται ανάγκη διεξαγωγής ερευνητικών εργασιών επί των αντίστοιχων θεμάτων, ώστε να διασαφηνιστούν τα επίμαχα σημεία και να αξιολογηθεί η συγκεκριμένη δοκιμή.

### **2.5.2 Δοκιμή στρεπτικής ροπής**

Κατά την εν λόγω δοκιμή, μετρείται έμμεσα το φορτίο που αναλαμβάνει ο ήλος, αρκετά εύκολα και γρήγορα, με την χρησιμοποίηση ειδικού ροπομέτρου που φέρει μετρητή στρεπτικής ροπής. Η περιστροφή εφαρμόζεται μέχρι το σημείο εκείνο στο οποίο το περικόχλιο αρχίζει να στρέφεται και η αντίστοιχη ένδειξη του μετρητή συσχετίζεται, είτε με το φορτίο του ήλου, είτε με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. την απόσταση από το μέτωπο, προς εξαγωγή συμπερασμάτων, για το υπό μελέτη ή υπό δοκιμή σύστημα ήλωσης.

### **2.5.3 Μέτρηση φορτίου**

Το φορτίο που ασκείται πάνω στον ήλο, μπορεί να μετρηθεί από ειδικό κελί που τοποθετείται κατάλληλα μεταξύ της πλάκας συγκράτησης και της εξωτερικής επιφάνειας του πετρώματος. Υπό συνθήκες ορθής τοποθέτησης, το κελί αυτό θα καταγράψει με μεγάλη ακρίβεια τα φορτία που αναλαμβάνει ο ήλος σε σχέση με την πάροδο του χρόνου.

Τα κελιά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι 1) υδραυλικά, 2) μηχανικά, 3) μετρητές επιμηκύνσεων (strain gauge) και 4) φωτοελαστικά.

### **2.5.4 Δοκιμή πυρηνοληψίας**

Η δοκιμή αυτή, χρησιμοποιείται σχετικά σπάνια σε συστήματα κατανεμημένης αγκύρωσης και διεξάγεται με κατάλληλο αδαμαντογεωτρύπανο απόληψης πυρήνα. Με

την δοκιμή εκτιμάται η συνέχεια και η ακεραιότητα του ενέματος και ελέγχεται η επίδραση της διάβρωσης.

### **2.5.5 Έμμεσος έλεγχος άνευ καταστροφής**

Η δοκιμή αυτή αφορά στο σύστημα ήλωσης Swellex της Σουηδικής Εταιρείας Atlas Copco AB, προκειμένου να ελέγχεται η ορθή του τοποθέτηση και να εξετάζεται το ενδεχόμενο αστοχίας του.

Η δοκιμή διεξάγεται με την βοήθεια της ίδιας αντλίας ύδατος που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση του συστήματος. Ένας ορθά τοποθετημένος και αποτελεσματικός στην λειτουργία του ήλος Swellex εξασφαλίζεται με την αυτόματη διακοπή παροχής ύδατος υπό πίεση, από την ειδική αντλία, στην προκαθορισμένη τιμή. Κατά τον ίδιο τρόπο, ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας του κοχλίου, μπορεί να γίνεται και για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την τοποθέτηση του, καθώς η δοκιμή δεν καταστρέφει ούτε επηρεάζει την δράση του ήλου.

### **2.5.6 Ηλεκτρονικός έλεγχος άνευ καταστροφής**

Οι ήλοι μπορούν να ελεγχθούν με τη βοήθεια ηλεκτρονικής διάταξης που βασίζεται στα ανακλώμενα κύματα τάσεων και μάλιστα χωρίς αυτός ο έλεγχος να επιφέρει την καταστροφή ή την αλλοίωση της δράσης τους.

Ένας ειδικά σχεδιασμένος αισθητήρας ο οποίος περιέχει πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους, πιέζεται πάνω στο ελεύθερο άκρο του ήλου που βρίσκεται στο στόμιο του διατρήματος. Χρησιμοποιώντας τους κρυστάλλους ως μονάδα διέγερσης οπότε θλιπτικά και ελαστικά κύματα μεταδίδονται μέσα στο σώμα του ήλου.

Κατά την διάδοση των κυμάτων, ποσοστό της ενέργειας μεταδίδεται μέσω του υλικού συγκόλλησης στο πέτρωμα, με αποτέλεσμα τη μείωση της ευρύτητας των κυμάτων. Τα ελαστικά κύματα ανακλώνται στο άκρο του ήλου που βρίσκεται στον πυθμένα του διατρήματος και φτάνουν στο άλλο άκρο του, όπου και καταγράφονται από τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους.

Εάν το υλικό συγκόλλησης είναι καλής ποιότητας και καλύπτει πλήρως τον ήλο, η ευρύτητα και το μέγεθος των ανακλώμενων κυμάτων μετριάζονται σημαντικά. Αντίθετα, τα χαρακτηριστικά αυτά δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου, εάν το υλικό συγκόλλησης παρουσιάζει κενά και είναι γενικά χαμηλής ποιότητας.

Με αναλυτική διαδικασία, τα αποτελέσματα των μετρήσεων συσχετίζονται με την πιθανή κατάσταση του ήλου στο εσωτερικό του διατρήματος. Επιπροσθέτως, γνωρίζοντας το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην εκπομπή του κύματος και της λήψης του ανακλώμενου επιτρέπει τον

υπολογισμό της απόστασης πηγής εκπομπής και αιτίου ανάκλασης. Η δοκιμή αυτή γίνεται με χρήση του οργάνου Boltometer.

Το Boltometer δημιουργήθηκε μόνο για τον έλεγχο ενεματομένων ήλων. Για να υπάρχει ιδανική απόδοση πρέπει να χρησιμοποιείται όταν:

- Η διάμετρος του διατρήματος είναι 25 – 40 mm.
- Η διάμετρος του ήλου είναι 20 – 30 mm.
- Το μήκος του ήλου είναι μεγαλύτερο από 0.8 m.
- Το μήκος της ενεμάτωσης είναι μικρότερο από 4.0 m
- Το εξωτερικό άκρο του ήλου είναι επίπεδο για να επιτευχθεί η επαφή με τον αισθητήρα.

Ακολουθεί πίνακας με το σύστημα ταξινόμησης.

Κατηγορία	Σήμα Boltometer	Εκτιμώμενη κατάσταση ήλου
A	Καμία ανάκλαση	Ιδανική
B	Μικρό διατμητικό ανακλώμενο κύμα	Απομοιωμένη
C	Μεγάλο διατμητικό ανακλώμενο κύμα	Ανεπαρκής
D	Ηχώ θλιπτικού κύματος και πολύ μεγάλο ανακλώμενο κύμα.	Πολύ ασθενής ή ανύπαρκτη

Πίνακας 9 Σύστημα ταξινόμησης.

Παρά το γεγονός ότι, η ηλεκτρονική αυτή διάταξη χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση, δίνει μια αρκετά αξιόπιστη και άμεση ένδειξη της ποιότητας συγκόλλησης, παρουσιάζοντας παράλληλα το σημαντικό πλεονέκτημα της μη καταστροφής του ήλου.

### 2.5.7 Δοκιμή καθορισμού επιβαλλόμενης στρεπτικής ροπής.

Στα συστήματα ήλωσης που απαιτούν προένταση κατά την τοποθέτησή τους, είναι αναγκαίος ο καθορισμός της ελάχιστης τιμής της απαιτούμενης προέντασης ή της στρεπτικής ροπής που πρέπει να ασκηθεί, για την επίτευξη της κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερης ανάπτυξης της κεφαλής ακύρωσης στο πέτρωμα. Οι περισσότεροι κατασκευαστές συστημάτων ήλωσης προτείνουν

ενδεικτικές τιμές προέντασης ή στρεπτικής ροπής για συγκεκριμένους τύπους ήλων και κατηγορίες πετρωμάτων πλην όμως η αξία μιας δοκιμής επί τόπου είναι γενικώς παραδεκτή.

Η ελάχιστη προένταση ή στρεπτική ροπή που πρέπει να επιβληθεί σε έναν ήλο σημειακής αγκύρωσης είναι εκείνη κατά την οποία, περαιτέρω αύξηση της τιμής της δεν προκαλεί νέα κίνηση και διείσδυση της σφήνας μέσα στο αναπτυσσόμενο κέλυφος.

Μια γρήγορη, απλή και άμεση μέθοδος καθορισμού της βέλτιστης προέντασης ή στρεπτικής ροπής, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Εισαγωγή του ήλου εντός του διατρήματος και επιβολή ροπής που αντιστοιχεί σε φορτίο περίπου 1 τόννου, έτσι ώστε η αγκυροκεφαλή να ενσφηνωθεί ελαφρά εντός του διατρήματος.
- 2) Εφαρμογή στρεπτικής ροπής αντίθετης φοράς, ώστε μόνο η ράβδος να εξέλθει του διατρήματος.
- 3) Χάραξη, με κιμωλία, ευθείας γραμμής μήκους 50 cm επί του σώματος της ράβδου, αρχίζοντας από το άκρο αυτής που βρίσκεται προς το στόμιο του διατρήματος.
- 4) Επανεισαγωγή της ράβδου εντός του διατρήματος, μέχρις ότου εκείνη έρθει σε επαφή με το κάτω άκρο του κελύφους και σημείωση επί της χαραγής του σημείου αυτού.
- 5) Προχώρηση της ράβδου, μέχρις ότου εκείνη έρθει σε επαφή με το κάτω άκρο της σφήνας και σημείωση επί της χαραγής του σημείου αυτού.
- 6) Η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων που καθορίστηκαν επί της χαραγής, αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ πυθμένα σφήνας και πυθμένα κελύφους.
- 7) Επανάληψη των βημάτων (1) έως και (6), με βαθμιαία αύξηση του φορτίου ή της στρεπτικής ροπής και καταγραφή της σχετικής θέσης σφήνας - κελύφους.
- 8) Η τιμή του φορτίου ή της στρεπτικής ροπής κατά την οποία δεν σημειώνεται περαιτέρω μεταβολή της απόστασης μεταξύ σφήνας και κελύφους, είναι η πλέον κατάλληλη αρχική προένταση που πρέπει να ασκηθεί στο συγκεκριμένο τύπο ήλων κατά την τοποθέτησή τους στο συγκεκριμένο πέτρωμα που πρόκειται να υποστηρίξουν.

## **2.6 Κανονισμοί διεξαγωγής δοκιμών.**

Για την πλειοψηφία των δοκιμών ελέγχου των συστημάτων ήλωσης έχουν διατυπωθεί από την Διεθνή Ένωση Μηχανικής Πετρωμάτων (ISRM) λεπτομερείς οδηγίες εκτέλεσης των δοκιμών. Στην συνέχεια, αναπτύσσονται οι οδηγίες αυτές όσον αφορά την δοκιμή εξόλκευσης, την

παρακολούθηση της εξέλιξης του επιβαλλόμενου φορτίου στα συστήματα ήλωσης (Load cells) και την δοκιμή στρεπτικής ροπής.

### **2.6.1 Προτεινόμενη Μέθοδος για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός ήλου (Rockbolt) – Δοκιμή Εξόλκευσης**

#### **Σκοπός**

Η δοκιμή αυτή έχει σαν αντικείμενο την μέτρηση της αντοχής ενός ήλου εγκατεστημένου σε συνθήκες πεδίου. Η αντοχή υπολογίζεται από την δοκιμή εξόλκευσης κατά την οποία μετράται η μετατόπιση της κεφαλής σαν αποτέλεσμα του εφαρμοζόμενου φορτίου για να δημιουργηθεί η καμπύλη φόρτισης – μετατόπισης. Η δοκιμή εφαρμόζεται συνήθως για την επιλογή των ήλων και επίσης για τον έλεγχο στην ποιότητα των υλικών και των μεθόδων εγκατάστασης. Επίσης, απαιτούνται τουλάχιστον πέντε δοκιμές για να αξιολογηθεί ένας ήλος σε ένα δεδομένο πέτρωμα με τις αντίστοιχες συνθήκες εγκατάστασης. Επιπλέον, οι δοκιμές αυτές είναι καταστρεπτικές και δεν πρέπει να γίνονται γενικά σε ήλους που αποτελούν μέρος ενός πραγματικού συστήματος βράχου-υποστήριξης.

#### **Εξοπλισμός**

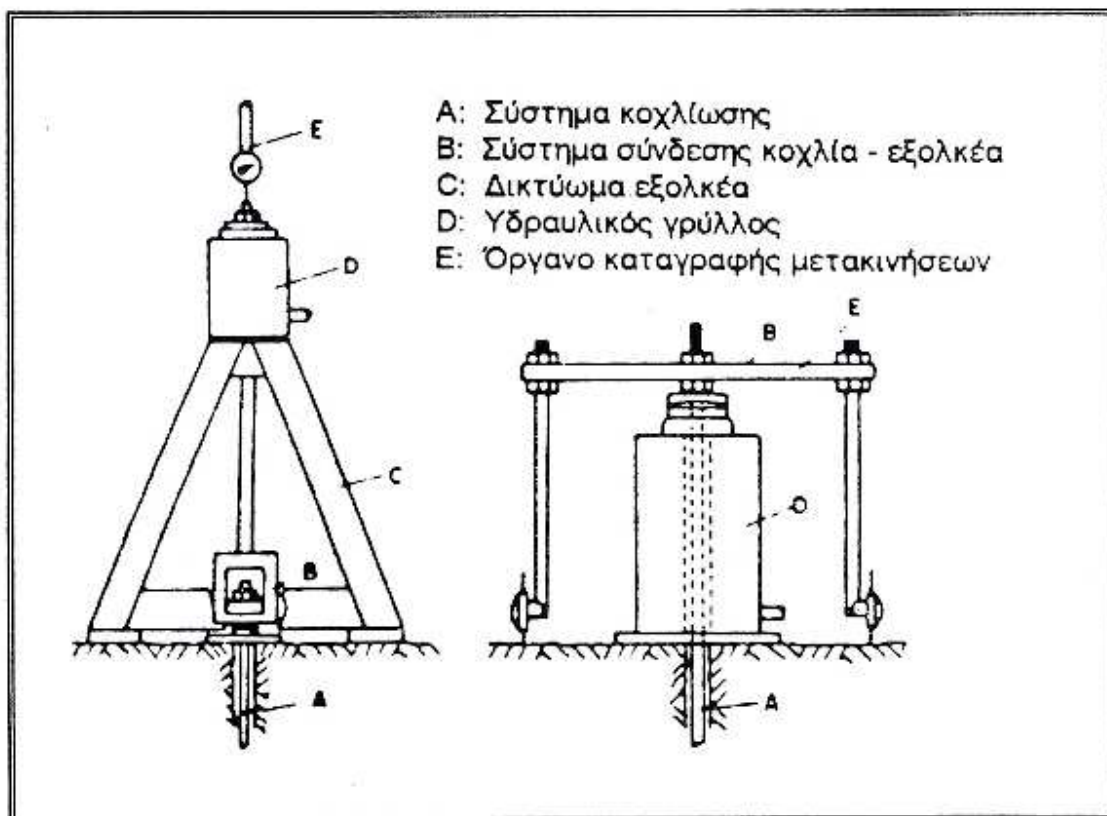
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των ήλων περιλαμβάνει:

- Κατά την δοκιμή, για την διάνοιξη των δοκιμαστικών οπών πρέπει να χρησιμοποιείται ο ίδιος διατρητικός εξοπλισμός και διατρητική κεφαλή που θα χρησιμοποιηθούν για την τοποθέτηση των αγκυρίων κατά την κατασκευή του έργου.
- Εξοπλισμός για την επιθεώρηση και τον έλεγχο και την μέτρηση της διαμέτρου του διατρήματος.
- Τυποποιημένα εξαρτήματα που παρέχονται από τους κατασκευαστές των ήλων συμπεριλαμβανομένων του ρευστοκονιάματος και των υλικών για την έγχυση ρευστοκονιάματος εάν απαιτείται, και εξοπλισμός για την τοποθέτηση του ήλου σύμφωνα με τον τρόπο που συστήνεται από τους κατασκευαστές.

Εξοπλισμός για την εφαρμογή φορτίου στους ήλους, παραδείγματος χάριν όπως στο Σχήμα 43, που περιλαμβάνει:



- Έναν υδραυλικό γρύλλο με χειροκίνητη αντλία και σωλήνα πίεσης που είναι ικανός να εφαρμόσει φορτίο μεγαλύτερο από την αντοχή του ήλου που μελετάται, με απόσταση μεταφοράς τουλάχιστον 50 mm.
- Εξοπλισμός για την μεταφορά του φορτίου από την αντλία στον ήλο. Ένα σφαιρικό έδρανο, ροδέλλες και/ή σφήνες κάτω από τον γρύλλο απαιτούνται για να εξασφαλισθεί πως το φορτίο θα ασκείται στον άξονα του ήλου.



Σχήμα 43 Σχηματική παρουσίαση του εξοπλισμού και της εκτέλεσης της δοκιμής εξόλκευσης.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του φορτίου και της μήκυνσης περιλαμβάνει:

- Μία συσκευή μέτρησης φορτίου, π.χ. ένα κελί φορτίου ή έναν μετρητή πίεσης, συνδεδεμένο με την αντλία και καλιμπραρισμένο σε μονάδες φορτίου. Οι μετρήσεις πρέπει να είναι με ακρίβεια της τάξης του 2% του μέγιστου φορτίου που εφαρμόζεται κατά την δοκιμή. Η συσκευή πρέπει να περιλαμβάνει και δείκτη μέγιστου φορτίου.



### **Διαδικασία**

Η διαδικασία απαιτεί αρχικά την προετοιμασία του χώρου που θα γίνουν οι δοκιμές, έτσι ώστε να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις συνθήκες του πετρώματος στο οποίο θα τοποθετηθούν οι ήλοι.

Τα διατρήματα επίσης διανοίγονται σε τοποθεσίες που ευνοούν την δοκιμή. Η επιφάνεια του πετρώματος που περιβάλλει κάθε διάτρημα θα πρέπει να είναι επίπεδη και το διάτρημα να είναι κάθετο στην επιφάνεια του πετρώματος ( $\pm 5^\circ$ ). Επιπλέον πληροφορίες όπως οι διαστάσεις του διατρήματος και του ήλου και ο τύπος και οι συνθήκες του πετρώματος στην θέση της δοκιμής καταγράφονται σε φύλλα αποτελεσμάτων (Σχήμα 43). Τέλος κατά την τοποθέτηση των ήλων καταγράφονται στοιχεία όπως η ημερομηνία και η ώρα της τοποθέτησης.

### **Δοκιμή**

Καθώς συναρμολογείται ο εξοπλισμός της φόρτισης πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η διεύθυνση της εξόγκωσης να είναι στον άξονα του ήλου. Αρχικά ένα φορτίο όχι μεγαλύτερο των 5 kN εφαρμόζεται για να αναλάβει την πιθανή αστάθεια του εξοπλισμού. Η αγκύρωση εξετάζεται αυξάνοντας το φορτίο μέχρι η συνολική μετατόπιση να ξεπεράσει τα 40mm ή μέχρι να διαρρεύσει ο ήλος ή να σπάσει σε περίπτωση που αυτό γίνει πρώτα. Οι αναγνώσεις των φορτίων και της μήκυνσης μετρώνται καθώς το φορτίο προσαυξάνεται κατά 5 kN ή μετατόπιση κατά 5mm αναλόγως με το ποιά συμβαίνει πρώτα. Ο ρυθμός εφαρμογής φορτίου πρέπει να έχει εύρος 5-10 kN/min. Οι αναγνώσεις λαμβάνονται αφού το φορτίο και η μήκυνση έχουν σταθεροποιηθεί.

### **Υπολογισμοί**

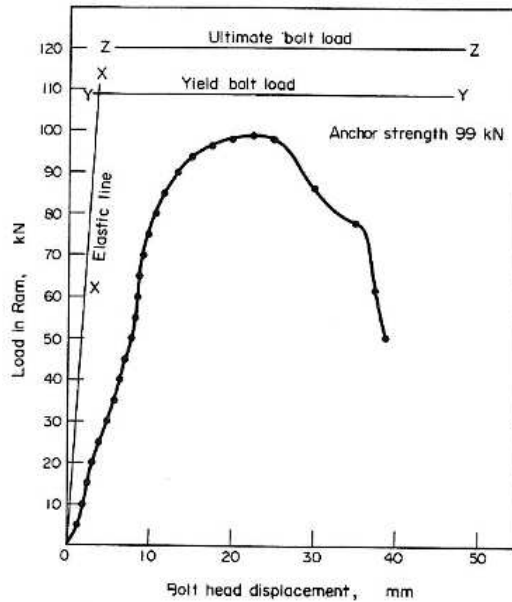
Οι τιμές της συνολικής μηκύνσεως υπολογίζονται καθώς προχωρά η δοκιμή αφαιρώντας την αρχική ανάγνωση από την ανάγνωση κάθε προσαύξεσης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής δίνονται γραφικά (Σχήμα 45). Η αντοχή του ήλου ορίζεται ως το μέγιστο φορτίο που επιτεύχθηκε κατά την δοκιμή χωρίς να υπάρχει διαρροή ή αστοχία του ήλου. Εάν ο ήλος διαρρεύσει ή αστοχήσει το φορτίο «X» κατά την εφαρμογή του οποίου συνέβη καταγράφεται και η αντοχή του ήλου χαρακτηρίζεται ως «άγνωστη αλλά μεγαλύτερη του φορτίου «X».

Η ελαστική παραμόρφωση του ήλου σε ένα δεδομένο εφαρμοζόμενο φορτίο υπολογίζεται ως:

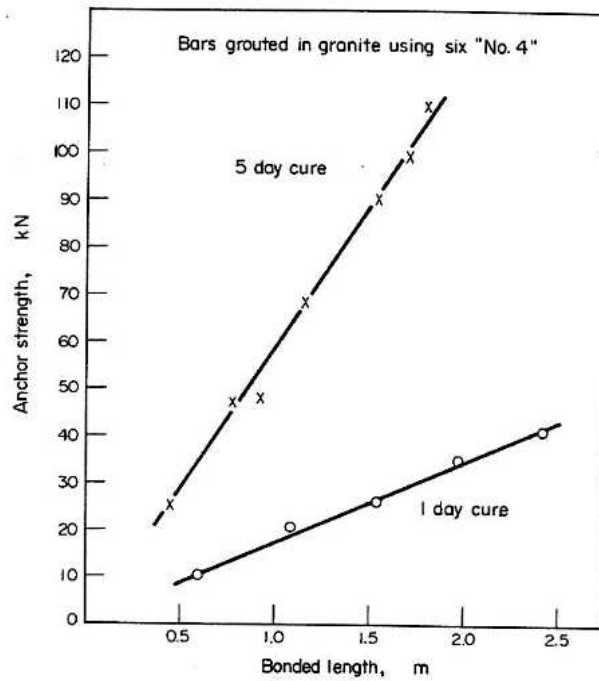
$$\frac{P*L}{A*E}$$

Όπου P το φορτίο που εφαρμόζεται, L το μήκος του ήλου που δεν έχει ενεματωθεί + το 1/3 του μήκους του ήλου που έχει ενεματωθεί, A η διατομή του ήλου και E το μέτρο ελαστικότητας του ήλου.

Για την αξιολόγηση ενεματωμένων ήλων τα αποτελέσματα πολλών δοκιμών πρέπει να συγκεντρωθούν και δοθούν γραφικά για να φανεί η επίδραση του χρόνου ωρίμανσης και του μήκους ενεμάτωσης (Σχήμα 46).



Σχήμα 45 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης κεφαλής ήλου.



Σχήμα 46 Διάγραμμα επίδρασης χρόνου ωρίμανσης και μήκους ενεμάτωσης στην αντοχή του ήλου.

### **Αναφορά αποτελεσμάτων**

Η αναφορά πρέπει να περιλαμβάνει τα φύλλα καταγραφής αποτελεσμάτων και τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήματα 45 και 46) καθώς επίσης και:

- ✓ Το πέτρωμα στο οποίο εξετάστηκαν οι ήλοι.
- ✓ Τα διατρήματα συμπεριλαμβανομένων του μήκους, της διαμέτρου, της μεθόδου διάνοιξης και τον προσανατολισμό.
- ✓ Την διαδικασία και τον χρόνο τοποθέτησης.
- ✓ Την διαδικασία και τον χρόνο της δοκιμής.
- ✓ Την φύση της αστοχίας καθώς και άλλες παρατηρήσεις που έχουν σχέση με τα αποτελέσματα της δοκιμής.

### **Σχόλια**

Είναι απαραίτητο οι ήλοι να εξετάζονται κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες. Επίσης με την δοκιμή αυτή ελέγχεται η ικανότητα αγκύρωσης και αυτό είναι εφικτό μόνο εάν ο ήλος, το περικόχλιο και οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν μεγαλύτερη αντοχή από την δύναμη αγκύρωσης. Οι προδιαγραφές του κατασκευαστή για τις διαστάσεις του διατρήματος και για τον τρόπο τοποθέτησης πρέπει να εξετάζονται για το αν συμβαδίζουν με τους περιορισμούς λειτουργίας του εργοταξίου. Τέλος, η μηκύνσεις πρέπει να μετρώνται από εξοπλισμό καλά εδρασμένο και δείκτες τοποθετημένους σε επίπεδη επιφάνεια πετρώματος.

## **2.6.2 Προτεινόμενη μέθοδος για την παρακολούθηση της εξέλιξης του επιβαλλόμενου φορτίου στα συστήματα ήλωσης (Load cells).**

### **Σκοπός**

Η δοκιμή αυτή έχει σαν αντικείμενο την μέτρηση του φορτίου που αναλαμβάνει ο ήλος σε σχέση με την πάροδο του χρόνου.

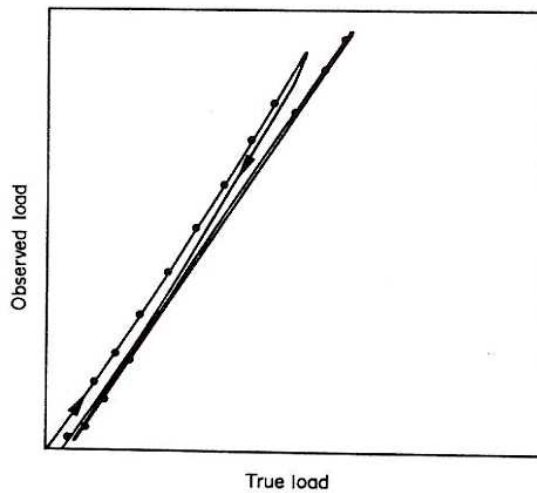
### **Εξοπλισμός**

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των ήλων περιλαμβάνει:

Τα κελιά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μηχανικά, φωτοελαστικά, υδραυλικά, ηλεκτρικά, μετρητές επιμηκύνσεων (strain gauge), ανάλογα με τις απαιτήσεις σε κόστος και ακρίβεια. Πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν στην επίδραση του νερού, των κοντινές εκρήξεων, και της σκόνης για μεγάλο χρονικό διάστημα.

### Διαδικασία

Η διαδικασία ξεκινά με το καλιμπράρισμα του κελιού. Το καλιμπράρισμα απαιτείται όταν επιλεγθεί ο κατάλληλος τύπος κελιού και κάθε κελί που θα εγκατασταθεί πρέπει να καλιμπράρεται πριν την χρήση. Βραχυπρόθεσμο καλιμπράρισμα του κάθε κελιού γίνεται αυξάνοντας το φορτίο σε στάδια, λαμβάνοντας αναγνώσεις της «παρατηρηθείσας» και της «πραγματικής» τιμής του φορτίου. Η τάση παύει να ασκείται και σταδιακά καταγράφονται αναγνώσεις κατά την αποφόρτιση. Ένας επιπλέον κύκλος φόρτισης και αποφόρτισης επαναλαμβάνεται και κατασκευάζεται ένα διάγραμμα σαν το ακόλουθο.



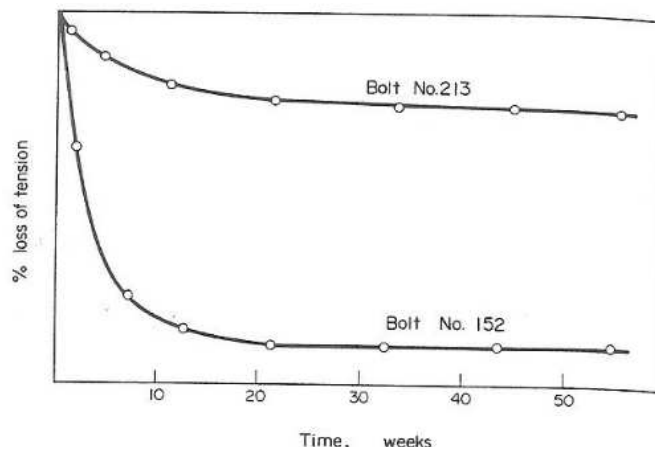
Σχήμα 47 Διάγραμμα Παρατηρηθέντος φορτίου – Πραγματικού φορτίου.

Τα κελιά φορτίου τοποθετούνται σε επιλεγμένους ήλους την στιγμή της εγκατάστασης τους. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα σφαιρικά έδρανα να είναι σωστά τοποθετημένα και να έχουν λιπανθεί. Οι ήλοι που μελετώνται πρέπει να αριθμούνται καθαρά και μόνιμα και να βαφτούν για τον εύκολο εντοπισμό τους στο μέλλον.

Τα φορτία πρέπει να καταγράφονται αμέσως μετά την τοποθέτηση και ξανά κατά την διάρκεια μερικών ωρών. Περαιτέρω μετρήσεις πρέπει να καταγράφονται κατά διαστήματα ανάλογα με τον ρυθμό που μεταβάλλονται οι μετρήσεις. Κάθε ανάγνωση πρέπει να συνοδεύεται από τον αριθμό του ήλου, τον τύπο του, το μήκος του, την διάμετρο του, την θέση του και την ημερομηνία και ώρα της παρατήρησης.

### Υπολογισμοί

Οι αναγνώσεις διορθώνονται με την χρήση κατάλληλων διαγραμμάτων. Επίσης κατασκευάζονται διαγράμματα του φορτίου προς τον χρόνο για κάθε ήλο.



Σχήμα 48 Διάγραμμα Απώλειας φορτίου – Χρόνου.

### Αναφορά αποτελεσμάτων

Η αναφορά πρέπει να περιλαμβάνει:

- ✓ Λεπτομέρειες για τα κελία που χρησιμοποιούνται, για τον τρόπο με τον οποίο έγινε το καλμπράρισμα και τα αποτελέσματα.
- ✓ Θέσεις των ήλων που παρατηρούνται.
- ✓ Λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, για τον τύπο των ήλων και τις διαστάσεις τους ημερομηνίες και τρόπο εγκατάστασης και ενεμάτωσης.
- ✓ Αποτελέσματα παρακολούθησης και διαγράμματα φορτίου – χρόνου.

### Σχόλια

1. Το φορτίο μπορεί να είναι μικρότερο από αυτό που εφαρμόστηκε κατά την τοποθέτηση του ήλου λόγω χαλάρωσης και ολίσθησης, είτε του ήλου είτε της πλάκας, σαν αποτέλεσμα ερπυσμού, διάβρωσης ήλου, διάβρωση του πετρώματος πίσω από την πλάκα λόγω επαφής με αυτήν (fretting) ή δονήσεων από εκρήξεις. Το φορτίο μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται σαν αποτέλεσμα διόγκωσης του πετρώματος ή αλληλεπίδρασης με κοντινές διεργασίες εκσκαφής.
2. Λεπτομέρειες των μηχανημάτων και της ακρίβειας τους πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στις αναφορές.

### 2.6.3 Προτεινόμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό φορτίου σε σύστημα ήλωσης με χρήση ροπόκλειδου.

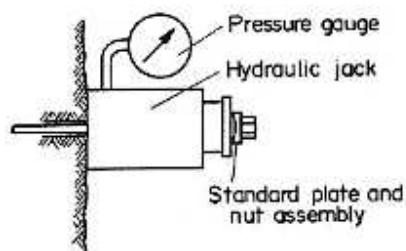
#### Σκοπός

Η εν λόγω δοκιμή χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί το επιβαλλόμενο από το πέτρωμα φορτίο στα εγκατεστημένα συστήματα ήλωσης. Προσδιορίζεται δηλαδή το φορτίο το οποίο ασκείται στον κοχλία εξαιτίας της χαλάρωσης της μάζας του πετρώματος, καθώς επίσης και η απώλεια της αρχικώς επιβληθείσας προέντασης εξαιτίας της δράσης ορισμένων παραγόντων (δονήσεις εκ της εξορυκτικής διαδικασίας, κ.α.). Επιπροσθέτως, με την εφαρμογή της εν λόγω δοκιμής σε μεγάλη έκταση είναι δυνατόν να προσδιορισθεί ο βαθμός επιτυχίας του εφαρμοζόμενου συστήματος ήλωσης, καθώς επίσης και οι συνθήκες φόρτισης ανάλογα με τη θέση και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της μάζας του πετρώματος. Ακόμη, η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται προκειμένου να προσδιορισθεί η κατάλληλη τιμή του φορτίου προέντασης κατά τη φάση εγκατάστασης του συστήματος ήλωσης.

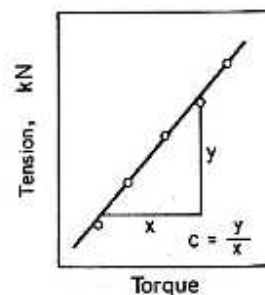
Η συγκεκριμένη δοκιμή ελέγχου των συστημάτων ήλωσης χρησιμοποιείται συχνά για τον έλεγχο των εργασιών εγκατάστασης των ήλων σε ένα υπόγειο έργο, ενώ σε συνδυασμό με τη δοκιμή εξόλκευσης θεωρείται ότι παρέχει ικανοποιητική εικόνα της λειτουργίας και της συμπεριφοράς των συστημάτων ήλωσης.

#### Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι: ένα ροπόκλειδο, εξοπλισμός για την ρύθμιση του ροπόκλειδου και εξοπλισμός για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ φορτίου και ροπής.



Σχήμα 49 α) Διάταξη,



β) Διάγραμμα Φορτίου - Ροπής.

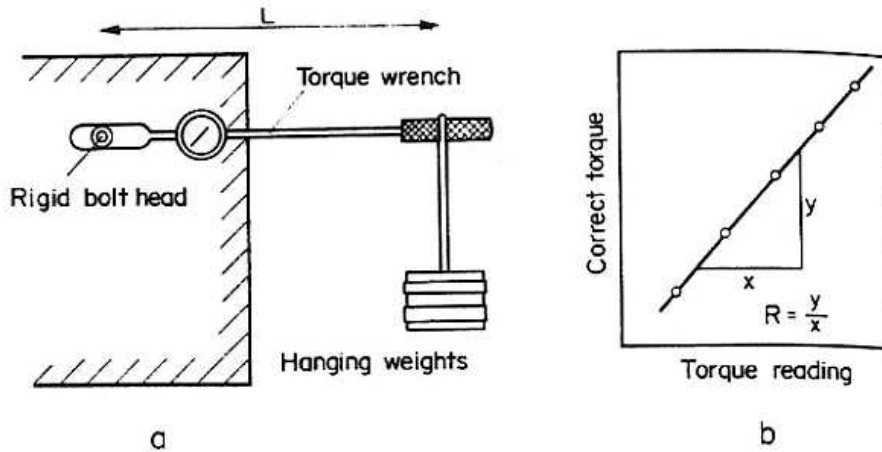
#### Διαδικασία

Ρύθμιση του ροπόκλειδου.

1. Με το κλειδί οριζόντια, η υποδοχή του κλειδιού τοποθετείται σε σταθερή κεφαλή ήλου. Από το κέντρο της λαβής του κλειδιού εκτείνεται μία βάση στην οποία προστίθενται βάρη. Στην συνέχεια σημειώνεται η ανάγνωση του κλειδιού όπως επίσης το βάρος της βάσης



καθώς και το βάρος που φέρει. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αυξάνοντας το βάρος έως ότου να σημειωθούν τουλάχιστον πέντε μετρήσεις καλύπτοντας το εύρος των ροπών για τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κλειδί. Το μήκος  $L$  από το κέντρο της λαβής του κλειδιού έως την κεφαλή του ήλου καταγράφεται επίσης.



Σχήμα 50 Διάγραμμα Διορθωμένης Ροπής – Ανάγνωση Ροπής.

2. Διορθωμένα αποτελέσματα υπολογίζονται με πολλαπλασιασμό του μήκους  $L$  με τα εφαρμοζόμενα βάρη. Στην συνέχεια σχεδιάζεται το διάγραμμα με τις διορθωμένες τιμές ροπής προς τις καταγεγραμμένες αναγνώσεις ροπής. Η κλίση της ευθείας που ενώνει τα σημεία αυτά υπολογίζεται και είναι ίση με τον λόγο  $R$  (Σχήμα 50.β) που είναι ο λόγος των διορθωμένων τιμών προς τις καταγεγραμμένες κατά την δοκιμή. Τα ροπόκλειδα επίσης πρέπει να επαναρυθμίζονται ανά διαστήματα των 6 μηνών.

3. Προσδιορίζεται ο λόγος  $C$  του φορτίου προς την ροπή.

Το κελί φορτίου τοποθετείται στον ήλο. Η διάμετρος του ήλου, η πλάκα και οι ροδέλλες καθώς τρόπος λίπανσης τους πρέπει να είναι ίδιος με αυτόν που αναμένεται στην πραγματική τοποθέτηση του ήλου.

4. Η ροπή εφαρμόζεται με σταδιακή αύξηση στο περικόχλιο και καταγράφονται οι τιμές της ροπής και του φορτίου του ήλου. Η δύναμη πρέπει να μεταφέρεται μόνο μέσω του κέντρου της λαβής του κλειδιού. Μετά κατασκευάζεται το διάγραμμα του φορτίου προς την ροπή και υπολογίζεται ο λόγος  $C$ . Ο λόγος  $C$  είναι ίσος με την κλίση της ευθείας του διαγράμματος ( Σχήμα 49.β).

5. Προσδιορισμός φορτίου ήλου.

Εάν χρησιμοποιείται ροπόκλειδο με δείκτη μέγιστης ροπής, η ροπή πρέπει να ασκείται σταθερά παρά σε στάδια. Το φορτίο υπολογίζεται από τον λόγο  $R$  και από μία τιμή του λόγου

φορτίου/ροπής. Ένας προσεγγιστικός έλεγχος της ελάχιστης αντοχής γίνεται εφαρμόζοντας αυξανόμενη ροπή, καταγράφοντας την ροπή ως συνάρτηση του αριθμού περιστροφής του περικοχλίου ή μέχρι ο ήλος να δώσει ενδείξεις αστοχίας.

#### **Αναφορά αποτελεσμάτων**

Η αναφορά των αποτελεσμάτων της δοκιμής πρέπει να περιλαμβάνει διαγράμματα όπως αυτό του Σχήματος 44 καθώς επίσης και πλήρεις λεπτομέρειες για :

- ✓ την ρύθμιση του ροπόκλειδου και τον τύπο του ροπόκλειδου,
- ✓ τον προσδιορισμό του λόγου C (φορτίο/ροπή), την μέθοδο που εφαρμόστηκε και τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν,
- ✓ τους ήλους που εξετάστηκαν, τον τύπο τους, την θέση τους, την ημερομηνία τοποθέτησης τους τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος πετρώματος, τον τρόπο διάτρησης και τοποθέτησης του ήλου, την κατάσταση της πλάκας κατά την διάρκεια της δοκιμής,
- ✓ την μέθοδο που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του φορτίου, την ροπή που ασκήθηκε για να προκληθεί η περιστροφή του περικοχλίου, την αντίστοιχη τάση του ήλου και οποιεσδήποτε άλλες πληροφορίες σχετικές με την δοκιμή.

Εάν η δοκιμή χρησιμοποιείται σαν έλεγχος της ελάχιστης αντοχής του ήλου, τότε πρέπει να συμπεριλαμβάνονται και διαγράμματα ροπής – περιστροφής περικοχλίου με κλίμακα τροποποιημένη έτσι ώστε να φαίνεται το φορτίο σε σχέση με την μετατόπιση.

### 3 Κεφάλαιο – Συμπεριφορά Ήλων.

#### 3.1 Αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη του αξονικού φορτίου ήλων εντός ενέματος σε σήραγγες σε μαλακό πέτρωμα.

Οι Cai Y., Esaki T. & Jiang Y. (2004), αναφέρουν τη σημασία της δημιουργίας ενός μοντέλου που να επιτρέπει τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης κατά μήκος ενός ήλου. Είναι γεγονός ότι κατά την διάνοιξη σηράγγων συχνά συναντώνται μαλακοί βράχοι, και πως η τοποθέτηση ήλων, αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο υποστήριξης. Παρά το γεγονός ότι ήλοι τοποθετούνται ευρέως σε πολλά υπόγεια έργα ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης μεταξύ ενίσχυσης και βραχομάζας δεν έχει ακόμη διασαφηνισθεί. Συνεπώς, η σχεδίαση των ηλώσεων είναι ακόμη εμπειρική ή ημιεμπειρική και είναι δύσκολο να εκτιμηθεί ποσοτικά η εφαρμογή μίας ηλώσεως. Σύμφωνα με την θεωρία της σύγκλισης-αποτόνωσης οι ήλοι αναμένονται να προσθέσουν μία ίση εσωτερική πίεση στο εσωτερικό της σήραγγας. Η εσωτερική αυτή πίεση προέρχεται από την αξονική δύναμη του ήλου, η οποία επηρεάζεται από την συμπεριφορά της βραχομάζας (Oreste και Peila, 1996). Ο ήλος περιορίζει την παραμόρφωση της βραχομάζας, που έχει σαν αποτέλεσμα μία αξονική δύναμη στον ήλο, και ταυτόχρονα ο ήλος εφαρμόζει μία πίεση (αντίθετη) στην βραχομάζα. Επομένως, η αξονική δύναμη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της ήλωσης. Κατά τους Carranza-Torres & Fairhurst (2000), όταν ο ήλος βρίσκεται κοντά στο μέτωπο της σήραγγας, η αιτία της εφαρμογής εσωτερικής πίεσης στα τοιχώματα είναι η ύπαρξη του μετώπου. και ο ήλος φορτίζεται κατά την προχώρηση.

Όμως, η κατανομή της αξονικής δύναμης κατά μήκος του ήλου δεν είναι εύκολο να προσδιορισθεί και έχει αρκετά υψηλό κόστος. Επομένως, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός μοντέλου που να προβλέπει την αξονική δύναμη του ήλου και να ποσοτικοποιεί την απόδοση του. Για να προβλεφθεί η αξονική δύναμη του ήλου, η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και της μετατόπισης της βραχομάζας συχνά εξετάζεται και σύμφωνα με τον Holmberg (1991) ισχύει η εξής σχέση:

$$\frac{d^2 u_b}{dx^2} = \frac{2\tau_{bx}}{E_b r_b} \quad (1a)$$

όπου  $u_b$ ,  $E_b$ ,  $r_b$  είναι η μετακίνηση, το μέτρο ελαστικότητας και η ακτίνα του ήλου αντιστοίχως.  $\tau_{bx}$  είναι αξονική τάση στον ήλο.

Η κατανομή της διατμητικής τάσης στο έδαφος δίδεται από τον τύπο:

$$\frac{d\tau_{br}}{dr} = -\frac{\tau_{br}}{r} \quad (1b)$$

όπου  $\tau_{br}$  η αντεπιδρώσα διατμητική τάση στο έδαφος και  $r$  η ακτίνα του ήλου.

Ο Farmer (1975) προβλέπει με την λύση του πως η αξονική δύναμη αλλά και η διατμητική τάση μειώνονται εκθετικά από το σημείο φόρτισης έως το άκρο του ήλου πριν συμβεί η αποσύζευξη.

Έχουν υπάρξει πολλές επί τόπου παρατηρήσεις σε ήλους εγκατεστημένους σε ποικίλους σχηματισμούς. Ο Freeman (1978), παρακολούθησε την φόρτιση ήλων και την κατανομή των τάσεων κατά μήκος των ήλων, και πρότεινε την ύπαρξη του ουδέτερου σημείου (neutral point), του μήκους ανάληψης (pick-up length) και του μήκους αγκύρωσης (anchor length). Στο ουδέτερο σημείο οι μετακινήσεις της βραχομάζας και του ήλου θεωρούνται ίδιες, η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια είναι μηδενική, ενώ η αξονική δύναμη έχει την μέγιστη τιμή. Το μήκος ανάληψης (pick-up length) είναι το τμήμα του ήλου μεταξύ της επιφάνειας του πετρώματος έως το ουδέτερο σημείο. Η διατμητική τάση στο τμήμα αυτό είναι αρνητική και αναλαμβάνει το φορτίο από την βραχομάζα και παρασύρει τον ήλο προς την σήραγγα. Το μήκος αγκύρωσης (anchor length) αναφέρεται στο τμήμα του ήλου από το ουδέτερο σημείο έως το άκρο του ήλου που βρίσκεται στο βάθος του διατρήματος. Η διατμητική τάση στο τμήμα αυτό είναι θετική και αγκυρώνει τον ήλο στο πέτρωμα. Αργότερα, το 1984, οι Tao και Chen ερεύνησαν τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης ήλων πλήρους πακτώσεως γύρω από κυκλική σήραγγα και κατέληξαν πως η θέση του ουδέτερου σημείου  $\rho$  εξαρτάται από την ακτίνα της σήραγγας και το μήκος του ήλου και δίνεται από την σχέση:

$$\rho = L / (\ln [1 + (1/r_a)]), \quad L = (40 r_b \sim 60 r_b) \quad (3)$$

όπου  $L$  είναι το μήκος του ήλου,  $r_a$  η εσωτερική ακτίνα της κυκλικής σήραγγας,  $r_b$  η ακτίνα του ήλου και  $\rho$  η απόσταση του ουδέτερου σημείου από το κέντρο της κυκλικής σήραγγας. Ωστόσο, η σχέση αυτή είναι περιορισμένη και καμμιά φορά λανθασμένη, όπως όταν υπάρχει προένταση. Υπάρχουν θεωρίες που υποδεικνύουν την ύπαρξη πολλών ουδέτερων σημείων κατά μήκος ενός ήλου (Björnfot and Stephansson, 1984).

Παρατηρήσεις πεδίου και δοκιμές εξόλκευσης έχουν δείξει πως :

- 1) κατά την φόρτιση ενός ήλου η παραμόρφωση του πετρώματος ασκεί φορτίο στο τμήμα ανάληψης και
- 2) το φορτίο στο τμήμα ανάληψης επιμηκώνει το τμήμα αγκύρωσης του ήλου και το μεταφέρει προς το άνοιγμα της σήραγγας.

### Συνάφεια μεταξύ ήλου και πετρώματος.

Πιστεύεται πως η μάζα του πετρώματος στην οποία τοποθετούνται ηλώσεις, ενισχύεται και έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις για την σχεδίαση ηλώσεων σύμφωνα με την αντίληψη αυτή. Γενικώς, η ενισχυμένη ζώνη εκλαμβάνεται ως ενιαία και λαμβάνονται ως βάση μόνο ομοιογενείς μηχανικές ιδιότητες.

Όσον αφορά την συνάφεια μεταξύ ήλου και βραχομάζας είναι καταλληλότερο να προσεγγίζεται με την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Πριν από την ολίσθηση, η ενίσχυση και το περιβάλλον πέτρωμα αλληλεπιδρούν συνεχώς και όσο υπάρχει συνάφεια η μετακίνηση του πετρώματος είναι ίδια με αυτήν του ήλου στην διεπιφάνεια τους. Η συνολική τάση του ηλωμένου τμήματος του πετρώματος είναι:

$$\begin{aligned}\sigma_r^{Total} &= \sigma_r + \sigma_{mr} \\ \sigma_t^{Total} &= \sigma_t + \sigma_{mt}\end{aligned}\quad (3a)$$

και οι βασικοί νόμοι για το ενισχυμένο με ήλους τμήμα του πετρώματος είναι:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{mr} \\ \sigma_{mt} \end{bmatrix} = \frac{E_m}{(1+\mu_m)(1-2\mu_m)} \begin{bmatrix} 1-\mu_m & \mu_m \\ \mu_m & 1-\mu_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{mr} \\ \Delta\varepsilon_{mt} \end{bmatrix}\quad (3b)$$

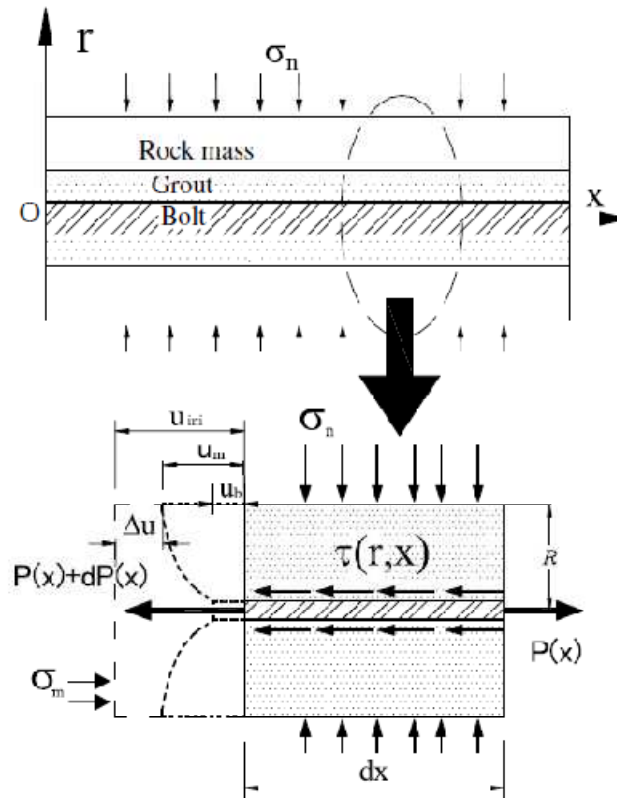
όπου  $\sigma_r^{Total}$ ,  $\sigma_t^{Total}$  είναι οι συνολικές και ακτινικές και εφαπτομενικές τάσεις,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ , είναι οι αρχικές ακτινικές και εφαπτομενικές τάσεις της βραχομάζας,  $\sigma_{mr}$ ,  $\sigma_{mt}$  είναι οι πρόσθετες αντίστοιχες τάσεις που προκλήθηκαν από τον ήλο.  $\Delta\varepsilon_{mr}$  και  $\Delta\varepsilon_{mt}$  είναι οι αντίστοιχες πρόσθετες τροπές.  $\mu_m$  είναι ο λόγος Poisson του πετρώματος.

Το πρόβλημα είναι πώς να μοντελοποιηθεί η αξονική δύναμη στον ήλο και πώς να εκτιμηθεί το ενισχυτικό αποτέλεσμα στην βραχομάζα.

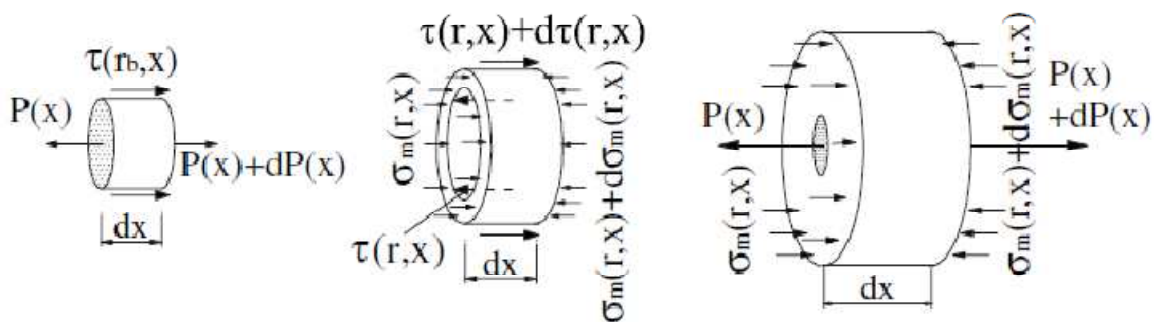
### Μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης ήλου και πετρώματος.

Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης μεταξύ της μάζας του πετρώματος και των ήλων εντός ενέματος είναι αρκετά πολύπλοκος. Προτάθηκε ένα μοντέλο σύζευξης (coupling model) για να περιγράψει την συμπεριφορά βασισμένο στο shear-lag model (SLM) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ευρέως σαν ισχυρή μέθοδος ανάλυσης. Το shear-lag model αναπτύχθηκε από ελαστικά σε πλαστικά συστήματα, για διαφορετικούς σκοπούς, στο πεδίο των συνθετικών ινών. Ο Hobbs (1967) εισήγαγε την μέθοδο SLM στην γεωλογία τροποποιώντας το μαθηματικό μοντέλο. Οι Abramento και Whittle πρότειναν ένα μοντέλο βασισμένο στο SLM για την ανάλυση της συμπεριφοράς της εξόλκευσης επίπεδης γεωσυνθετικής ενίσχυσης θεωρώντας πως η διατμητική τάση έφθινε γραμμικά.

Εν τούτοις, η παραδοχή αυτή δεν δύναται να ισχύσει εάν η διατμητική τάση φθίνει μη γραμμικά (Mandal et al., 1994). Η κατανομή της διατμητικής τάσεως στις εφαρμογές των ηλώσεων στα πετρώματα δεν είναι η ίδια όπως στις συνθετικές ίνες. Στο σχήμα 51 που ακολουθεί φαίνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ ήλου και πετρώματος και στο σχήμα 52 η εξισορρόπηση του απειροστού στοιχείου.



Σχήμα 51 Αλληλεπίδραση μεταξύ ήλου και πετρώματος.



Σχήμα 52 Εξισορρόπηση απειροστού στοιχείου.

Στο σχήμα 51,  $u_{ini}$  είναι η αρχική μετατόπιση της βραχομάζας χωρίς ήλωση. Περιορίζεται σε  $u_m$  από τον ήλο και αντίστοιχα η μετατόπιση του ήλου γίνεται  $u_b$  λόγω της επίδρασης της εξόλκευσης. Οι αντίστοιχες εξισώσεις είναι:

$$\frac{\partial \sigma_r(r,x)}{\partial x} + \frac{\partial \tau(r,x)}{\partial r} + \frac{\tau(r,x)}{r} = 0 \quad (4b)$$

$$\frac{dP(x)}{dx} + 2\pi \int_{r_b}^R r \frac{d}{dx} \sigma_m(r,x) dr = 0 \quad (4c)$$

όπου  $P(x)$  η αξονική δύναμη του ήλου στην θέση  $x$  και  $\sigma_m(r,x)$  είναι η τάση παράλληλη με τον ήλο στην θέση  $(r,x)$ .

Επειδή δεν είναι εύκολο να βρεθεί λύση μόνο με τις εξισώσεις ισορροπίας και τις συνοριακές συνθήκες η παραδοχή shear-lag γίνεται αποδεκτή ως ακολούθως:

$$\frac{dP(x)}{dx} = H(u_b - u_m) \quad (5a)$$

Μετά την διαφορίση η εξίσωση (5a) μεταβάλλεται στην εξίσωση (5b)

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} = H \left[ \frac{P(x)}{E_b A_b} - \varepsilon_m \right] \quad (5b)$$

όπου  $u_b$  είναι η μετατόπιση του ήλου,  $u_m$  και  $\varepsilon_m$  η μετατόπιση και η τροπή του ήλου σε απόσταση ίση με  $R$ ,  $H$  είναι η υλική παράμετρος που περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις φυσικές ιδιότητες του ήλου και της περιβάλλουσας βραχομάζας,  $E_b$  και  $A_b$  είναι το μέτρο ελαστικότητας και η διατομή του ήλου.

$$\tau(r,x) = \tau(r_b,x) f(r) \quad (6)$$

όπου  $\tau(r_b,x)$  είναι η διατμητική τάση του ήλου και η κατανομή της προκαλούμενης διάτμησης στην βραχομάζα περιγράφεται από την εξίσωση  $f(r)$ .

$$\tau(r,x) = G_m \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (7)$$

όπου  $G_m$  είναι το μέτρο διάτμησης της βραχομάζας,  $u_r$  είναι η μετατόπιση της βραχομάζας σε απόσταση  $r$  από τον άξονα του ήλου. Εάν η συνάρτηση  $f(r)$  τη κατανομής διάτμησης θεωρείται  $f(r) = r_b/r$  προκύπτει η κλασική θεωρία shear-lag και η παράμετρος  $H$  εκφράζεται ως:

$$H = \frac{2\pi G_m}{\ln\left(\frac{R}{r_b}\right)} \quad (8)$$

Εν τούτοις, η προϋποθεθείσα συνάρτηση της διάτμησης δεν ικανοποιεί τις εξισώσεις (4a) και (4b). Για να απλοποιηθεί η ανάλυση γίνεται η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής της αντεπίδρασης (anti-pressure) από τον ήλο. Συνεπώς, προκύπτει η εξίσωση (9).

$$f(r) = (R^2 + r_b^2 - r^2) \frac{r_b}{R^2 r} \quad (9)$$

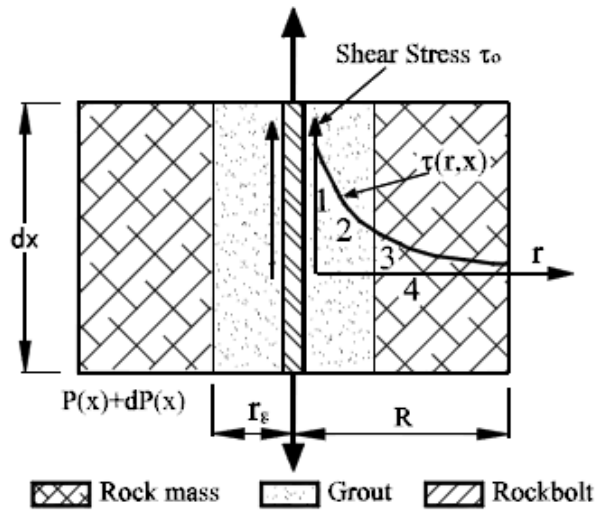
Εάν οι μηχανικές ιδιότητες του ενέματος δεν είναι ίδιες με αυτές της βραχομάζας τότε η παράμετρος  $H$  εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$H = \frac{2\pi G_g G_m}{\left[ \ln\left(\frac{R}{r_b}\right) - \frac{1}{2} \right] G_g + \ln\left(\frac{r_g}{r_b}\right) G_m} \quad (10)$$

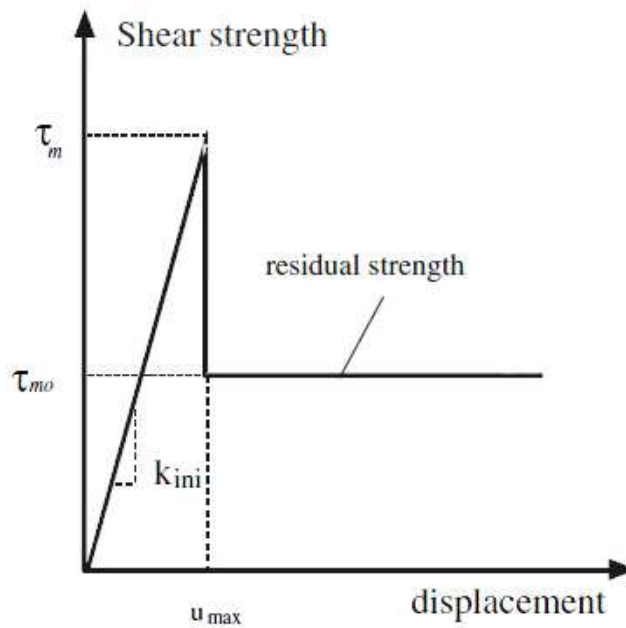
### Αποσυζευκτική συμπεριφορά του ήλου και της βραχομάζας

Ολίσθηση μπορεί να υπάρξει κατά την διεπιφάνεια του ήλου ή εντός της βραχομάζας και ονομάζεται αποσυζευκτική συμπεριφορά. Αυτό συμβαίνει όταν η διατμητική τάση υπερβεί αυτήν της βραχομάζας ή του διεπιφανειακού μέσου όπως π.χ. ένεμα, με αποτέλεσμα ο ήλος να συμπεριφέρεται διαφορετικά. Σύμφωνα με την ταξινόμηση του Windsor (1997), η ενίσχυση του πετρώματος διακρίνεται σε τρεις τύπους, (α) ολόσωμης πάκτωσης (σύζευξης) με ένεμα (CMC), (β) ολόσωμης πάκτωσης (σύζευξης) με τριβή (CFC), και (γ) σημειακής πάκτωσης (σύζευξης) είτε με τριβή είτε με ένεμα (DMFC). Η διατμητική αντοχή στην διεπιφάνεια προκύπτει από τρεις παράγοντες την πρόσφυση, την αλληλοσύνδεση και την τριβή κατά την αξονική διεύθυνση. Μετά την αποσύζευξη (decoupling), η διατμητική τάση στην διεπιφάνεια είναι η παραμένουσα αντοχή στο ολισθαίνον τμήμα. Επιπλέον, η περιβάλλουσα πίεση επηρεάζει την αντοχή στην διεπιφάνεια σε μεγάλο βαθμό. Η αστοχία μπορεί να ξεκινήσει από την διεπιφάνεια ήλου-ενέματος ή στην διεπιφάνεια ενέματος-πετρώματος, αναλόγως με το ποιο είναι το πιο ασθενές. Εάν το ένεμα είναι πιο ισχυρό από το πέτρωμα η αποσύζευξη ξεκινά στο πέτρωμα κοντά στο ένεμα (Θέση 4, Σχήμα 53), και η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και της μετατόπισης φαίνεται στο σχήμα 54.





Σχήμα 53 Αποσύζευξη ήλου.



Σχήμα 54 Διάγραμμα διατμητικής τάσης – μετατόπισης.

Η διατμητική αντοχή μπορεί να υπολογισθεί με την εξίσωση:

$$\tau_m = c_i + \sigma_{nb} \tan \varphi_i \quad (11)$$

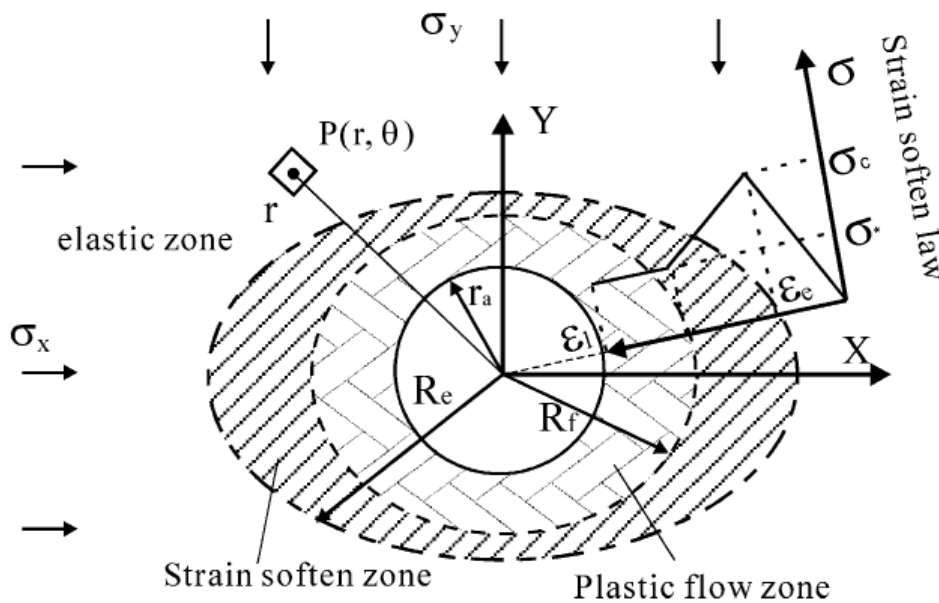
όπου  $\tau_m$ ,  $\varphi_i$  και  $c_i$  είναι η διατμητική αντοχή, η γωνία τριβής και η συνοχή του

απόσυζευγμένου μέσου τα οποία προκύπτουν από την δοκιμή εξόλκευσης ή από δοκιμή διάτμησης.  $\sigma_{nb}$  είναι η κάθετη τάση στον ήλο. Η αρχική ακαμψία εκφράζεται από την εξίσωση (12).

$$k_{ini} = \frac{H}{2\pi r_b} \quad (12)$$

#### Πρόβλεψη της αξονικής δύναμης ήλων εντός ενέματος στην μέθοδο NATM.

Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο η αξονική δύναμη του ήλου εξαρτάται από την παραμόρφωση της βραχομάζας. Με βάση πειραματικά δεδομένα, αλλά και στην πράξη, έχει επιβεβαιωθεί ότι οι μαλακοί βράχοι παρουσιάζουν σημαντική χαλάρωση κάτω από χαμηλές περιβάλλουσες πιέσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 55, γύρω από μία σήραγγα μπορούν να δημιουργηθούν τρεις ζώνες, ζώνη πλαστικής ροής, πλαστική χαλαρή ζώνη και ελαστική ζώνη. Οι ζώνες αυτές είναι ελλειπτικές όταν πρόκειται για κυκλική σήραγγα υπό συνθήκες μη υδραυλικών πιέσεων.



Σχήμα 55 Ζώνες που μπορούν να δημιουργηθούν γύρω από μία σήραγγα.

#### Σύζευξη ήλου γύρω από σήραγγα

Η παραμόρφωση του πετρώματος έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση αξονικής δύναμης στον ήλο και ο ήλος εξασκεί μία αντίθετης φοράς πίεση στην βραχομάζα.

Η αποτόνωση της βραχομάζας γίνεται με την πάροδο του χρόνου από την στιγμή της εκσκαφής για αυτό η χρονική στιγμή που θα τοποθετηθεί ο ήλος επηρεάζει σημαντικά

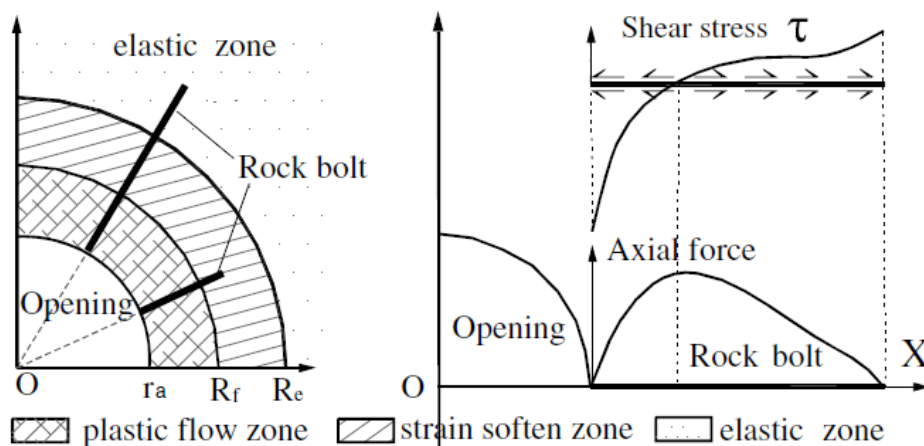
την συμπεριφορά του ως μέτρο υποστήριξης. Για να εκτιμηθεί αυτή η επίδραση, χρησιμοποιείται ο λόγος:

$$\eta = \frac{u_0}{u_{ult}} \quad (13)$$

όπου  $u_0$  είναι η μετατόπιση της βραχομάζας την στιγμή που τοποθετείται ο ήλος και  $u_{ult}$  είναι η οριακή μετατόπιση της βραχομάζας αφού σταθεροποιηθεί.

Κατά τους Carranza-Torres και Fairhurst (2000), η μετατόπιση του μετώπου εκσκαφής είναι το 30% της συνολικής μετατόπισης. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος  $\eta$  είναι μεγαλύτερος από το 30% διότι ο ήλος τοποθετείται μετά το μέτωπο της σήραγγας.

Δεδομένου ότι το μαλακό πέτρωμα γύρω από ένα άνοιγμα δεν βρίσκεται μόνο σε ελαστικές συνθήκες ο ήλος πρέπει να διέρχεται από διαφορετικές περιοχές. Στο σχήμα 56 φαίνονται η σχετική θέση του ήλου, η ζώνη πλαστικής ροής και η χαλαρωμένη ζώνη μαζί με την αξονική δύναμη και την διατμητική τάση του ήλου.



Σχήμα 56 Ζώνη πλαστικής ροής και χαλαρωμένη ζώνη - Αξονική δύναμη και διατμητική τάση του ήλου.

Οι διαφορετικές περιοχές που διατέμνει ο ήλος έχουν διαφορετική παραμόρφωση. Εάν οι μετατοπίσεις στην πλαστική ζώνη, στην χαλαρή ζώνη και ελαστική ζώνη είναι αντίστοιχα  $u_p$ ,  $u_s$  και  $u_e$  η εξίσωση για τον ήλο εκφράζεται με τις σχέσεις:

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} = H \left[ \frac{P(x)}{E_b A_b} + \frac{P(x)}{E_m S} - \frac{\partial u(x)}{\partial x} \right] \quad (14a)$$

και

$$u(x) = \begin{cases} u_p(x) \\ u_s(x) \\ u_e(x) \end{cases} \quad (14b)$$

Για παράδειγμα η μετατόπιση στην πλαστική ζώνη εκφράζεται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$u_p(x) = r \left[ u_1 + \xi^{-(1+h)} u_2 + u_3 \left( \frac{R_f}{r} \right)^{1+f} \right] \quad (15a)$$

$$u_1 = B_0 \frac{h-1}{1+h} \quad (15b)$$

$$u_2 = 2B_0 \frac{f-h}{[(1+h)(1+f)]} \quad (15c)$$

$$u_3 = \left[ \frac{2B_0}{1+f} \right] \left( \frac{R_f}{R_e} \right)^{-(1+h)} \quad (15d)$$

$$B_0 = (1 + u_m) E_m [p_0(K_p - 1) + \sigma_c] / (K_p + 1) \quad (15e)$$

$$R_e = \frac{r_a}{\zeta} \left[ \frac{N \zeta^{K_p-1} (1-K_p)(h+K_p) + \sigma_s \left[ (1+h) + \frac{2}{\lambda-1} \right]}{(1-K_p)(h+K_p) p_i - \sigma^*(h+K_p)} \right]^{\frac{1}{K_p-1}} \quad (15f)$$

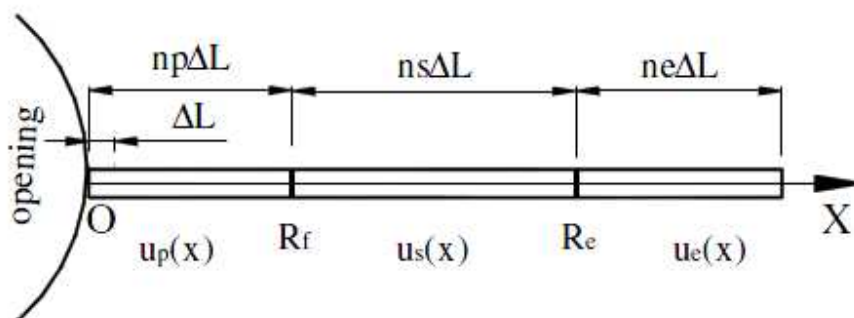
$$\zeta = \left[ \frac{2}{\lambda(1+h)} + (1-h) \right]^{\frac{1}{1+h}} = \frac{R_f}{R_e} \quad (15g)$$

$$h = (1 + \sin \varphi^*)(1 - \sin \varphi^*) \quad (15h)$$

όπου  $r_a$  η εσωτερική ακτίνα της σήραγγας,  $H$  και  $f$  οι συντελεστές διαστολής του πετρώματος σε χαλαρή και πλαστική κατάσταση αντίστοιχα,  $\varphi$  η γωνία διαστολής και ο συντελεστής  $K_p$  ορίζεται ως:

$$K_p = (1 + \sin \varphi) (1 - \sin \varphi)$$

Ακόμη, ο ήλος χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα. Ο αριθμός των στοιχείων  $n_p$ ,  $n_s$ ,  $n_e$  βρίσκονται αντίστοιχα στην ζώνη πλαστικής ροής, πλαστική χαλαρή ζώνη και ελαστική ζώνη.



Σχήμα 57 Επιμέρους τμήματα ήλου που βρίσκονται αντίστοιχα στην ζώνη πλαστικής ροής, πλαστική χαλαρή ζώνη και ελαστική ζώνη.

Οι αρχικές συνοριακές συνθήκες είναι:

$$X=0, P(0)=0$$

$$X=L, P(L)=0, \text{ όπου } P \text{ η αξονική δύναμη στην θέση } x.$$

Όταν η παραμένουσα διατμητική τάση ξεπεράσει την αντοχή της διεπιφάνειας τότε ξεκινά η αποσύζευξη και οι οριακές συνθήκες του ήλου είναι διαφορετικές. Μόνο η διατμητική τάση υπάρχει στο τμήμα που έχει αποκολληθεί και το μήκος της σύζευξης σταδιακά μειώνεται. Δύναμη εξόλκευσης (αποσύνδεσης) δημιουργείται στο τέλος του συζευγμένου τμήματος από την παραμένουσα διατμητική τάση και αποτελεί τη νέα συνοριακή συνθήκη για τον ήλο. Η αποσύζευξη δεν σταματά μέχρι η παραμένουσα διατμητική τάση να γίνει χαμηλότερη από την αντοχή της διεπιφάνειας. Αν η αποσύζευξη συμβεί στην βραχομάζα κοντά στο ένεμα τότε η παραμένουσα διατμητική τάση είναι ίδια με αυτή της βραχομάζας.

### 3.2 Δοκιμές εξόλκευσης ήλων ολόσωμης πάκτωσης.

Το σύστημα οπλισμού του πετρώματος (Windsor, 1997) αποτελείται από τέσσερα επιμέρους κύρια στοιχεία: το πέτρωμα, το στοιχείο οπλισμού, την εσωτερική σύζευξη, και την εξωτερική σύζευξη. Με βάση τον τύπο της εσωτερικής σύζευξης, όπως προαναφέρθηκε, η ενίσχυση του πετρώματος διακρίνεται σε τρεις τύπους:

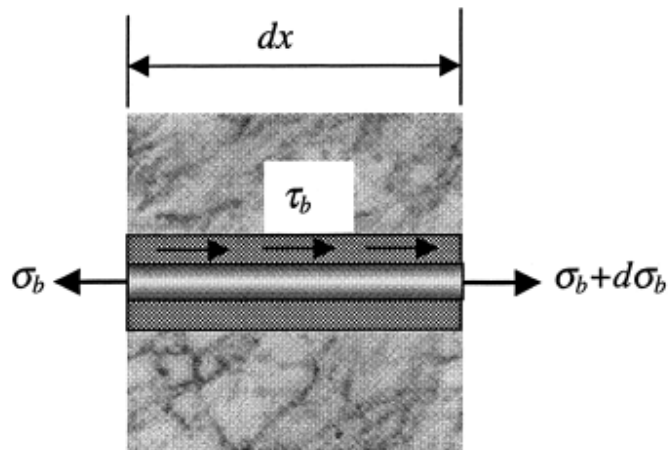
- (α) ολόσωμης πάκτωσης (σύζευξης) με ένεμα (CMC),
- (β) ολόσωμης πάκτωσης (σύζευξης) με τριβή (CFC), και
- (γ) σημειακής πάκτωσης (σύζευξης) είτε με τριβή είτε με ένεμα (DMFC).

Από την ισορροπία του απειροστού τμήματος της ήλωσης που φαίνεται στο σχήμα 58, προκύπτει η διατμητική τάση:

$$\tau_b = - \frac{A}{\pi d_b} \frac{d\sigma_b}{dx} \quad (1)$$

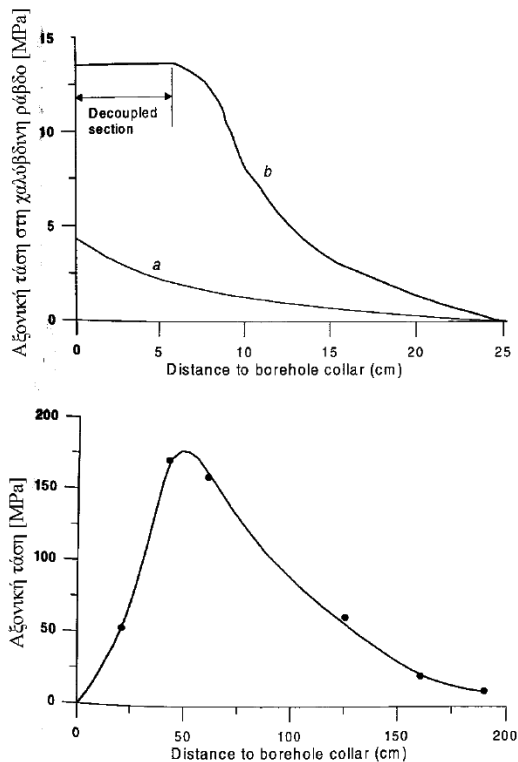
Όπου  $d_b$ : διάμετρος του ήλου

$A$ : εμβαδόν διατομής του ήλου



Σχήμα 58 Τάσεις σε απειροστό μήκος ήλωσης.

Στο σχήμα 59 φαίνεται η κατανομή της ορθής τάσης σε έναν ήλο που υφίσταται δοκιμή εξόλκευσης και σε έναν ήλο που στηρίζει υπόγειο άνοιγμα. Η κατανομή της διατμητικής τάσης κατά μήκος αυτής της χαλύβδινης ράβδου που υφίσταται εξόλκευση σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, φαίνεται στο σχήμα 60.



Σχήμα 59 Κατανομή της αξονικής τάσης κατά μήκος ήλου ολόσωμης πάκτωσης. Πάνω: Δοκιμή εξόλκευσης, a) Χαμηλή φόρτιση b) Υψηλή φόρτιση. Κάτω: Επί τόπου ήλος σε λειτουργία.

Για ήλους ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα, η μείωση της διατμητικής τάσης δίνεται από την:

$$\tau_b = \frac{a}{2} \sigma_{b0} e^{-2a \frac{x}{d_b}} \quad (2)$$

$$\text{όπου } \alpha^2 = \frac{2 * G_r * G_g}{E_b * \left[ G_r \ln \left[ \frac{d_g}{d_b} \right] + G_g \ln \left( \frac{d_0}{d_g} \right) \right]}$$

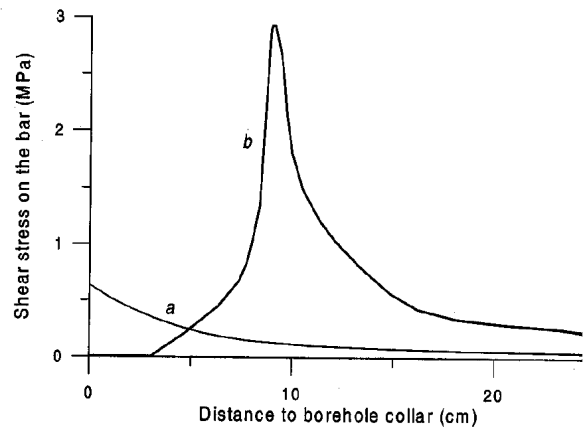
$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \nu_r)} \quad , \quad G_g = \frac{E_g}{2(1 + \nu_g)} \quad (3a)$$

όπου

$\sigma_{b0}$ : η αξονική τάση στον ήλο στο σημείο φόρτισης

$E_b$ : το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα του ήλου

$E_r$ : το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας



Σχήμα 60 Διατμητικές τάσεις στην χαλύβδινη ράβδο.

$\nu_r$ : ο λόγος του Poisson της βραχομάζας

$\nu_g$ : ο λόγος του Poisson του ενέματος

$d_g$ : η διάμετρος του διατρήματος

$d_0$ : η διάμετρος ενός κύκλου στο πέτρωμα εκτός του οποίου δεν επιδρά ο ήλος

Η παραπάνω σχέση ισχύει και για ήλους ολόσωμης πάκτωσης με τριβή, με τροποποίηση της σταθεράς  $\alpha$ , για  $G_g=G_r$ ,  $\nu_g = \nu_r$ ,  $d_g = d_r$ . Εξ' αυτού προκύπτει:

$$\alpha^2 = \frac{2 \cdot G_r}{E_{b*} \ln \left[ \frac{d_0}{d_b} \right]} \quad (3b)$$

Η αξονική τάση στον ήλο υπολογίζεται από την:

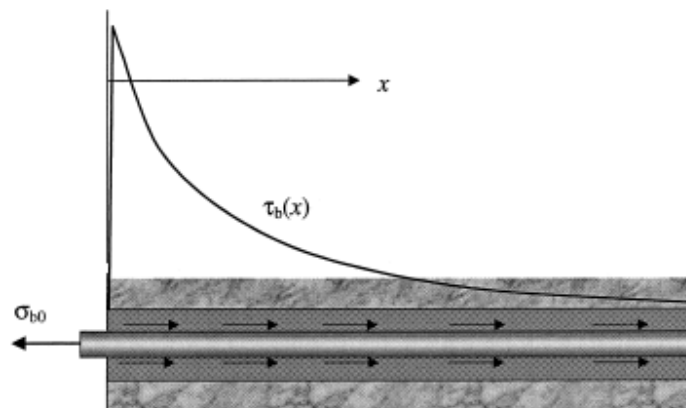
$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} - \frac{\pi d_b}{A} \int_0^x \tau_b(x) dx = \sigma_{b0} e^{-2\alpha \frac{x}{d_b}} \quad (4a)$$

ή

$$\sigma_b(x) = \frac{2}{\alpha} \tau_b(x). \quad (4b)$$

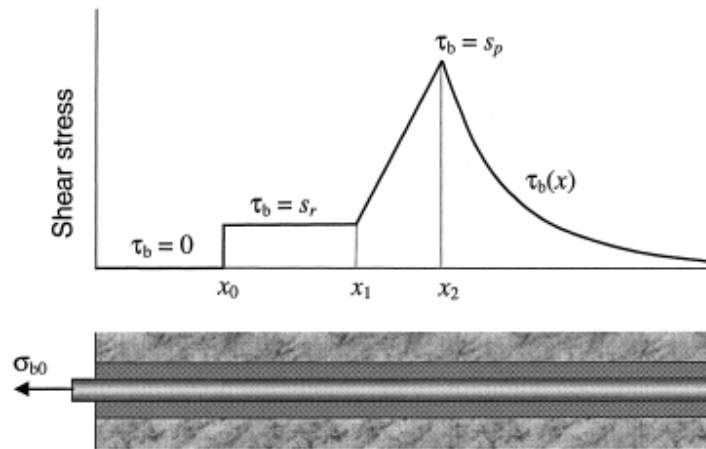
### 3.3 Ήλοι ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα

Η κατανομή της διατμητικής τάσης αμέσως πριν από την αποσύζευξη φαίνεται στο Σχήμα 61. Η καμπύλη αυτή αποτελεί και το όριο της καμπύλης (a) στο Σχήμα 59. Μετά την αποσύζευξη, προκύπτει κατανομή της διατμητικής τάσης όπως της καμπύλης (b) στο Σχήμα 60. Μία εξιδανικευμένη κατανομή φαίνεται στο Σχήμα 62.



Σχήμα 61 Κατανομή της διατμητικής τάσης αμέσως πριν την αποσύζευξη στο άκρο (Stillborg, 1999).





Σχήμα 62 Εξιδανικευμένη κατανομή της διατμητικής τάσης μετά από μερική αποσύζευξη (Stillborg, 1999).

Στο τμήμα  $0 < x < x_0$ ,

$$\tau_b(x) = 0$$

$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} \quad (5)$$

Στο τμήμα  $x_0 < x < x_1$ ,

$$\tau_b(x) = s_r$$

$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} - \frac{4 s_r}{d_b} (x - x_0) \quad (6)$$

Στο τμήμα  $x_1 < x < x_2$ ,

$$\tau_b(x) = \omega s_p + \frac{x - x_1}{\Delta} (1 - \omega) s_p$$

$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} - \frac{2 s_p}{d_b} \left[ 2 \omega (x - x_0) + \frac{1 - \omega}{\Delta} (x - x_1)^2 \right] \quad (7)$$

$$\Delta = x_2 - x_1$$

$$\omega = s_r / s_p$$

Στο τμήμα  $x > x_2$

$$\tau_b(x) = s_p e^{-2a \frac{x-x_2}{d_b}}$$

$$\sigma_b(x) = \frac{2 s_p}{d_b} e^{-2a \frac{x-x_2}{d_b}} \quad (8)$$

Η αξονική τάση για  $x = x_2$  δίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (8) από την:

$$\sigma_b(x_2) = \frac{2 s_p}{\alpha}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (7), δίνεται από την

$$\sigma_b(x_2) = \frac{4 P_0}{\pi d_b^2} - \frac{2 s_p}{d_b} [2\omega(x_2 - x_0) + (1 - \omega)\Delta]$$

όπου  $P_0$  η δύναμη εξόλκευσης.

Εξισώνοντας τα δεξιά μέρη των δύο σχέσεων προκύπτει:

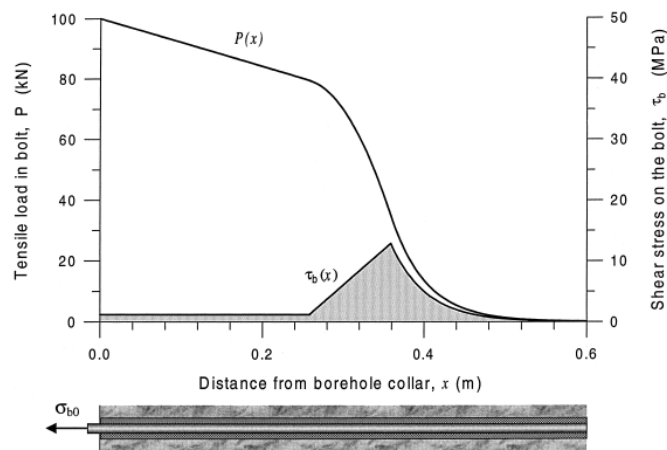
$$x_2 = x_0 + \frac{1}{2\omega} \left[ \frac{2P_0}{\pi d_b s_p} - \frac{d_b}{\alpha} - (1 - \omega)\Delta \right] \quad (9)$$

Η  $P_0$  ισούται με την συνολική διατμητική αντίσταση. Άρα,

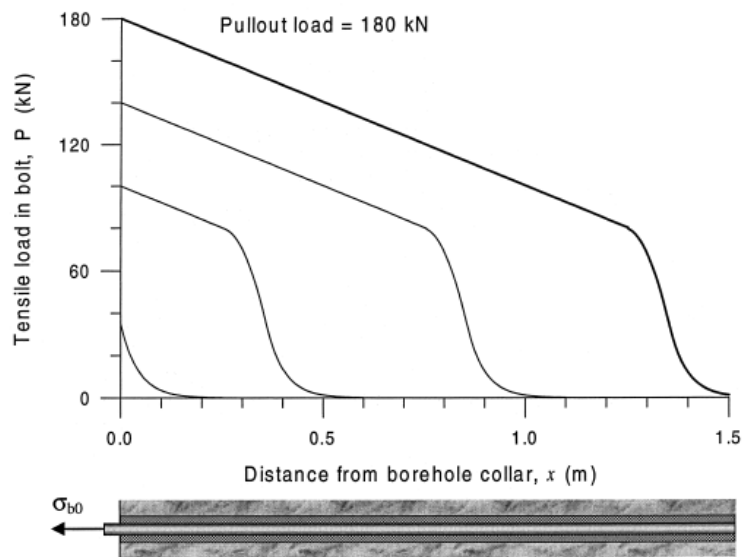
$$P_0 = \pi d_b \int_{x_0}^L \tau_b dx = \pi d_b \left[ s_r(x_1 - x_2) + \frac{1}{2} s_p \Delta(1 - \omega) + \frac{d_b}{2\alpha} s_p \left( 1 - e^{-\frac{2x(L-x_2)}{d_b}} \right) \right]$$

Όπου  $L$  το μήκος του ήλου. Επομένως η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναληφθεί δίνεται από την:

$$P_{0\max} = \pi d_b s_p \left[ \omega \left( L + \frac{d_b}{2\alpha} \ln \omega - \Delta - x_0 \right) + \frac{1}{2} \Delta(1 + \omega) + \frac{d_b}{2\alpha} (1 - \omega) \right] \quad (10)$$



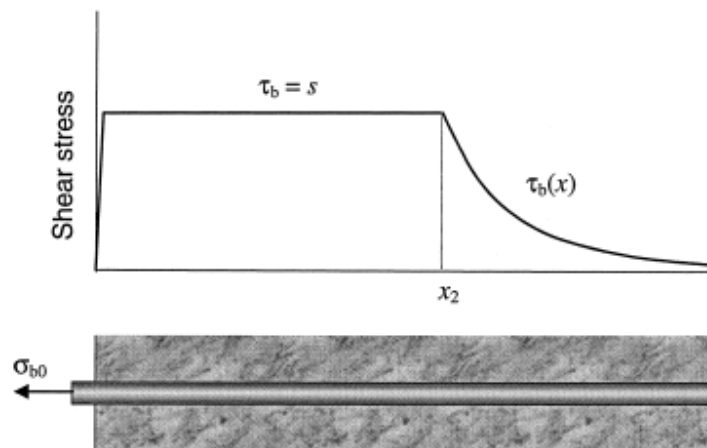
Σχήμα 63 Κατανομή της διατμητικής τάσης και του αξονικού φορτίου ήλου ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα, υποκείμενου σε αξονικό φορτίο 90 kN (Stillborg, 1999).



Σχήμα 64 Κατανομή του αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου ολόσωμης πάκτωσης με ένεμα, σε διάφορα στάδια φόρτισης (Stillborg, 1999).

### 3.4 Ήλοι ολόσωμης πάκτωσης με τριβή.

Για ήλους πακτωμένους με τριβή, η παραμένουσα διατμητική τάση στην διεπιφάνεια είναι η ίδια περίπου με την μέγιστη διατμητική αντοχή, δηλαδή  $s_r = s_p = s$ .



Σχήμα 65 Κατανομή της διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου ολόσωμης πάκτωσης με τριβή (Stillborg, 1999).

Το προσομοίωμα (Stillborg,1999) διακρίνει δύο περιοχές.

Στην περιοχή  $0 < x < x_2$ :

$$\begin{aligned}\tau_b(x) &= s_r \\ \sigma_b(x) &= \sigma_{b0} - \frac{\pi d_b}{A} s x\end{aligned}\quad (11)$$

Στην περιοχή  $x > x_2$ ,

$$\begin{aligned}\tau_b(x) &= s e^{-2\alpha\left(\frac{x-x_2}{d_b}\right)} \\ \sigma_b(x) &= \frac{2s}{\alpha} e^{-2\alpha\frac{x-x_2}{d_b}}\end{aligned}\quad (12)$$

Για  $x=x_2$  η τάση δίνεται με βάση τις εξισώσεις (11) και (12), αντιστοίχως από τις:

$$\begin{aligned}\sigma_b(x_2) &= \frac{2s}{\alpha} \\ \sigma_b(x_2) &= \frac{P_0}{A} - \frac{\pi d_b}{A} s x_2\end{aligned}$$

Εξισώνοντας τα δεξιά μέλη των δύο τελευταίων σχέσεων προκύπτει:

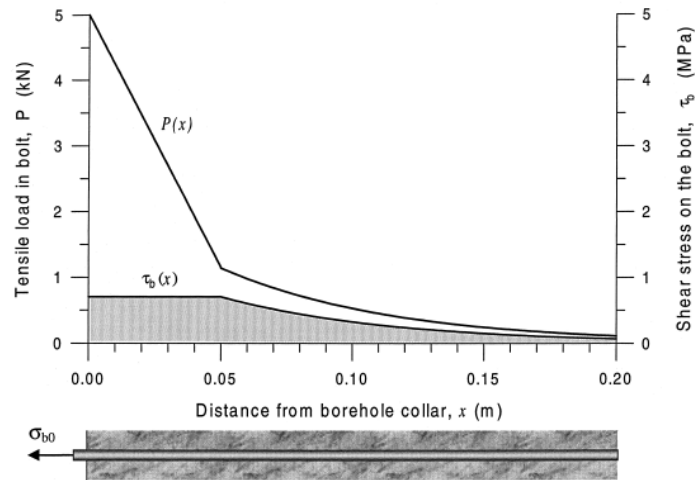
$$x_2 = \frac{1}{\pi d_b s} \left( P_0 - \frac{2As}{\alpha} \right) \quad (13)$$

Στην συνέχεια, το εφαρμοζόμενο φορτίο  $P_0$ , δίνεται από την:

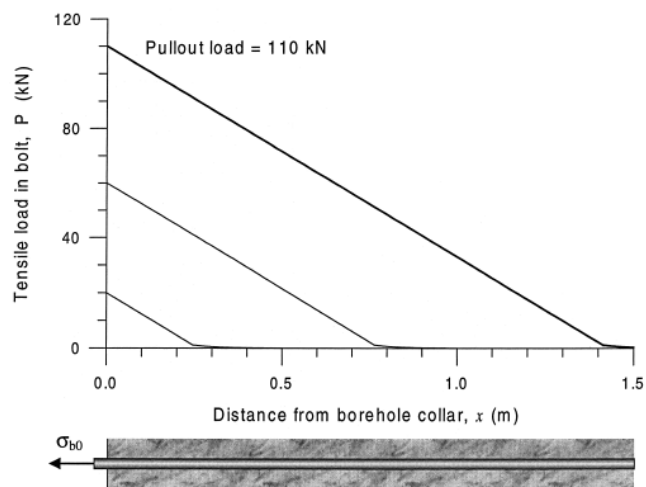
$$P_0 = \pi d_b \int_0^L \tau_b dx = s \pi d_b x_2 + \frac{\pi d_b^2}{2} \frac{s}{\alpha} \left[ 1 - e^{-2\alpha\left(\frac{L-x_2}{d_b}\right)} \right] \quad (14)$$

Το εφαρμοζόμενο φορτίο φθάνει τη μέγιστη τιμή του όταν η διατμητική αντοχή ενεργοποιείται κατά μήκος ολόκληρου του ήλου, δηλαδή όταν  $x_2 = L$ . Εξ' αυτού προκύπτει η διατμητική αντοχή ήλων ολόσωμης πάκτωσης με τριβή:

$$s = \frac{P_{0max}}{\pi d_b L} \quad (15).$$



Σχήμα 66 Κατανομή της διατμητικής τάσης και του αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου Swellex, για εφαρμοζόμενο φορτίο 5 kN.



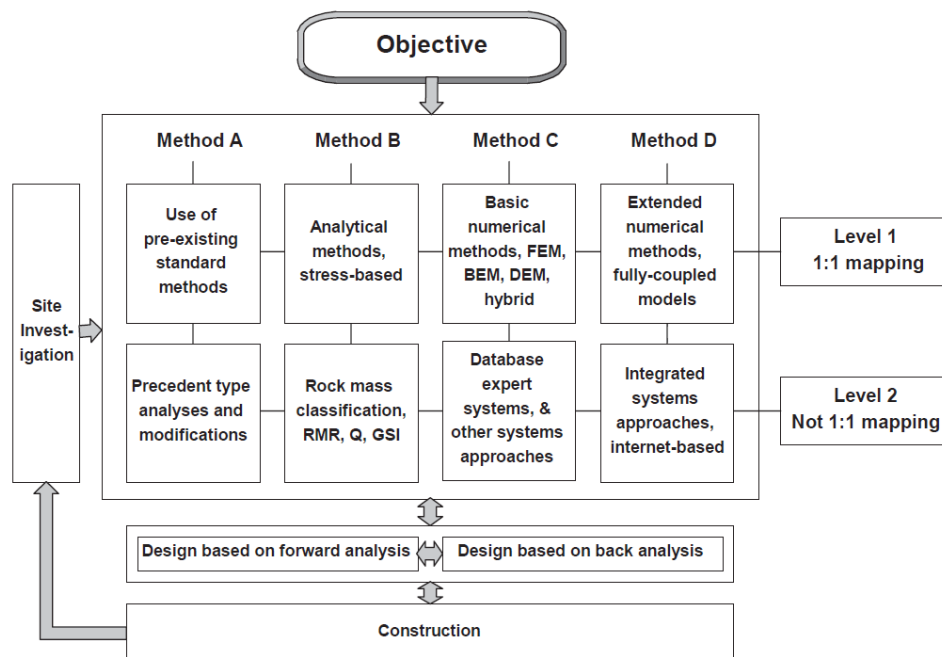
Σχήμα 67 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου Swellex σε διάφορα στάδια φόρτισης.



## 4 Κεφάλαιο - Περιγραφή Αριθμητικών μεθόδων – Εφαρμογή στο FLAC

### 4.1 Αριθμητικές Μέθοδοι

Καθώς αναπτύσσονται οι διαφορετικές τεχνικές μοντελοποίησης δημιουργείται ένα ευρύ φάσμα προσέγγισης της κατασκευής και του σχεδιασμού ενός μοντέλου. Αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν να χωριστούν σε οκτώ κατηγορίες βάσει των τεσσάρων μεθόδων και δύο σταδίων που φαίνονται στο σχήμα 68.



Σχήμα 68 Κατηγορίες και ταξινόμηση αριθμητικών μεθόδων.

Η μοντελοποίηση και ο σχεδιασμός ξεκινούν με τον στόχο (Objective). Έπειτα ακολουθούν οι 4 μέθοδοι:

- Η μέθοδος A όπου ο σχεδιασμός βασίζεται σε προηγούμενη εμπειρία.
- Η μέθοδος B όπου ο σχεδιασμός βασίζεται σε αναλυτικές μεθόδους.
- Η μέθοδος C όπου ο σχεδιασμός βασίζεται σε μοντελοποίηση κατά την οποία γίνονται δοκιμές για την εφαρμογή του πιο σχετικού μηχανισμού.
- Η μέθοδος D όπου ο σχεδιασμός βασίζεται σε μοντελοποίηση που περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα.

Στο σχήμα 68 υπάρχουν δύο σειρές, στην πρώτη περιλαμβάνονται οι μέθοδοι με τις οποίες γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί ένας μηχανισμός σχεδιασμού 1:1 ενώ στην δεύτερη σειρά βρίσκονται μέθοδοι όπου οι μηχανισμοί σχεδιασμού δεν είναι εντελώς ακριβείς, όπως π.χ. η χρήση συστημάτων κατηγοριοποίησης εδαφών. Κάποιες παράμετροι χαρακτηρισμού της βραχομάζας προέρχονται από επί τόπου έρευνα και έτσι ο σχεδιασμός και η κατασκευή προχωρούν με ανατροφοδοτούμενους βρόγχους (feedback loops) από το μοντέλο προς την κατασκευή.

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται πιο συχνά είναι:

- Συνεχείς μέθοδοι: Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM), η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM).
- Διακριτές μέθοδοι: Μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM), μέθοδοι δικτύου ασυνεχούς δομής (DFN).
- Υβριδικές μέθοδοι (συνδυασμός συνεχών και διακριτών μεθόδων).

Η επιλογή ανάμεσα στις συνεχείς και διακριτές μεθόδους εξαρτάται από συγκεκριμένους παράγοντες του εκάστοτε προβλήματος αλλά κυρίως από την κλίμακα του προβλήματος και από την γεωμετρία του συστήματος ασυνεχειών. Η συνεχής προσέγγιση μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο εάν υπάρχουν λίγες ασυνέχειες και το άνοιγμα των ασυνεχειών και η απόσπαση τεμάχους δεν είναι σημαντικοί παράγοντες. Η διακριτή προσέγγιση είναι καταλληλότερη για μετρίως ρωγματοωμένες βραχομάζες όπου ο αριθμός των ασυνεχειών είναι πολύ μεγάλος για την συνεχή προσέγγιση. Στην συνέχεια αναλύονται οι συνεχείς μέθοδοι.

#### **4.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (FDM).**

Η βασική τεχνική στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι ο διαφορισμός των οριακών μερικών διαφορικών εξισώσεων αντικαθιστώντας τις μερικές παραγώγους με διαφορές προσδιορισμένες στα γειτονικά σημεία του πλέγματος. Το πλέγμα είναι ένα βολικός τρόπος για την δημιουργία τιμών συνάρτησης στα σημεία με μικρά διαστήματα μεταξύ τους έτσι ώστε τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν να είναι αρκετά μικρά έτσι ώστε να είναι αποδεκτά. Με κατάλληλες τυποποιήσεις, και απομόνωση της εξαρτημένης από την ανεξάρτητη μεταβλητή (στατική ή δυναμική επίλυση) δεν χρειάζεται να επιλυθεί και να καθοριστεί όλο το σύστημα των εξισώσεων του μητρώου. Η κατάστρωση και επίλυση των εξισώσεων είναι τοπικές, γεγονός αποτελεσματικό για τον χειρισμό της μνήμης και αποθήκευσης κατά την εφαρμογή στον υπολογιστή. Δεν



εφαρμόζονται συναρτήσεις παρεμβολής για την προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων στις γειτονικές περιοχές του κάθε σημείου, όπως γίνεται στις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και συνοριακών στοιχείων (BEM). Είναι επομένως η πιο άμεση και φυσική τεχνική για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων.

#### **4.1.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).**

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων είναι σήμερα η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδος. Ως “πατέρας” της μεθόδου θεωρείται ο Έλληνας μηχανικός και Καθηγητής Ιωάννης Αργύρης, ο οποίος προκειμένου να επιλύσει δύσκολα προβλήματα αεροναυπηγικών κατασκευών επινόησε και εφήρμοσε πρώτος το 1944 τα τριγωνικά στοιχεία. Η μέθοδος προέκυψε ως εξέλιξη της Μεθόδου Άμεσης Δυσκαμψίας (μητρική ανάλυση). Σήμερα όμως, η Μέθοδος Άμεσης Δυσκαμψίας περιλαμβάνεται στις ειδικές εφαρμογές της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το εξεταζόμενο σώμα χωρίζεται σε στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων (πεπερασμένα στοιχεία) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε διακριτά σημεία (κόμβους). Κάθε ένα από τα στοιχεία αυτά εκφράζει κατά προσέγγιση τη συμπεριφορά μικρής περιοχής του σώματος την οποία και αναπαριστά, ενώ επιβάλλονται συνθήκες συνέχειας μεταξύ των στοιχείων αυτών. Το μητρώο συντελεστών των αγνώστων (μητρώο δυσκαμψίας) είναι συμμετρικό ταινιωτής μορφής. Ένα από τα αδύναμα σημεία της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση σε στοιχεία ολοκλήρου του εξεταζόμενου σώματος, γεγονός που αναπόφευκτα οδηγεί σε πολύ μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων, ιδιαίτερα σε τριδιάστατα προβλήματα με διεπιφάνειες, όπου γνωστές ή άγνωστες συναρτήσεις του προβλήματος μεταβάλλονται ασυνεχώς. Γενικά, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση οποιωνδήποτε μερικών διαφορικών εξισώσεων (γραμμικές και μη γραμμικές, σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις), γεγονός που δικαιολογεί τη μεγάλη δημοτικότητα της μεθόδου.

#### **4.1.3 Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM).**

Η ονομασία της μεθόδου δόθηκε τα τελευταία χρόνια από τον τρόπο επίλυσης των συνοριακών ολοκληρωτικών εξισώσεων, οι οποίες εμφανίζονται στη μέθοδο. Η μέθοδος, που αρχικά ήταν γνωστή ως “Μέθοδος Συνοριακών Ολοκληρωτικών Εξισώσεων”, έχει τις ρίζες της στην εργασία του Green (1828). Στην επιστήμη του μηχανικού η μέθοδος έγινε δημοφιλής σχετικά αργά. Κατά διαστήματα υπήρχαν διάφορες αναφορές, ωστόσο ο

καθοριστικός παλμός ήρθε στα μέσα της δεκαετίας του 1960 από τον Rizzo και τις εργασίες του συνεργάτη του Cruse. Ανάλογα με τη φυσική σημασία των άγνωστων συναρτήσεων που εμφανίζονται στις ολοκληρωτικές εξισώσεις, οι διατυπώσεις της Μεθόδου Συνοριακών Στοιχείων που αναπτύχθηκαν μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες:

- Την Άμεση Μέθοδο Συνοριακών Στοιχείων, όπου οι άγνωστες συναρτήσεις των ολοκληρωτικών εξισώσεων έχουν άμεσο φυσικό νόημα, π.χ. σε πρόβλημα ελαστικότητας η επίλυση των ολοκληρωτικών εξισώσεων δίνει συνοριακές μετατοπίσεις ή συνοριακά εντατικά μεγέθη.
- Την Ημιάμεση Μέθοδο Συνοριακών Στοιχείων, όπου οι ολοκληρωτικές εξισώσεις διατυπώνονται με τη βοήθεια συναρτήσεων αναλόγων της τασικής συνάρτησης στη θεωρία ελαστικότητας, ενώ η παραγωγή της ολοκληρωτικής έκφρασης δίνει τα άγνωστα φυσικά μεγέθη του προβλήματος.
- Την Έμμεση Μέθοδο Συνοριακών Στοιχείων, όπου οι ολοκληρωτικές εξισώσεις διατυπώνονται με τη βοήθεια μερικής ιδιόμορφης λύσης της διαφορικής εξίσωσης του προβλήματος, π.χ. η συνάρτηση Green του απείρως εκτεινόμενου χώρου των δύο διαστάσεων.

Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων παρουσιάζει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των δύο άλλων προαναφερθεισών μεθόδων. Αυτή είναι και η αιτία που η χρήση της καθημερινά επεκτείνεται ολοένα και περισσότερο στην αριθμητική επίλυση προβλημάτων, που περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- ❖ Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, γίνεται επιμερισμός μόνο του συνόρου της περιοχής εντός της οποίας ζητείται η συνάρτηση πεδίου, σε αντίθεση με τις Μεθόδους των Πεπερασμένων Διαφορών και Πεπερασμένων Στοιχείων, στις οποίες επιμερίζεται ολόκληρο το εσωτερικό του χωρίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απλοποίηση της διαδικασίας της διακριτοποίησης και την σημαντική μείωση του πλήθους των αγνώστων και επομένως και του αλγεβρικού συστήματος προς επίλυση κατά μια τάξη (πλήθος αγνώστων  $N$  αντί  $N^2$  για προβλήματα δύο διαστάσεων και  $N^2$  αντί  $N^3$  για προβλήματα τριών διαστάσεων).
- ❖ Η σημαντική μείωση των δεδομένων του προβλήματος έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου καθώς και την εξάλειψη της πιθανότητας σφάλματος κατά την προ και μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων – αποτελεσμάτων.

Κύρια μειονεκτήματα της Μεθόδου των Συνοριακών Στοιχείων είναι:

- ❖ Δεν είναι ακριβής μέθοδος στην προσομοίωση υλικών με μη-γραμμική συμπεριφορά.
- ❖ Δεν είναι ακριβής μέθοδος όταν υπάρχει ετερογένεια υλικών διότι δεν μπορούν να υπάρξουν τόσοι υπο-χώροι όσα τα στοιχεία στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

## **4.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.**

Στο πειραματικό μέρος της παρούσης διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε η προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης ήλου με χρήση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC (Itasca, 2008).

Το FLAC είναι ένα διδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών που εκτελεί ανάλυση Lagrange. Επομένως, σύμφωνα με το σχήμα 68, βρισκόμαστε στη μέθοδο C και στάδιο 1. Με το πρόγραμμα αυτό μπορεί να προσομοιωθεί η συμπεριφορά κατασκευών σε εδάφη, πετρώματα ή άλλα υλικά που μπορούν να υποστούν πλαστική ροή όταν φτάσουν στο όριο διαρροής τους. Τα υλικά προσομοιώνονται με στοιχεία ή ζώνες που σχηματίζουν ένα δίκτυο που προσαρμόζεται από τον χρήστη να ταιριάζει στο σχήμα του αντικειμένου που προσομοιώνεται.

Κάθε στοιχείο συμπεριφέρεται σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο γραμμικό ή μη γραμμικό νόμο τάσης/παραμόρφωσης σε συσχέτιση με τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις ή συνοριακούς περιορισμούς. Το υλικό μπορεί να διαρρεύσει και το πλέγμα μπορεί να παραμορφωθεί και να κινηθεί μαζί με το υλικό που προσομοιώνει.

Αν και το FLAC αρχικώς δημιουργήθηκε για γεωτεχνικούς και μεταλλειολόγους σαν πρόγραμμα προσφέρει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για επίλυση σύνθετων προβλημάτων μηχανικής.

### **4.2.1 Πεπερασμένες Διαφορές σε εφαρμογή στο FLAC.**

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μάλλον η πιο παλαιά αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση συστημάτων διαφορικών εξισώσεων, με δοθείσες αρχικές τιμές και/ή συνοριακές συνθήκες. Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, κάθε παράγωγος στο σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας αντικαθίσταται από μια αλγεβρική έκφραση σε όρους των μεταβλητών πεδίου (π.χ. τάση ή μετατόπιση) σε

συγκεκριμένα σημεία στον χώρο, αυτές οι μεταβλητές είναι απροσδιόριστες μεταξύ των στοιχείων.

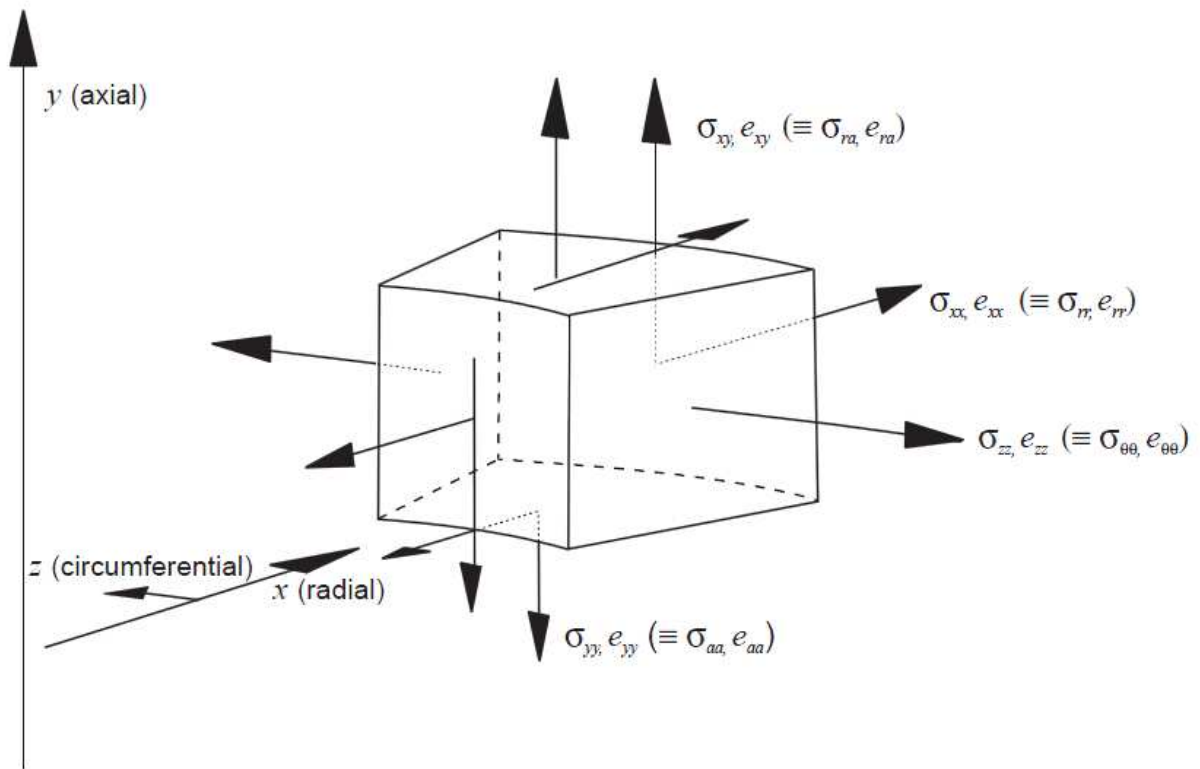
Αντιθέτως, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει την απαίτηση οι ποσότητες πεδίου να ποικίλουν εντός κάθε στοιχείου κατά τρόπο διαγεγραμμένο, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες εξισώσεις ελεγχόμενες από παραμέτρους. Η τυποποίηση περιλαμβάνει την προσαρμογή αυτών των παραμέτρων για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος.

Και οι δύο μέθοδοι παράγουν ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων προς επίλυση. Αν και αυτές οι εξισώσεις παράγονται με αρκετά διαφορετικούς τρόπους είναι πανομοιότυπες και για τις δύο μεθόδους. Είναι λοιπόν ανούσιο να αναφερθούν πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου καθώς οι τελικές εξισώσεις είναι ίδιες. Παρ' όλα αυτά, με την πάροδο των χρόνων, κάποιοι τρόποι επίλυσης έχουν εδραιωθεί π.χ. τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων συχνά συνδυάζουν μητρώα στοιχείων εντός μητρώων δυστροπίας, κάτι που δεν συμβαίνει στις πεπερασμένες διαφορές γιατί είναι πιο αποτελεσματικό να δημιουργηθούν οι εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών σε κάθε βήμα. Το FLAC χρησιμοποιεί μία μέθοδο με χρονικά βήματα για να λύσει τις αλγεβρικές εξισώσεις.

#### **4.2.2 Αξονοσυμμετρικό μοντέλο.**

Το FLAC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατασκευή μοντέλων που αφορούν προβλήματα στα οποία η κατανομή των τάσεων γίνεται σε σώματα με άξονα συμμετρίας εκ περιστροφής, δηλαδή αξονοσυμμετρικά στερεά. Για την διαμόρφωση του δικτύου του αξονοσυμμετρικού μοντέλου αρχικώς πρέπει να δοθεί η εντολή "config axisymmetry". Επίσης, το σύστημα συντεταγμένων σε ένα τέτοιο μοντέλο είναι κυλινδρικό όπου ο άξονας  $X=0$  είναι ο άξονας συμμετρίας, ο θετικός άξονας  $x$  αντιστοιχεί στις ακτινικές συντεταγμένες και ο άξονας  $y$  στις αξονικές συντεταγμένες. Ο άξονας  $z$  αντιστοιχεί στις περιμετρικές συντεταγμένες. Μόνο κατά τον θετικό άξονα  $x$  σχηματίζεται αξονοσυμμετρικό μοντέλο.

Το αξονοσυμμετρικό δίκτυο κόμβων αντιστοιχεί σε έναν κυκλικό τομέα 1 rad που είναι περιορισμένος σε μετατόπιση κατά τον άξονα  $z$ . Κάθε μετατόπιση κατά το επίπεδο  $xy$  προκαλεί τάσεις στην περιφέρεια (άξονας  $z$ ).



Σχήμα 69 Τροπή και τάσεις στην αξονοσυμμετρική ανάλυση.

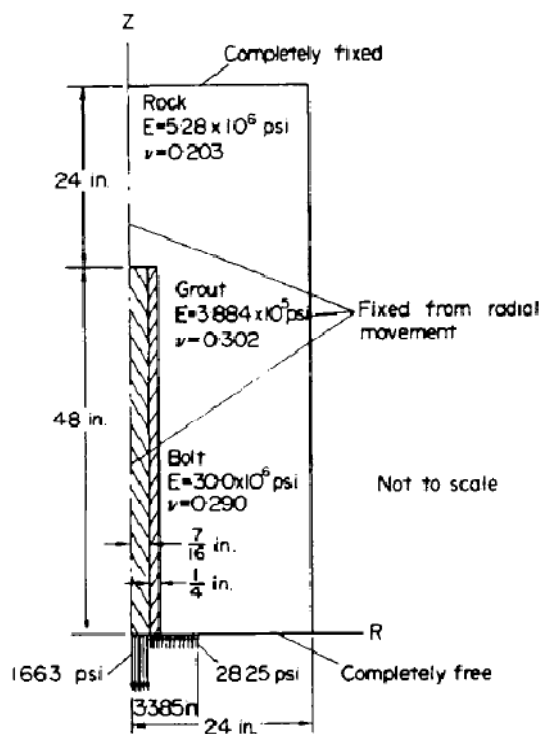
#### 4.2.3 Σύγκριση μοντέλου πεπερασμένων διαφορών με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Οι Nitzsche και Haas (1976) αναφέρουν ότι η γνώση της εντατικής κατάστασης τόσο στον ήλο όσο και γύρω από αυτόν είναι απαραίτητη για την σωστή χρήση του. Επιπλέον αναφέρουν πως για να προσδιορισθεί η εντατική κατάσταση εντός και γύρω από τον ήλο πρέπει να εξετασθούν τα αποτελέσματα τριών ξεχωριστών γεγονότων, αν και δεν συμβαίνουν και τα τρία ταυτόχρονα. Το πρώτο, είναι η αρχική φόρτιση του συστήματος ήλου-ενέματος-πετρώματος όταν τοποθετείται ο ήλος. Το δεύτερο, είναι η επακόλουθη κίνηση του πετρώματος που περιβάλλει τον ήλο λόγω πρόσθετων εργασιών στην σήραγγα ή στο μεταλλείο. Παραδείγματος χάριν, ήλοι εγκατεστημένοι σε περιοχή υψηλών τάσεων κοντά στο μέτωπο της σήραγγας θα υποστούν φόρτιση ή αποφόρτιση μετά την τοποθέτηση καθώς οι εργασίες στην σήραγγα προχωρούν, προκαλώντας την παραμόρφωση του πετρώματος. Το τρίτο γεγονός, είναι παρόμοιο με το δεύτερο, αλλά

θεωρείται ξεχωριστό διότι περιλαμβάνει ασυνεχείς κινήσεις του πετρώματος και υπάρχουσες ρωγματώσεις ή νέες οφειλόμενες στην διάνοιξη της σήραγγας.

Στο παράδειγμα των Nitzsche και Haas (1976) επισημαίνεται πως οι τάσεις που εφαρμόζονται στους ήλους είναι αξονοσυμμετρικές σε σχέση με τον άξονα του ήλου και για αυτό το πρόβλημα θεωρείται αξονοσυμμετρικό. Σαν μέθοδος επίλυσης, επιλέχθηκε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και όλα τα υλικά θεωρήθηκαν γραμμικώς ελαστικά, ομογενή και ισότροπα.

Κατά την τοποθέτηση ενός ήλου πλήρους ενεματώσεως, ο ήλος και το ένεμα τοποθετούνται εντός του διατρήματος με το ένεμα να καλύπτει πλήρως το κενό μεταξύ ήλου και τοιχωμάτων του διατρήματος καθ' όλο το μήκος του ήλου. Αφού το ένεμα στερεοποιηθεί, τοποθετείται η πλάκα στήριξης και περισφίγγεται το περικόχλιο. Η κατάσταση αυτή προσομοιώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 70.

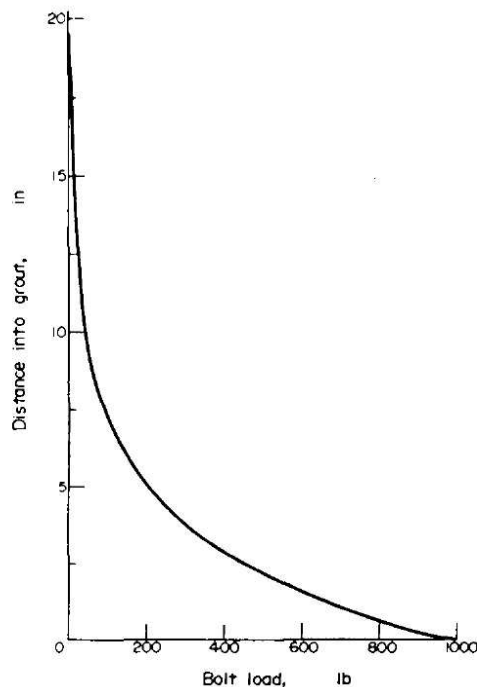


Σχήμα 70 Απεικόνιση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (Nitzsche & Haas (1976)).

Ο ήλος έχει διάμετρο 7/8 in και το διάτρημα 1 1/8 in. Οι τάσεις που εφαρμόστηκαν αντιστοιχούν σε ένα φορτίο ίσο με 1000 lb το οποίο όταν εφαρμόζεται στον ήλο ασκείται τάση ίση με 1663.0 psi, ενώ όταν εφαρμόζεται σε κυκλική πλάκα έδρασης, διατομής 36in<sup>2</sup> και αφαιρώντας την διατομή του ήλου, προκύπτει τάση ίση με 28.25 psi. Η πλάκα

στήριξης είναι κυκλική για να διατηρείται η αξονική συμμετρία του προβλήματος. Οι ιδιότητες του χάλυβα είναι αυτές του δομικού χάλυβα, του ενέματος είναι του συνήθους ενέματος και οι ιδιότητες του πετρώματος είναι αυτές του ασβεστολίθου της Indiana. Όσον αφορά τις μετατοπίσεις, ο άξονας του ήλου είναι απαλλαγμένος από κάθε ακτινική μετατόπιση, το τμήμα που αντιστοιχεί στο εσωτερικό του πετρώματος είναι πλήρως πακτωμένο, ενώ το τμήμα που αντιστοιχεί στο εσωτερικό της σήραγγας είναι ελεύθερο.

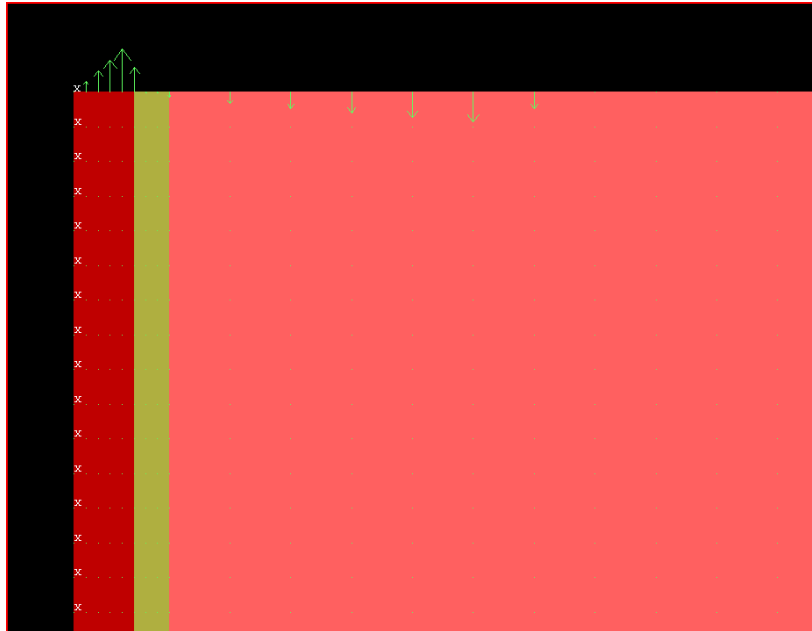
Στο διάγραμμα του σχήματος 71, παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου σε σχέση με την απόσταση από το άκρο στο οποίο ασκείται το φορτίο και δείχνει πως η επίδραση του φορτίου είναι αμελητέα στις 20 in περίπου ή κατά προσέγγιση σε απόσταση ίση με 18 διαμέτρους ήλου εντός του ενέματος.



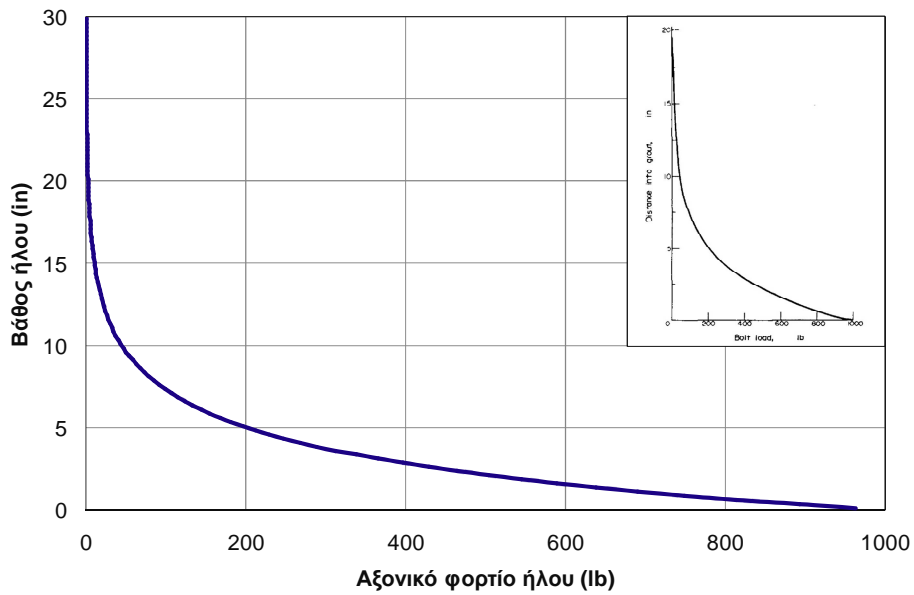
**Σχήμα 71** Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου σε σχέση με την απόσταση από το σημείο εφαρμογής του  
(Nitzsche και Haas (1976)).

Στην συνέχεια, το ίδιο ακριβώς αξονοσυμμετρικό μοντέλο με τις ίδιες διαστάσεις και ιδιότητες υλικών κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα FLAC<sup>2D</sup>. Στο FLAC<sup>2D</sup> τα υλικά ορίζονται ως ζώνες με διαφορετικές ιδιότητες, ο ήλος δόθηκε με πέντε ζώνες (κόκκινο, σχήμα σχεδίου 72) και το ένεμα με τρεις (κίτρινο, σχήμα σχεδίου 72). Το μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 72 όπου τα βέλη δείχνουν την δύναμη εξόλκευσης στον ήλο και την αντίθετης φοράς δύναμη στην πλάκα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο

σχήμα 73, στο οποίο φαίνεται πως η επίδραση του φορτίου είναι αμελητέα από τις 20 in και έπειτα.



Σχήμα 72 Λεπτομέρεια καννάβου πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 73 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου σε σύγκριση με το διάγραμμα των Nitzsche και Haas .



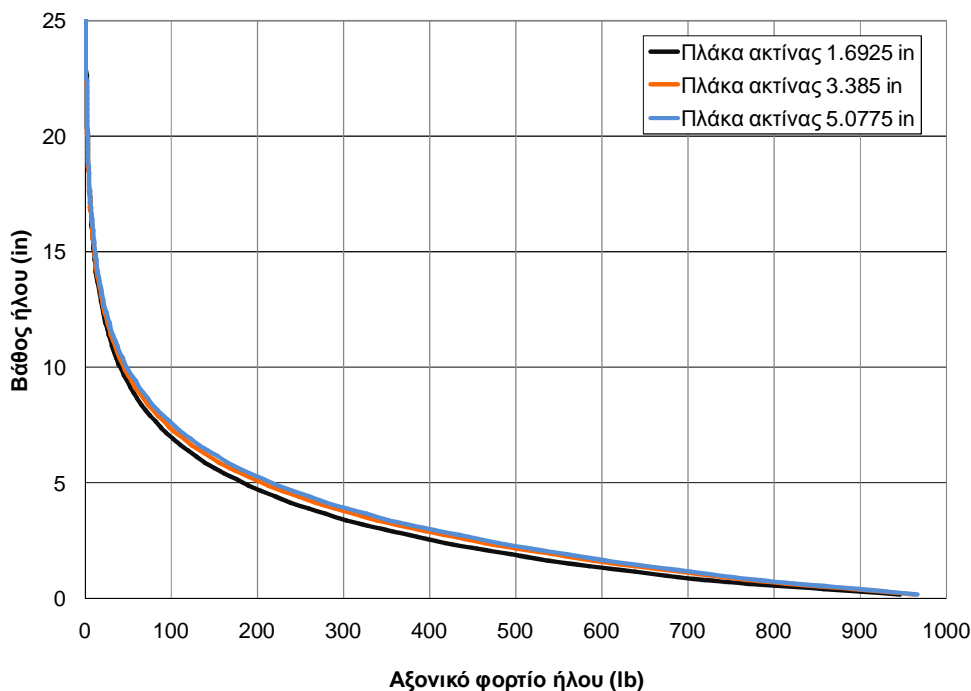
Παρατηρείται λοιπόν, πως με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιεί το FLAC<sup>2D</sup> καταλήγουμε στα ίδια ακριβώς αποτελέσματα που καταγράφηκαν και με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

#### 4.2.4 Διερεύνηση

##### Α) Επίδραση μεγέθους πλάκας στήριξης.

Αρχικά, έγινε διερεύνηση για το αν και κατά πόσο επηρεάζει το μέγεθος της πλάκας στήριξης την κατανομή του φορτίου κατά μήκος του ήλου. Έγιναν δύο δοκιμές: στην πρώτη δοκιμή η ακτίνα της πλάκας μειώθηκε κατά το ήμισυ, ενώ στην δεύτερη αυξήθηκε κατά το ήμισυ.

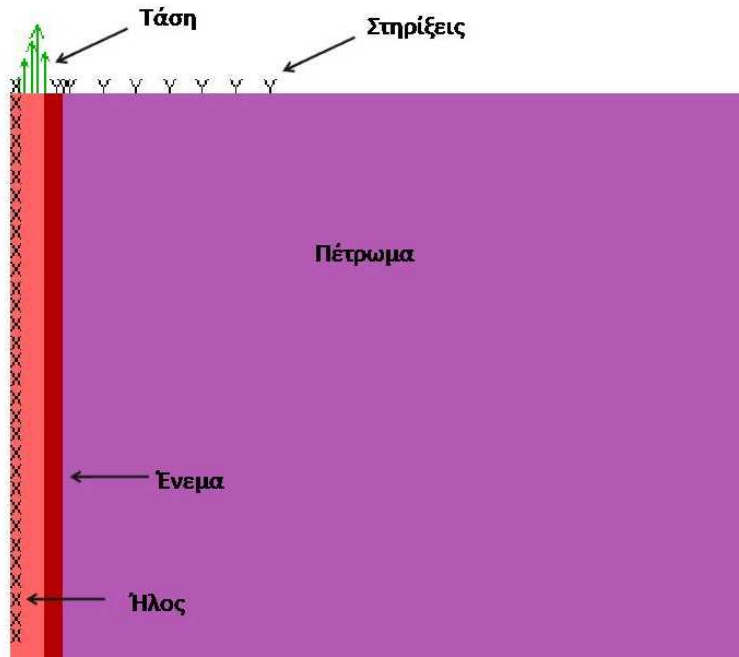
Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα σε ένα διάγραμμα (Σχήμα 74), παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος της πλάκας στήριξης, ελαφρώς μεγαλύτερο φορτίο μεταφέρεται στο ίδιο βάθος εντός του ήλου. Ακόμη παρατηρείται και πάλι πως η επίδραση του φορτίου είναι αμελητέα στις 20 in.



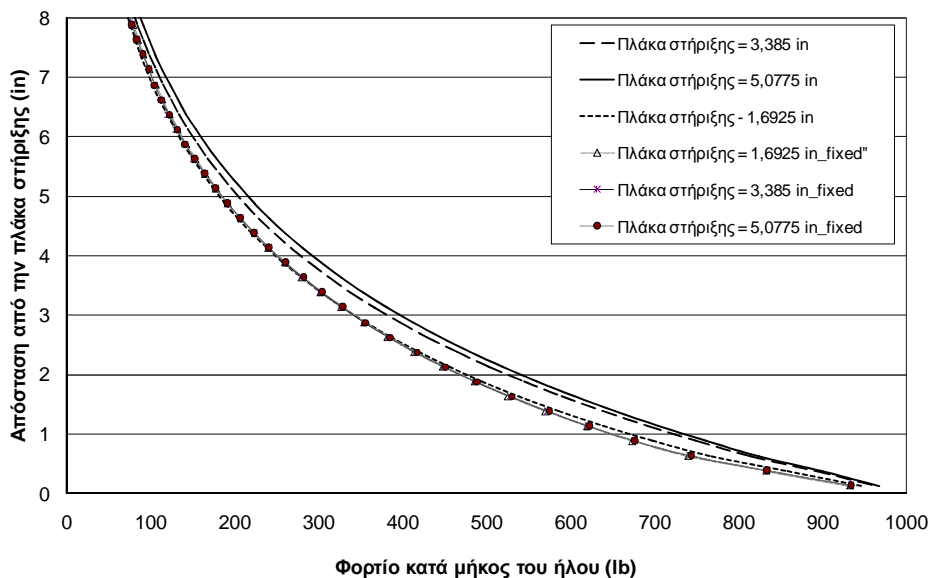
Σχήμα 74 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου για διαφορετικές ακτίνες πλάκας στήριξης.

## B) Τρόπος προσομοίωσης.

Εν συνεχεία, οι ίδιες δοκιμές επαναλήφθηκαν με την διαφορά πως το φορτίο ασκήθηκε μόνο στις ζώνες που αντιστοιχούν στην επιφάνεια του ήλου και η επιφάνεια που αντιστοιχεί στην πλάκα στήριξης αντικαταστάθηκε από στηρίξεις.



Σχήμα 75 Απεικόνιση τμήματος μοντέλου με προσομοίωση πλάκας στήριξης με δέσμευση κόμβων πλέγματος.



Σχήμα 76 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου για διαφορετικές ακτίνες πλάκας στήριξης και για αντίστοιχες ακτίνες που προσομοιώνονται με στηρίξεις.

Από το σχήμα 76 φαίνεται πως και στις τρεις περιπτώσεις που η πλάκα στήριξης προσομοιώθηκε με δέσμευση της κίνησης των κόμβων, τα αποτελέσματα διαφέρουν ελαφρώς από εκείνα των προηγούμενων μοντέλων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από το εύρος των δεσμευμένων κόμβων.

### **Γ) Επίδραση πάχους και μέτρου ελαστικότητας ενέματος.**

Έπειτα, μελετήθηκαν οι περιπτώσεις και όπου το ένεμα έχει μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $3.884E5$  psi και  $1.942E5$  psi και το πάχος του είναι:

- 1/4 in
- 8/16 in
- 12/16 in

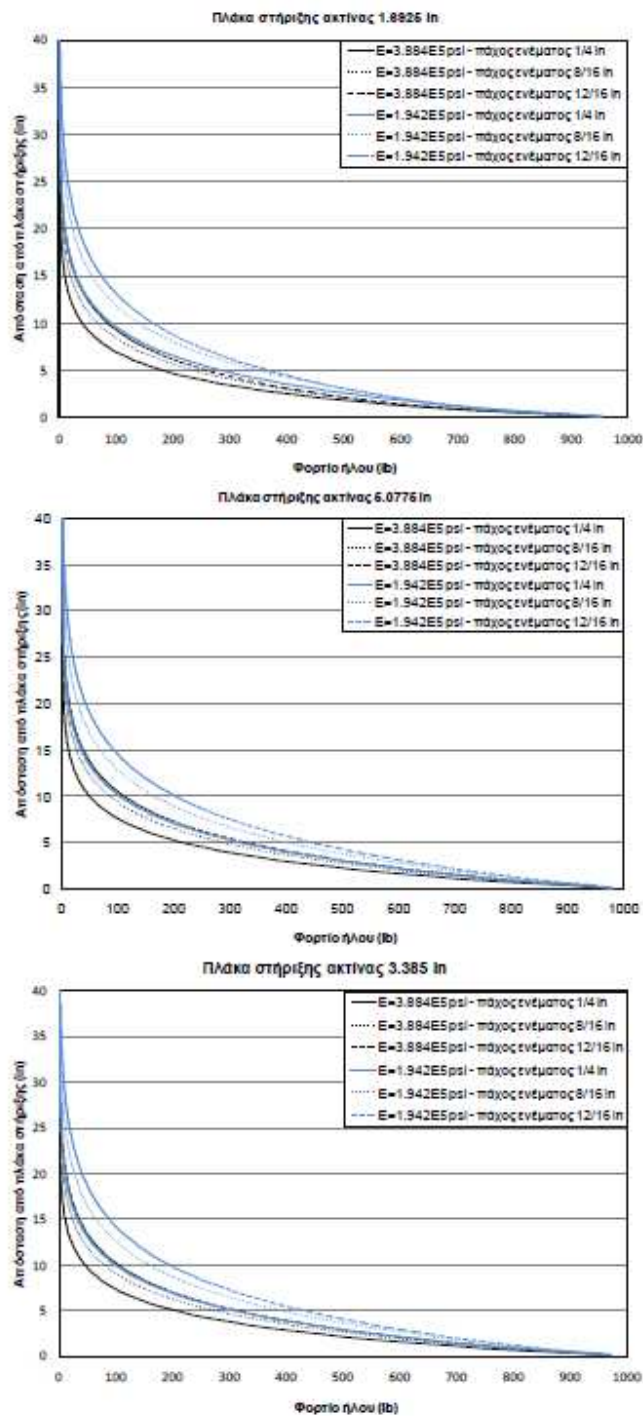
και η ακτίνα της πλάκας στήριξης είναι:

- 1.6925 in
- 3.385 in
- 5.0775 in

και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

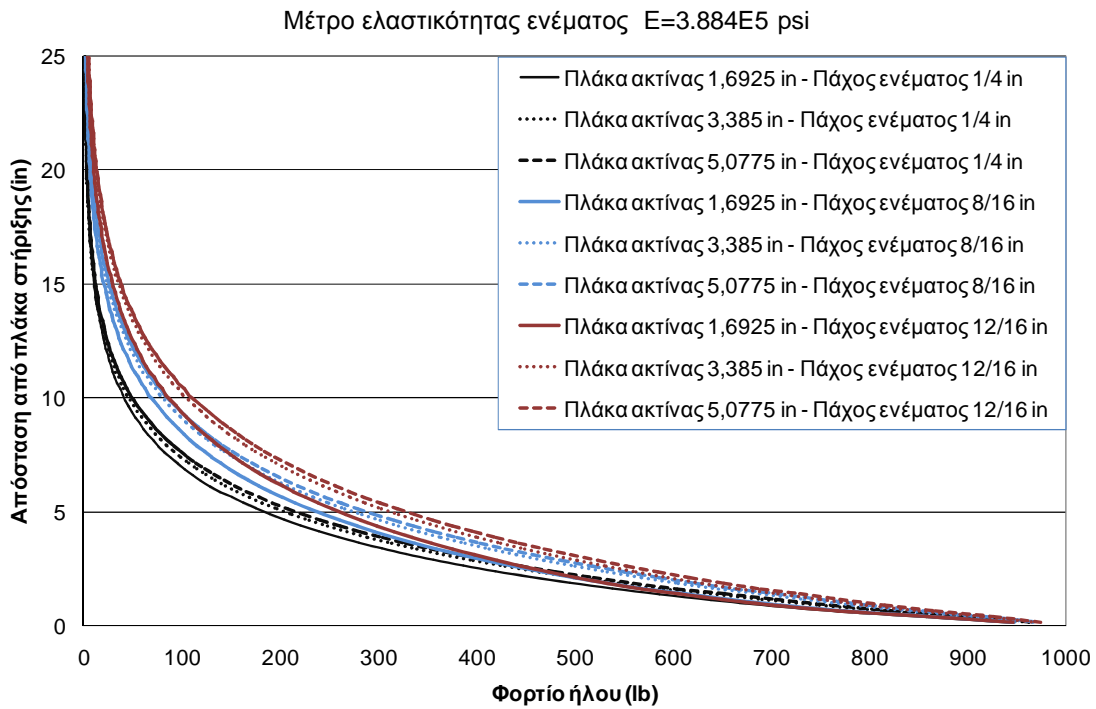
Παρατηρείται λοιπόν, πως και για τις τρεις πλάκες στήριξης όταν αυξάνεται το πάχος του ενέματος, το φορτίο που μεταφέρεται στο ίδιο βάθος στον ήλο είναι μεγαλύτερο.

Επίσης, φαίνεται η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας και παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις που το ένεμα έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας το φορτίο που μεταφέρεται στο ίδιο μήκος του ήλου είναι μεγαλύτερο. Εν τούτοις, ακόμη και για την χαμηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος, σε απόσταση 35 in το φορτίο που μεταφέρεται είναι αμελητέο.



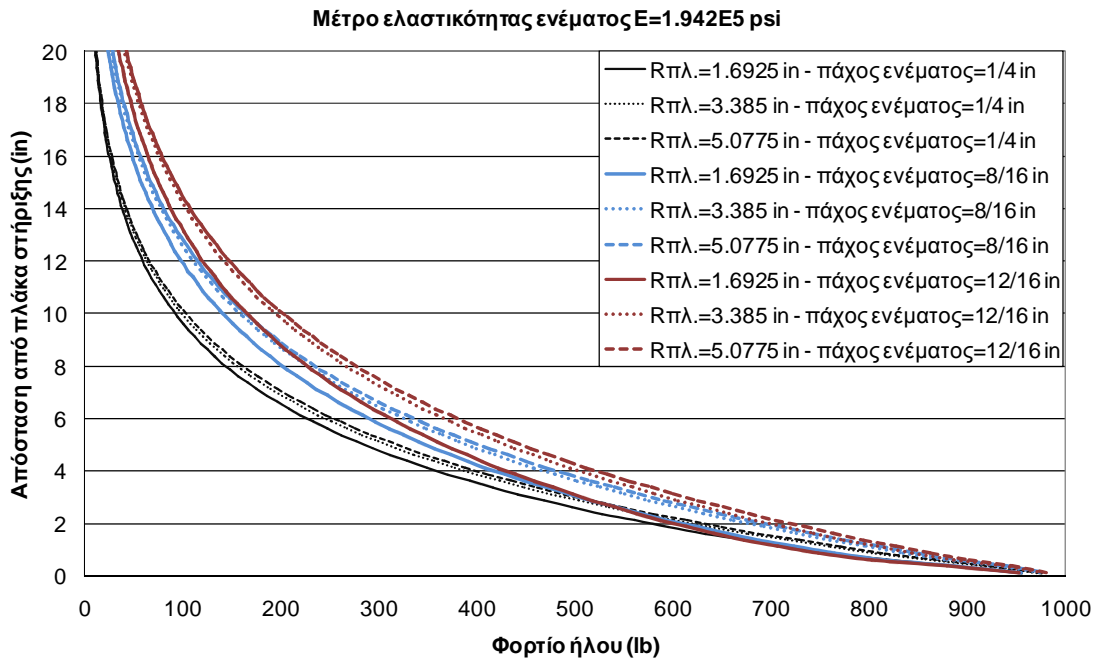
Σχήμα 77 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου για διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας και διαφορετικά πάχη ενέματος.

➤  $E= 3.884E5$  psi



Σχήμα 78 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου όταν το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος είναι  $3.884E5$  psi.

➤  $E= 1.942E5$  psi



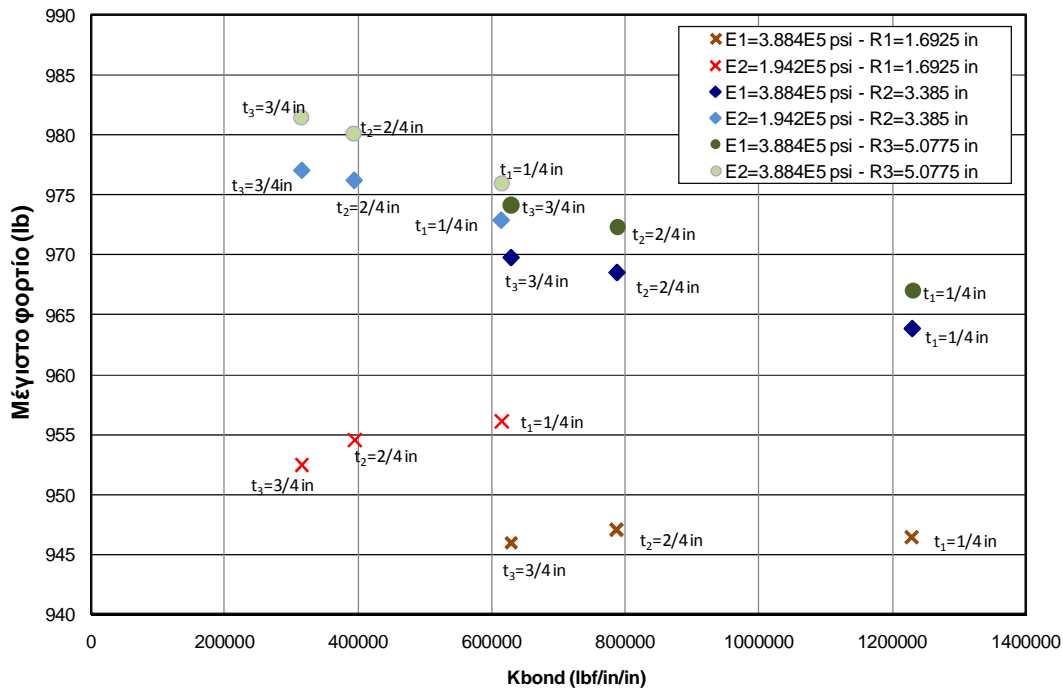
Σχήμα 79 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου όταν το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος είναι  $1.942E5$  psi.

Στην συνέχεια, στο διάγραμμα του σχήματος 80 φαίνεται η συσχέτιση της μέγιστης τιμής του αξονικού φορτίου με την διατμητική δυστροπία (shear stiffness) του ενέματος (kbond) για τα διάφορα πάχη ενέματος ( $t_1=1/4$  in,  $t_2=8/16$  in,  $t_3=12/16$  in), όταν το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος είναι  $E_1=3.884E5$  psi και  $E_2=1.942E5$  psi ( $E_2=\frac{1}{2}E_1$ ). Η πλάκα στήριξης έχει ακτίνα  $R_1=1.6925$ in,  $R_2=3.385$  in και  $R_3=5.0775$ in.

Η τιμή της διατμητικής δυστροπίας προκύπτει από τον τύπο:

$$K_{\text{bond}} = \frac{2\pi G}{\ln(1+2t/D)},$$

όπου  $G$  το μέτρο διάτμησης του ενέματος,  $t$  το πάχος του ενέματος και  $D$  η διάμετρος του ήλου.



Σχήμα 80 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – kbond για τις δύο τιμές μέτρου ελαστικότητας του ενέματος και για ακτίνα πλάκας στήριξης ίση με  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$ .

Παρατηρείται πως για πλάκες στήριξης με ακτίνα 3.385 in και 5.0075 in καθώς αυξάνεται το πάχος του ενέματος, η τιμή της διατμητικής δυστροπίας μειώνεται και ταυτόχρονα αυξάνεται η τιμή του μέγιστου αξονικού φορτίου. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου η πλάκα έχει ακτίνα 1.6925 in το φορτίο μειώνεται διότι η πλάκα βρίσκεται πολύ κοντά στην διεπιφάνεια ενέματος – ήλου με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση δυνάμεων και η συνάφεια χάνεται γρήγορα και η ανάληψη φορτίων να είναι μικρότερη.

### 4.3 Σύγκριση μοντέλου «cable» του FLAC<sup>2D</sup> σε plane strain με αξονοσυμμετρικό μοντέλο.

#### 4.3.1 Μοντέλο cable του FLAC

Η πιο κοινή μέθοδος για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των ήλων είναι η διεξαγωγή μίας δοκιμής εξόλκευσης. Στην εφαρμογή του FLAC με τίτλο «Simulation of Pull-Tests for Grouted Cable Anchors» το ένεμα θεωρείται πως συμπεριφέρεται ελαστικά, τέλεια πλαστικά χωρίς απώλεια αντοχής μετά την αστοχία.

#### Κατασκευή μοντέλου

Αρχικά, θεωρείται πως δεν υπάρχει επίδραση στην συνάφεια από τις περιμετρικές τάσεις και πως ο ήλος δεν διαρρέει. Σε αυτή την περίπτωση ο ήλος που εξετάζεται έχει διάμετρο 15.2mm και η αναλογία νερού/τσιμέντου είναι 1/3. Το μήκος του ήλου είναι 0.6m και τα 0.5m βρίσκονται εντός ενέματος. Το μέτρο ελαστικότητας του ήλου είναι 98.6 GPa. Το ένεμα έχει δύναμη συνοχής  $s_{bond}=1.75e5$  N/m και διατμητική δυστροπία  $k_{bond}=1.12e7$  N/m/m.

Η τιμή της διατμητικής δυστροπίας (shear stiffness) προκύπτει από τον τύπο:

$$K_{bond} = \frac{2\pi G}{\ln(1+2t/D)}$$

όπου G το μέτρο διάτμησης του ενέματος, t το πάχος του ενέματος και D η διάμετρος του ήλου.

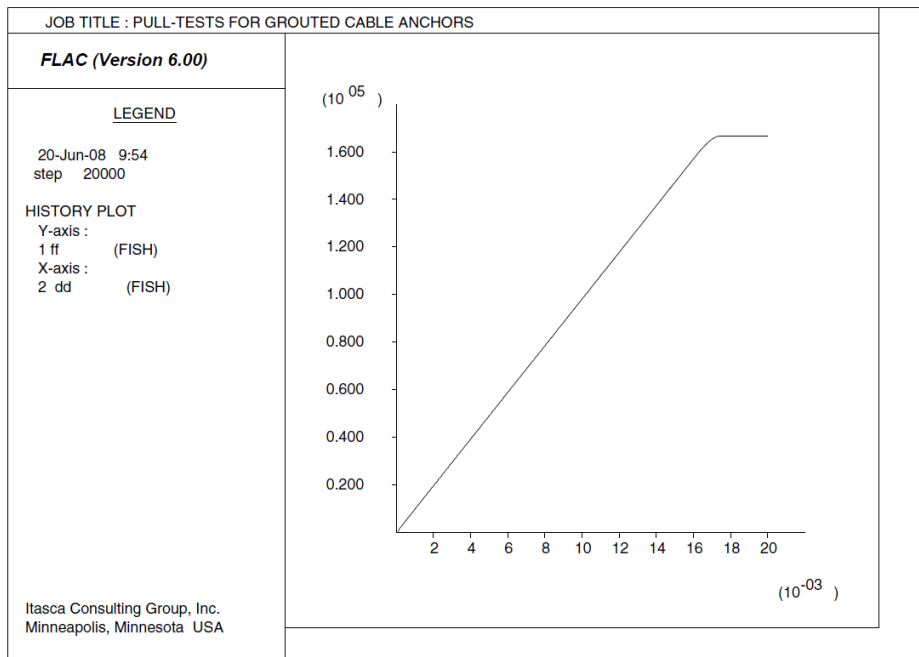
Η δύναμη συνοχής προκύπτει από τον τύπο:

$$S_{bond} = \pi(D + 2t)\tau_{peak}$$

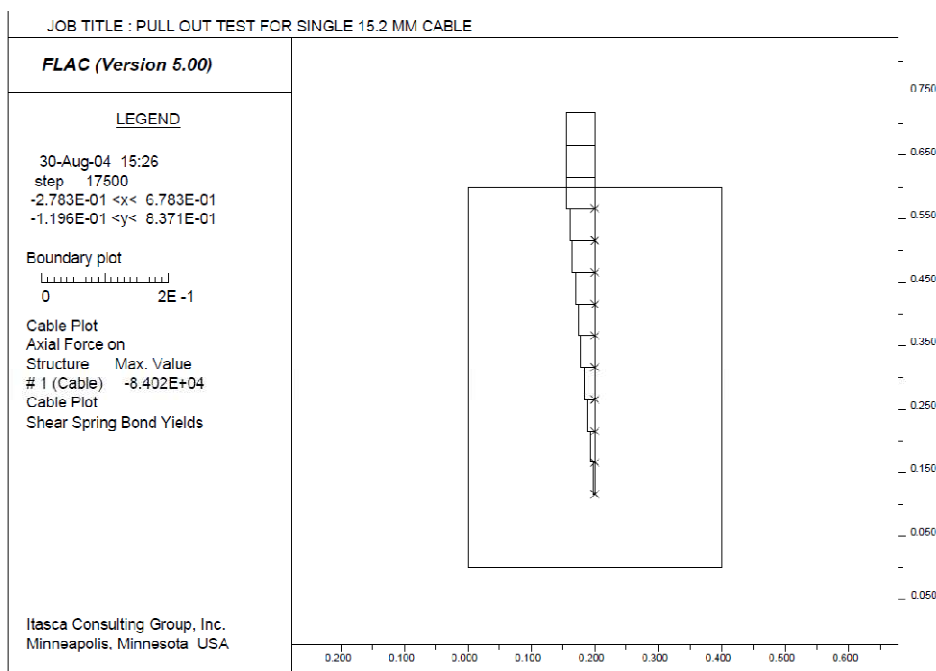
$$\text{και } \tau_{peak} = \tau_l Q_B$$

όπου  $\tau_l$  είναι κατά προσέγγιση το εν δεύτερον της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του ασθενέστερου εκ των δύο (πετρώματος – ενέματος) και  $Q_B$  είναι η ποιότητα της συνάφειας του ενέματος με το πέτρωμα. Στην περίπτωση αυτή το  $Q_B$  είναι ίσο με την μονάδα, δηλαδή υπάρχει τέλεια συνάφεια.

Στο σχήμα 81 που ακολουθεί, φαίνεται η δύναμη σε N/m σε σχέση με την μετατόπιση του ήλου σε m και παρατηρείται μία γραμμική σχέση έως τα 17.5 mm μετατόπιση. Έπειτα, στο σχήμα 82, φαίνεται πως όταν η παραμόρφωση του ήλου φτάσει τα 17.5 mm χάνεται η συνάφεια του ενέματος με τον ήλο καθ' όλο το μήκος του ήλου.



Σχήμα 81 Διάγραμμα δύναμης/m – μετατόπισης.

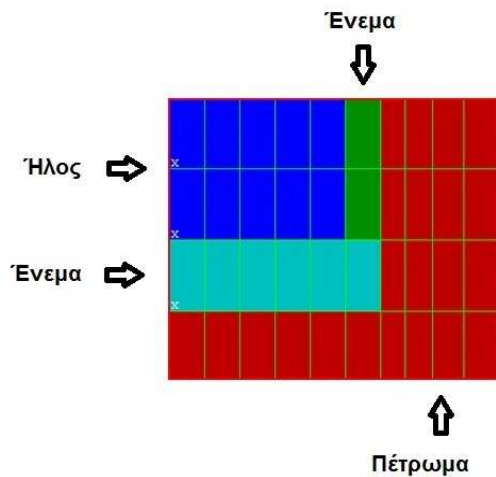


Σχήμα 82 Συνάφεια ήλου - ενέματος στην μετατόπιση 17.5mm

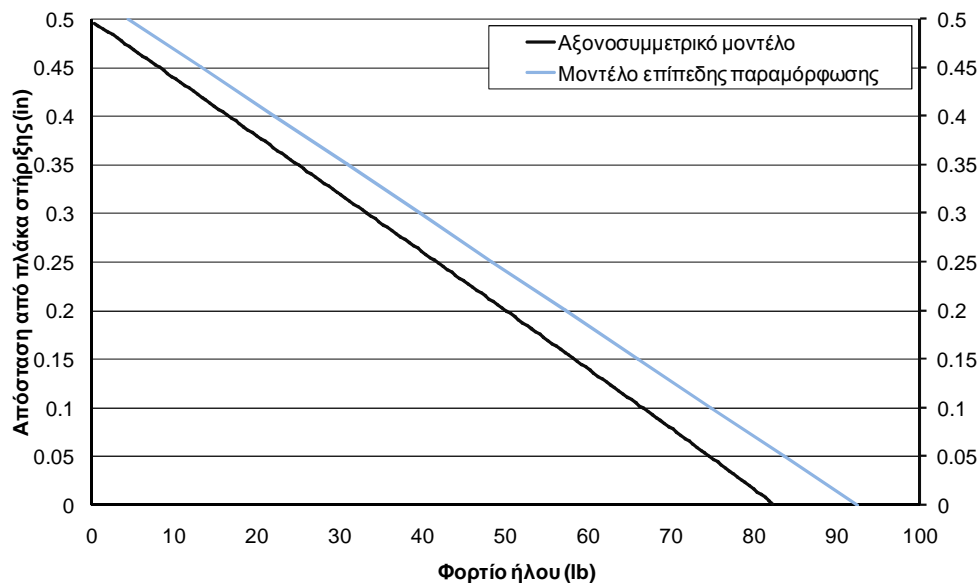


### 4.3.2 Αξονοσυμμετρικό μοντέλο.

Στην συνέχεια, το ίδιο ακριβώς παράδειγμα προσομοιώθηκε και σε αξονοσυμμετρικό μοντέλο στο FLAC<sup>2D</sup>. Μετά από δοκιμές το αξονοσυμμετρικό μοντέλο του οποίου τα αποτελέσματα πλησιάζουν αρκετά αυτά του προηγούμενου παραδείγματος είναι εκείνο στο οποίο το ένεμα είναι ελαστοπλαστικό με πάχος κατά μήκος του ήλου ίσο με 1.52mm. Ακόμη, το άκρο του ήλου εντός του διατρήματος είναι σε επαφή με ένεμα το οποίο έχει μήκος 3mm.



Σχήμα 83 Λεπτομέρεια καννάβου πεπερασμένων διαφορών στο βάθος του διατρήματος.

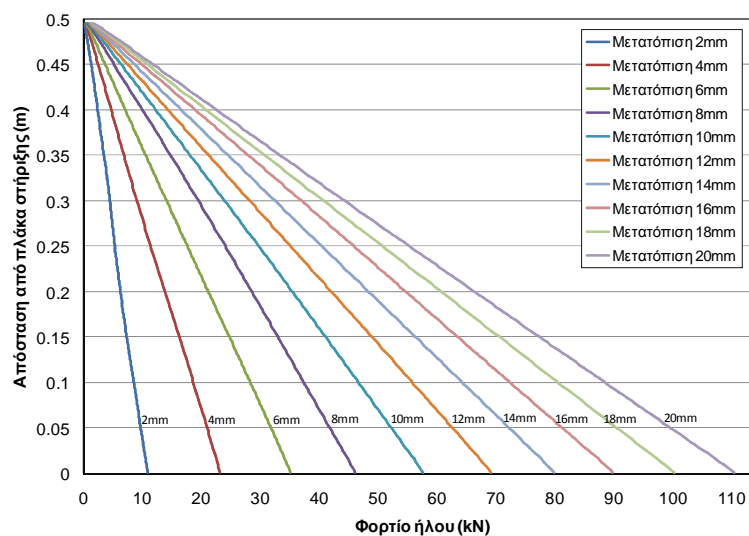


Σχήμα 84 Διάγραμμα σύγκρισης κατανομής αξονικού φορτίου στα δύο μοντέλα (plain strain-αξονοσυμμετρικό).

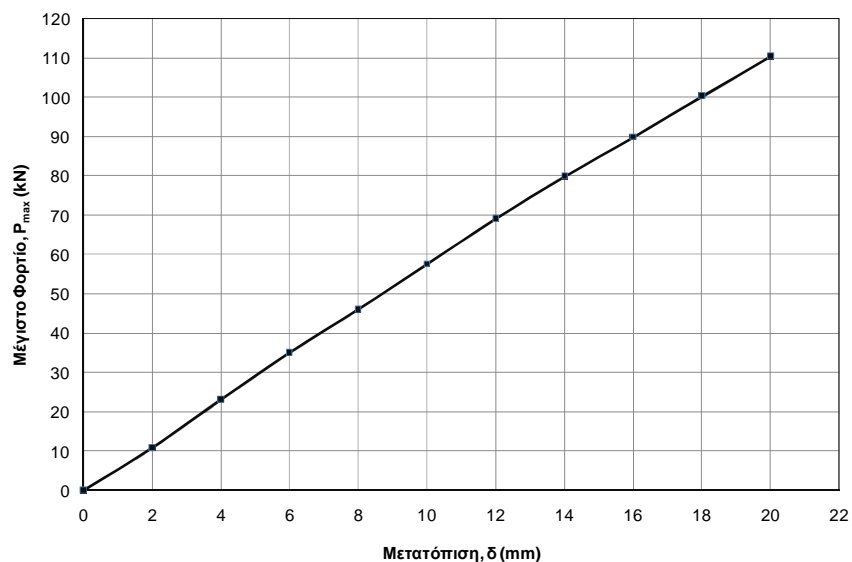
### 4.3.3 Αξονοσυμμετρικό Μοντέλο Εξόλκευσης

#### 4.3.3.1 Πέτρωμα ελαστικό και ένεμα ελαστικό

Στο μοντέλο αυτό, το ένεμα θεωρήθηκε ελαστικό, το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ , ήταν ίσο με  $8.45E5$  Pa και το πάχος της ζώνης του ενέματος κατά μήκος του ήλου ήταν 1.52mm. Ο ήλος είχε μήκος 0.5 m, διάμετρο 15.2 mm. Η κατανομή της δύναμης στο βάθος του ήλου φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 85 και παρατηρείται πως είναι σχεδόν γραμμική.

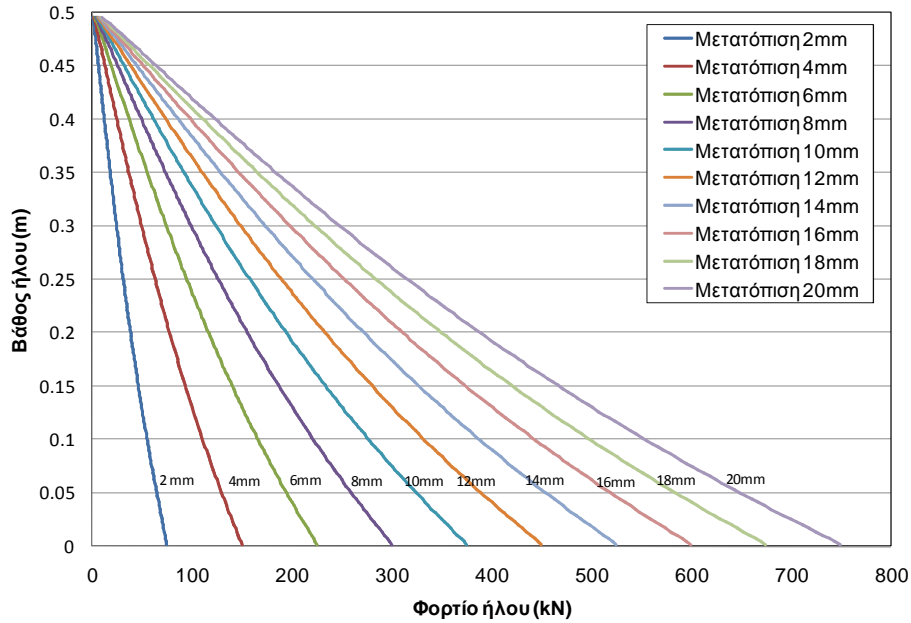


Σχήμα 85 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου.

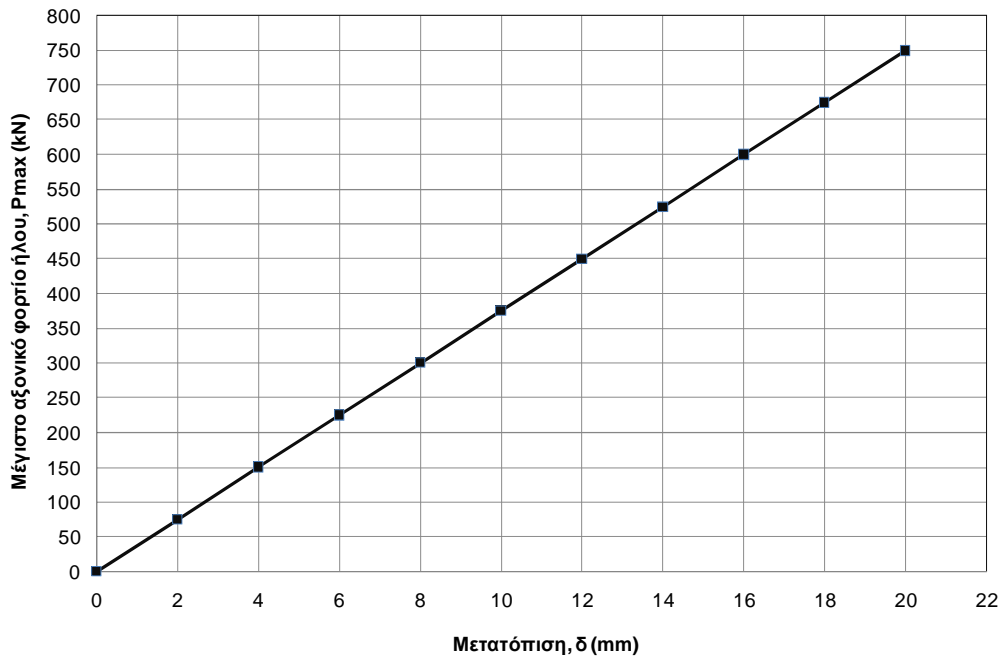


Σχήμα 86 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης (Pmax – δ).

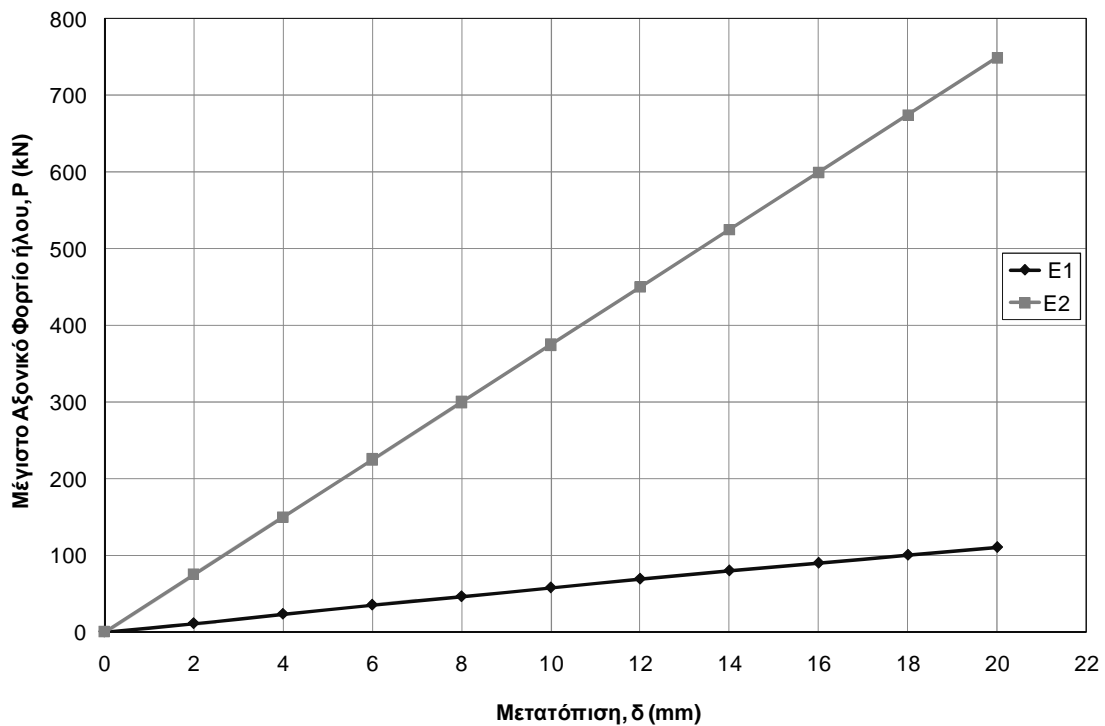
Στην συνέχεια το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$ , αυξήθηκε κατά μία τάξη μεγέθους και ήταν ίσο με  $8.45E6$  Pa. Η κατανομή της δύναμης στο βάθος του ήλου φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 87 και στο σχήμα 88 δίνεται το διάγραμμα κατανομής μέγιστου αξονικού φορτίου-μετατόπισης.



Σχήμα 87 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου.



Σχήμα 88 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ).



Σχήμα 89 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ) για τιμές μέτρου ελαστικότητας ενέματος E1 και E2.

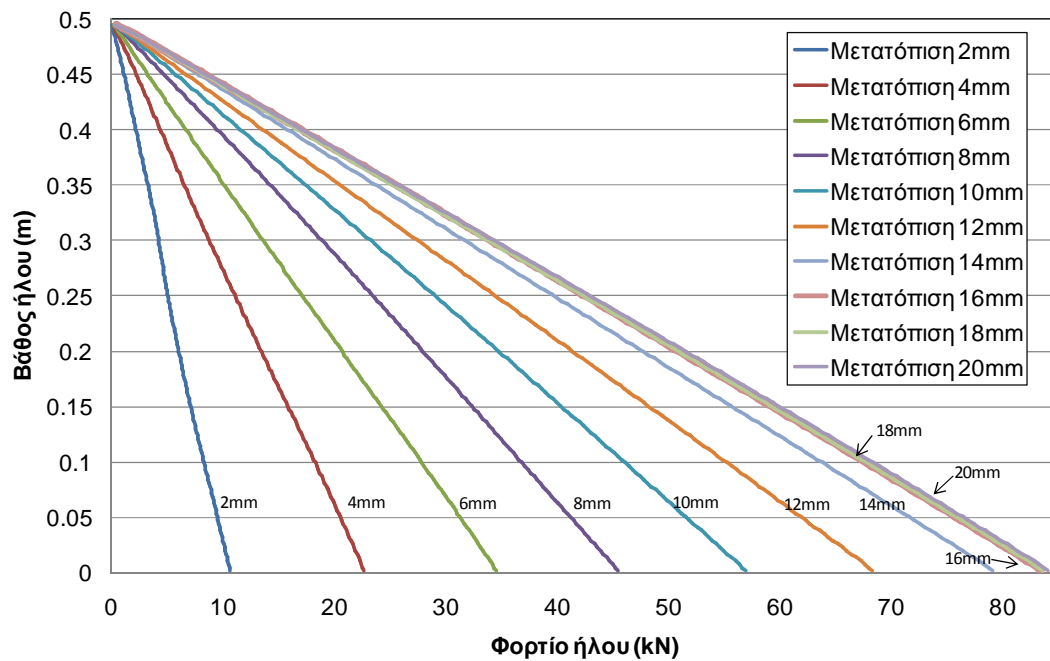
#### 4.3.3.2 Ελαστοπλαστικό μοντέλο

Στα επόμενα μοντέλα το ένεμα θεωρήθηκε πως έχει διαφορετική εφελκυστική αντοχή κατά μία τάξη μεγέθους, διαφορετική γωνία τριβής καθώς και διαφορετική συνοχή κατά μήκος του ήλου, σε σχέση με το ένεμα που βρίσκεται σε επαφή με το άκρο του ήλου εντός του διατρήματος.

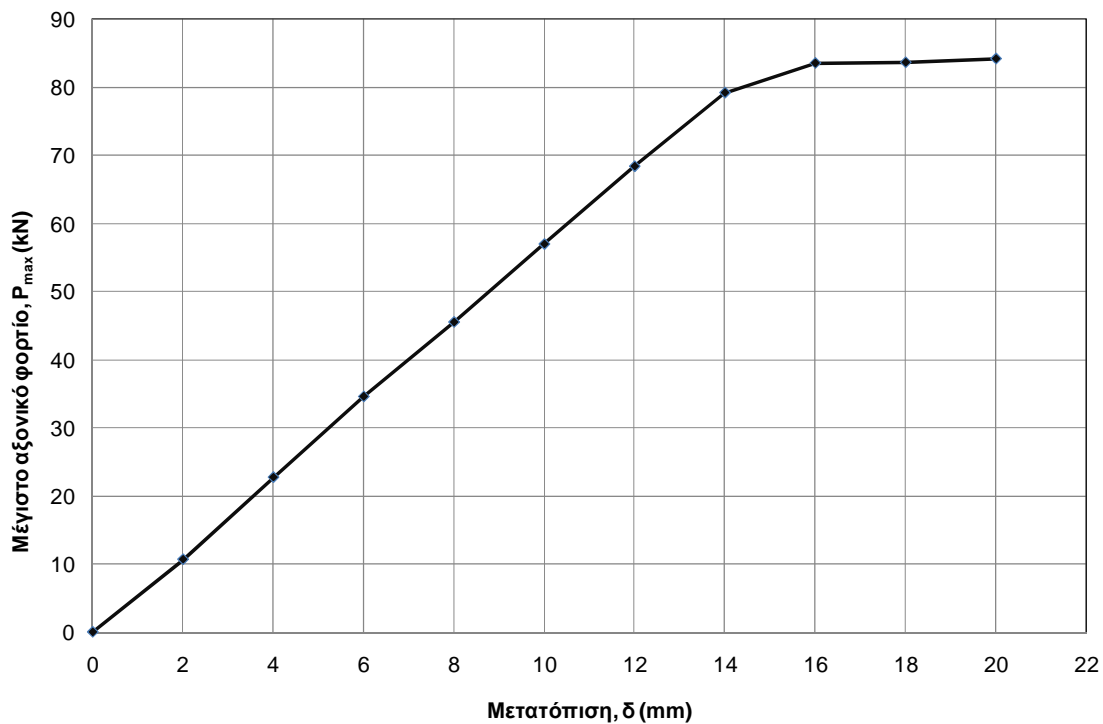
Για το ένεμα κατά μήκος του ήλου ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 6.108$  MPa,  $c=3.05$ MPa,  $\varphi=0^\circ$ .

Για το ένεμα στο βάθος του διατρήματος ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 0.6108$  MPa,  $c=1.763$  MPa,  $\varphi=30^\circ$  και η εφελκυστική αντοχή μειώνεται στο 10% της μέγιστης μετά την αστοχία.

Η κατανομή της δύναμης στο βάθος του ήλου φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 58 και παρατηρείται πως είναι γραμμική.

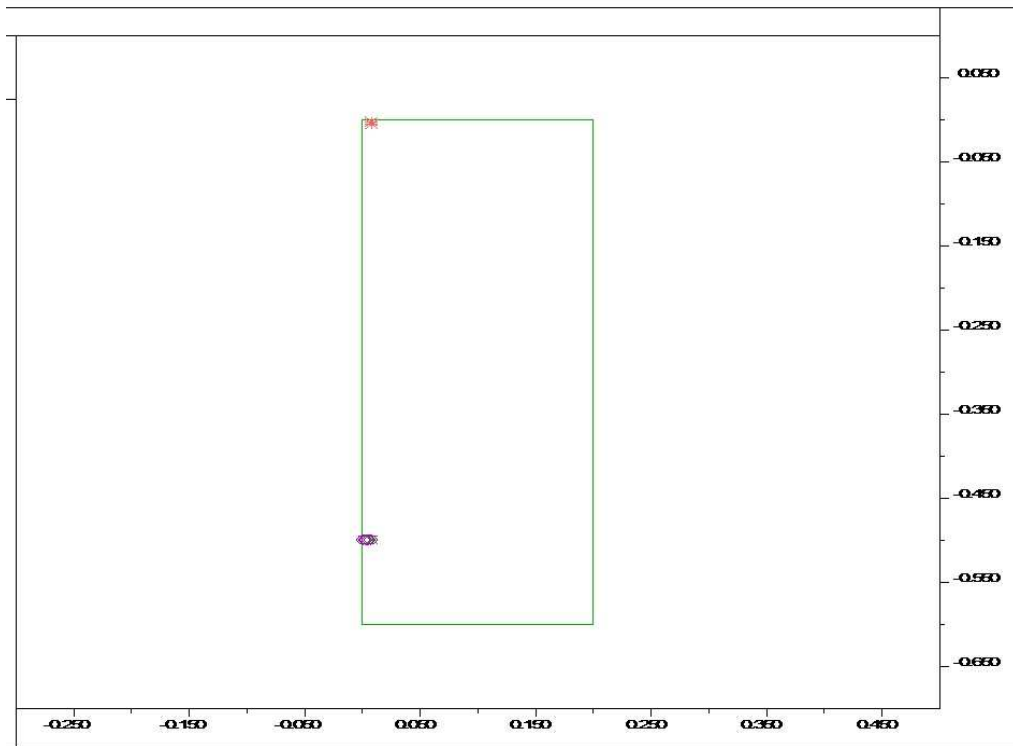


Σχήμα 90 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου.

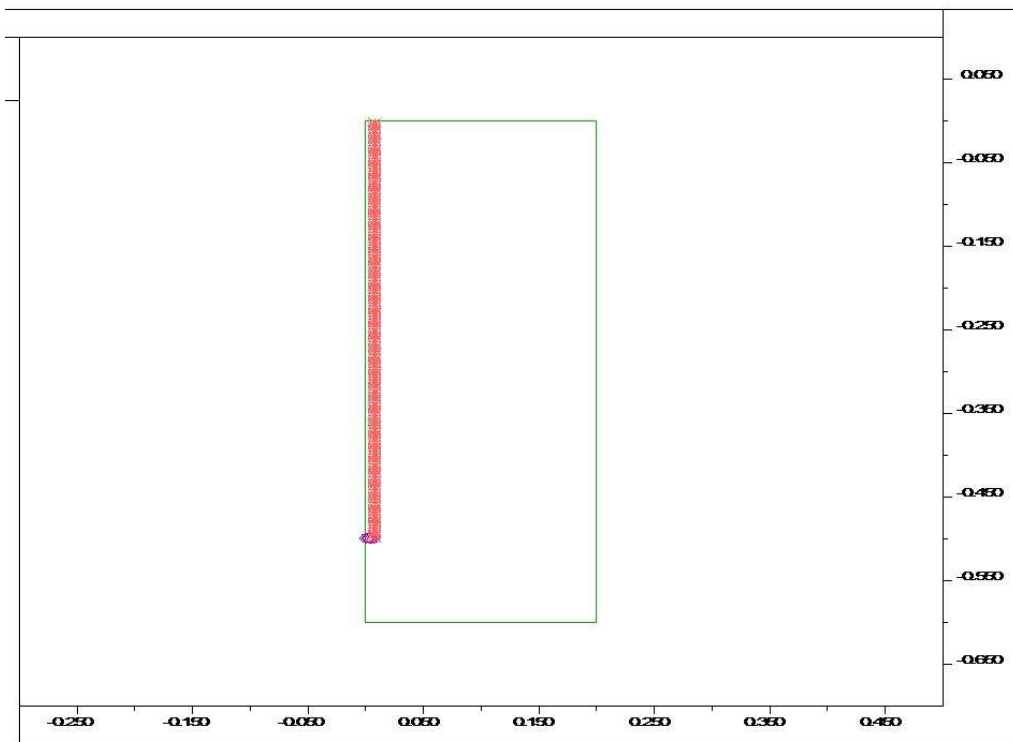


Σχήμα 91 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου-μετατόπισης (P<sub>max</sub> – δ).

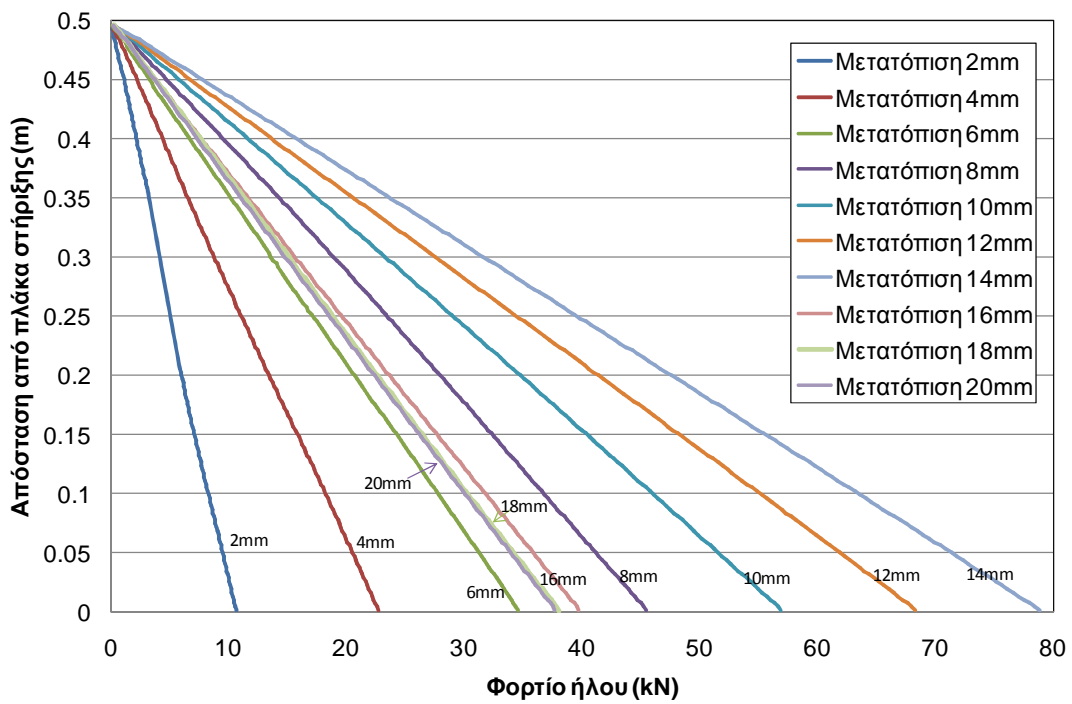
Στο επόμενο μοντέλο ισχύει ότι και στο προηγούμενο με την διαφορά πως η συνοχή του ενέματος μειώνεται κατά το ήμισυ μετά την αστοχία.



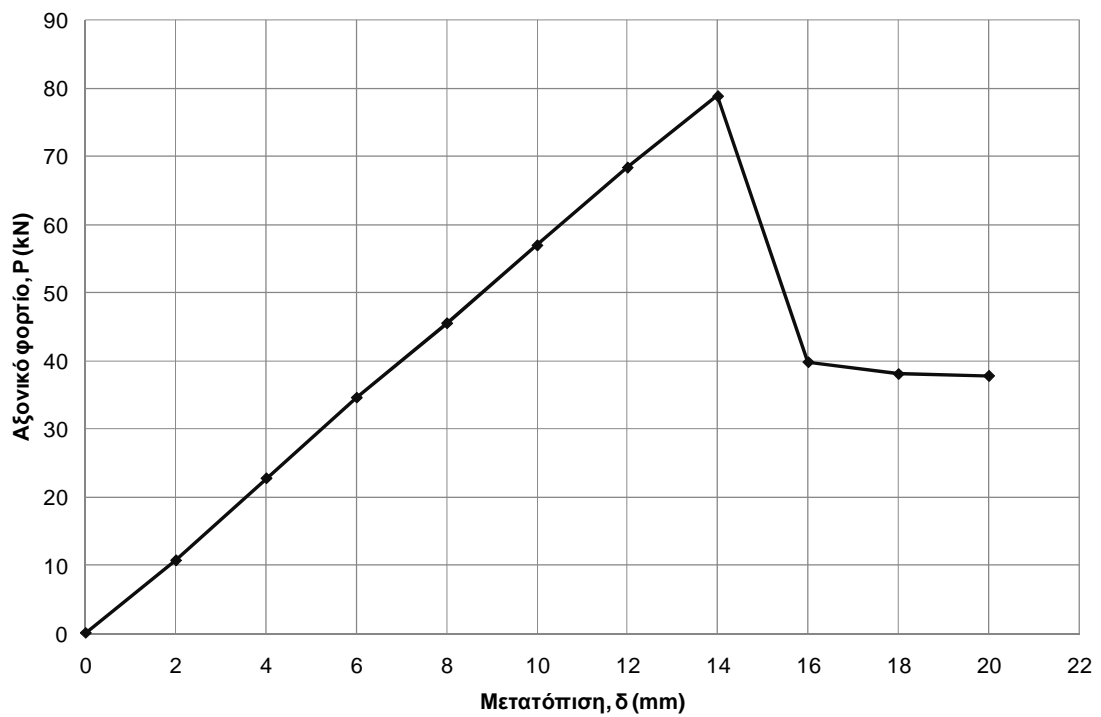
Σχήμα 92 Διαρροή ενέματος που ξεκινά από το άκρο του διατρήματος για μετατόπιση 14.3 mm.



Σχήμα 93 Διαρροή ενέματος που ξεκινά από το άκρο του διατρήματος για μετατόπιση των 20 mm.



Σχήμα 94 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου.



Σχήμα 95 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης (Pmax – δ).

Εν συνεχεία το ίδιο ακριβώς μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για ήλο 3m και 5m.

#### **4.3.3.2.1 Ήλος 3m.**

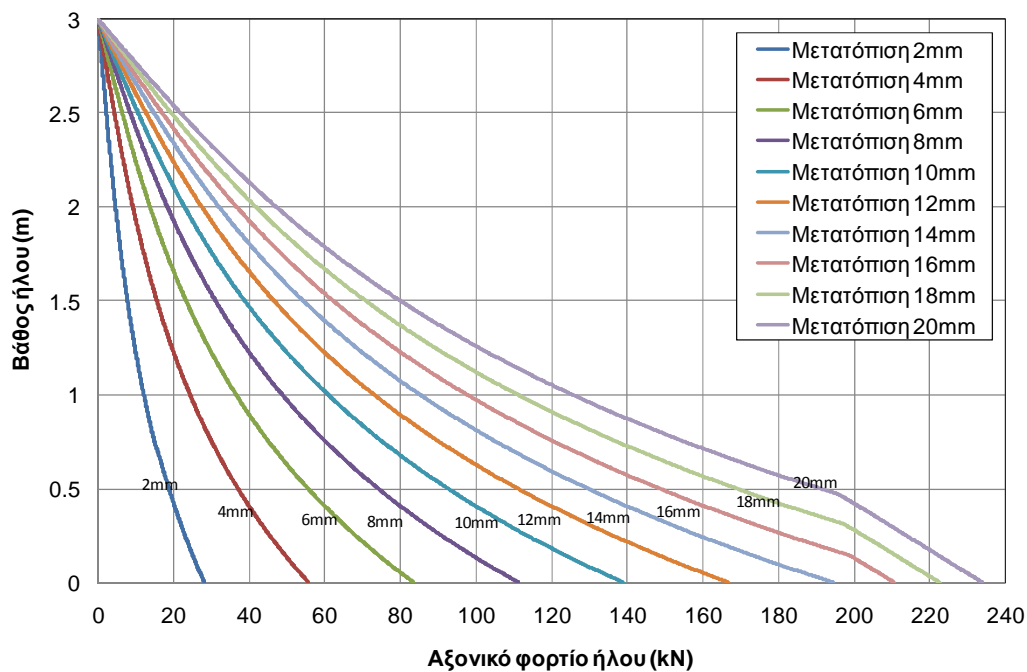
Για το ένεμα κατά μήκος του ήλου ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 6.108$  MPa,  $c=3.05$ MPa,  $\varphi=0^\circ$ . Μετά την αστοχία η συνοχή μειώνεται στο ήμισυ της αρχικής,  $c_t=1.525$  MPa ενώ η εφελκυστική αντοχή παραμένει σταθερή.

Για το ένεμα στο βάθος του διατρήματος ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 0.6108$  MPa,  $c=1.763$  MPa,  $\varphi=30^\circ$ . Η συνοχή μετά την αστοχία στο ήμισυ της αρχικής,  $c_t=0.8815$  MPa και η εφελκυστική αντοχή μειώνεται στο 10% της μέγιστης μετά την αστοχία.

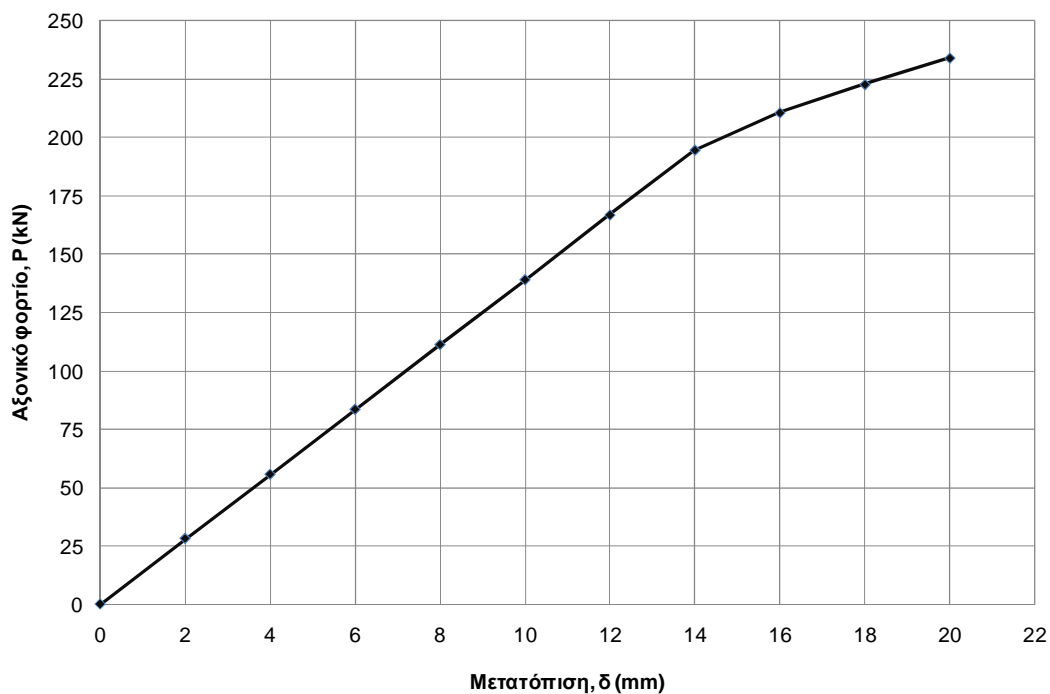
Η κατανομή της δύναμης στο βάθος του ήλου φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 96 και παρατηρείται πως είναι εκθετική.

Το ένεμα στην μετατόπιση των 20 mm διαρρέει έως τα 47.5cm κάτι που φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 98 και στο σχήμα 99.

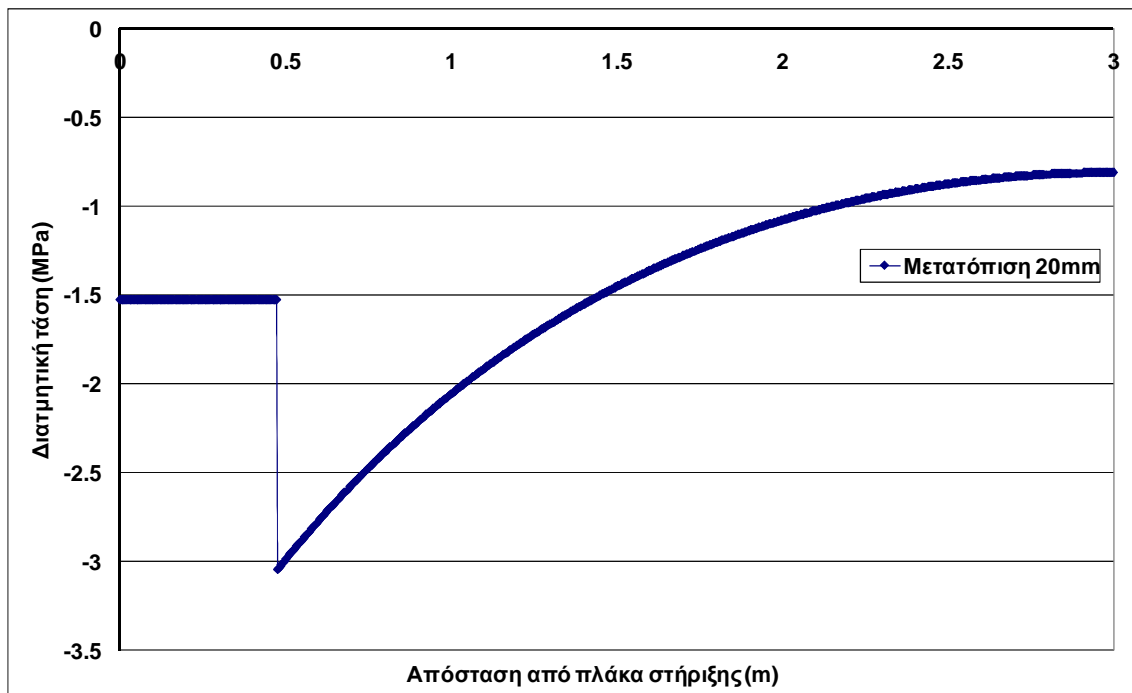




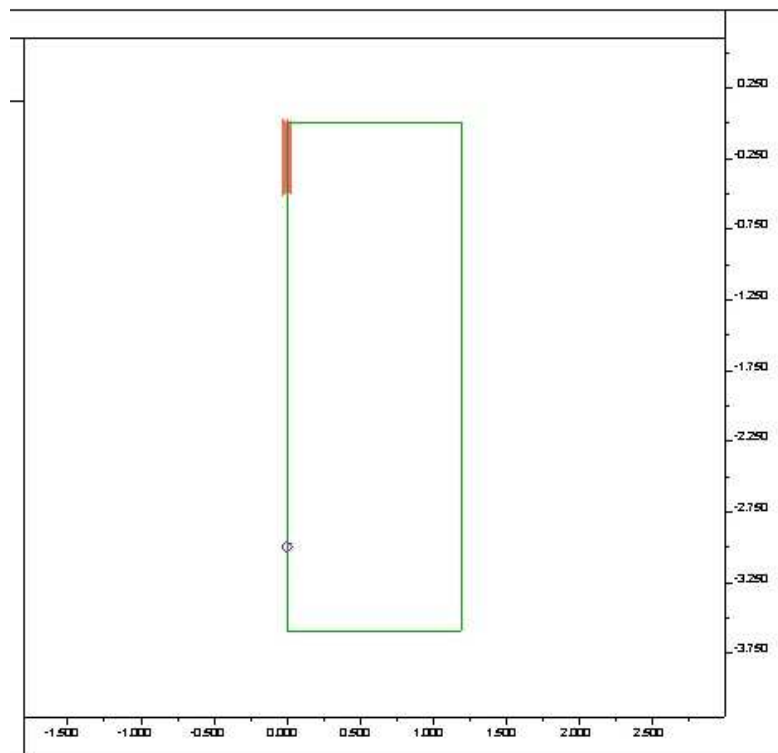
Σχήμα 96 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου (ήλος μήκους 3 m).



Σχήμα 97 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ) (ήλος μήκους 3 m).

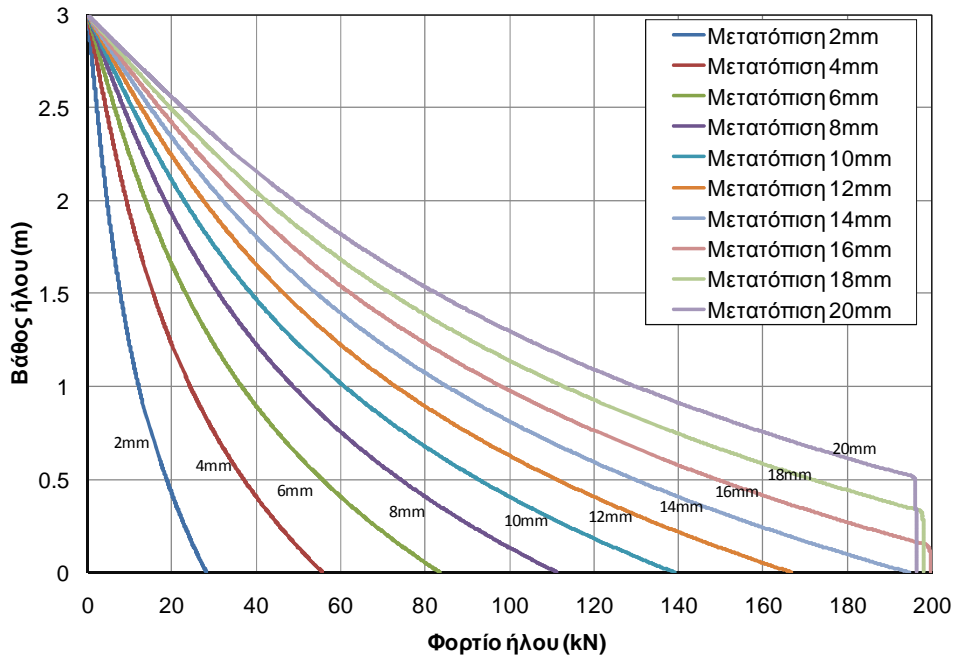


Σχήμα 98 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την μετατόπιση των 20mm.

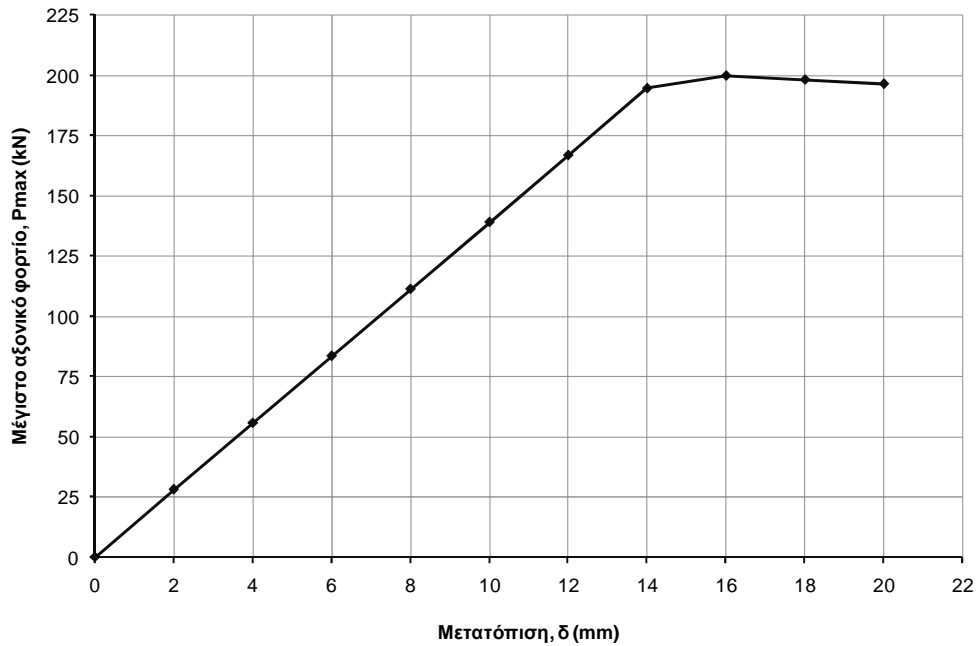


Σχήμα 99 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 3 m - Διαρροή ενέματος.

Στην συνέχεια για τον ήλο των 3m εξετάσθηκε η περίπτωση όπου η παραμένουσα συνοχή του ενέματος κατά μήκος του ήλου μηδενίζεται μετά την αστοχία. Η κατανομή της αξονικού φορτίου στο βάθος του ήλου φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 100 και παρατηρείται πως είναι εκθετική.

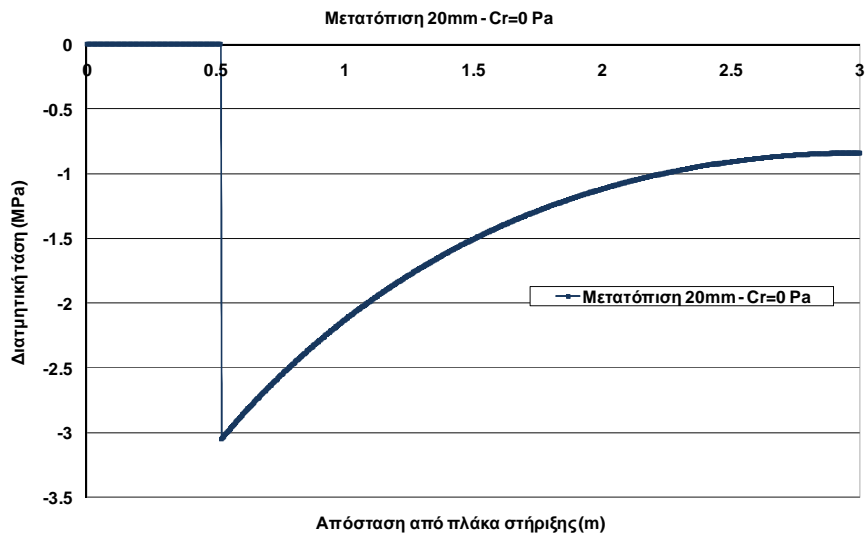


Σχήμα 100 Διάγραμμα κατανομής αξονικού φορτίου στον ήλο μήκους 3m με  $C_r=0Pa$ .

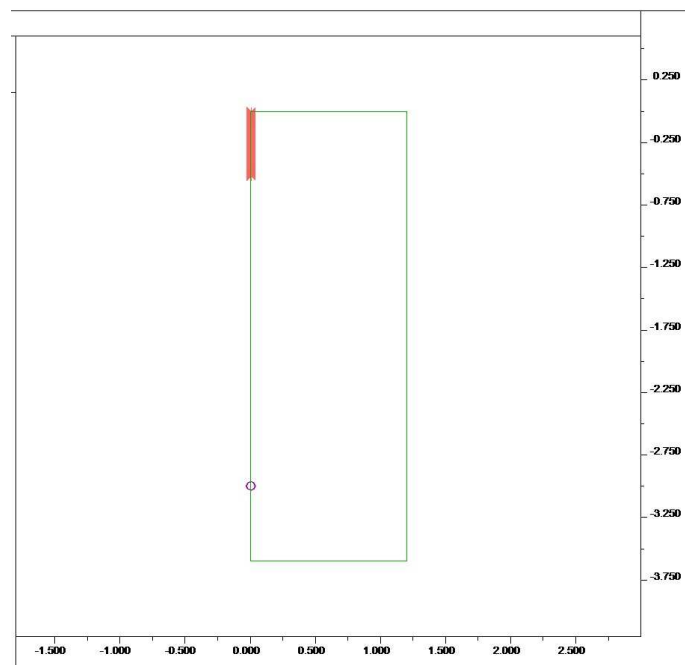


Σχήμα 101 Διάγραμμα μέγιστου αξονικού φορτίου – μετατόπισης ( $P_{max} - \delta$ ).

Επίσης, παρατηρείται πως το φορτίο που μεταφέρεται στον ήλο είναι μικρότερο όταν η παραμένουσα συνοχή του ενέματος μηδενίζεται, και το μήκος του ενέματος που διαρρέει είναι μεγαλύτερο (52cm). Η διαρροή του ενέματος ξεκινά στην μετατόπιση των 16mm και είναι ίση με 15.4cm επεκτείνεται στην μετατόπιση των 18mm και γίνεται 33.4cm και στην μετατόπιση των 20mm φτάνει στα 52cm.



Σχήμα 102 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την μετατόπιση των 20 mm.



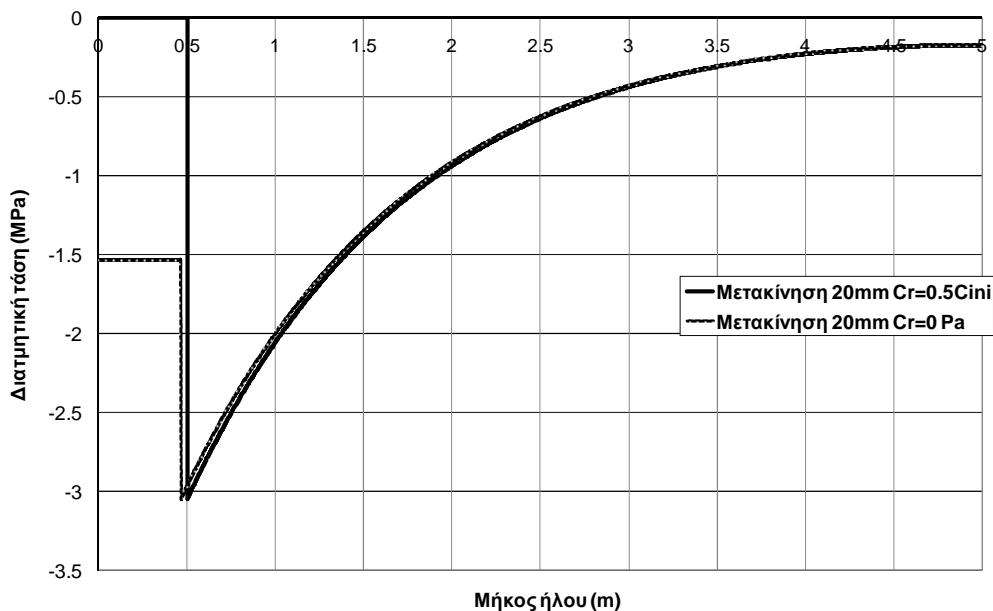
Σχήμα 103 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 3 m – Διαρροή ενέματος.

#### 4.3.3.2 Ήλος 5m.

Έπειτα εξετάστηκε ήλος μήκους 5m όπου η παραμένουσα συνοχή του ενέματος είναι ίση με το 50% της αρχικής και η περίπτωση όπου η παραμένουσα συνοχή του ενέματος κατά μήκος του ήλου μηδενίζεται. Στην πρώτη περίπτωση το ένεμα διαρρέει έως τα 46 cm ενώ στην δεύτερη έως τα 50 cm (Σχήματα 104 και 105).

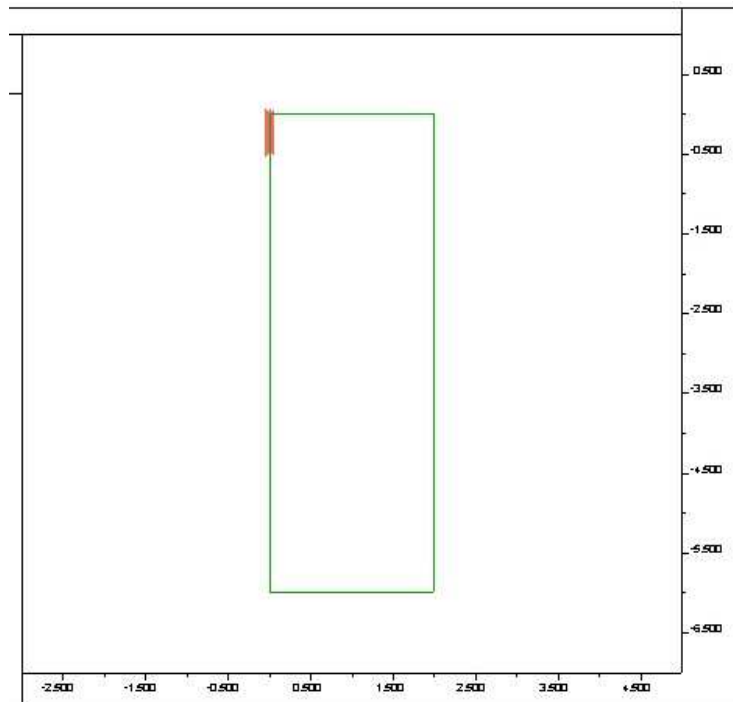
Έπειτα εξετάστηκε ήλος μήκους 5m όπου για το ένεμα κατά μήκος του ήλου ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 6.108$  MPa,  $c=3.05$ MPa,  $\varphi=0^\circ$ . Μετά την αστοχία η συνοχή μειώνεται στο ήμισυ της αρχικής,  $c_t=1.525$  MPa ενώ η εφελκυστική αντοχή παραμένει σταθερή. Για το ένεμα στο βάθος του διατρήματος ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 0.6108$  MPa,  $c=1.763$  MPa,  $\varphi=30^\circ$ . Η συνοχή μετά την αστοχία στο ήμισυ της αρχικής,  $c_t=0.8815$  MPa και η εφελκυστική αντοχή μειώνεται στο 10% της μέγιστης μετά την αστοχία.

Ύστερα, εξετάστηκε ήλος μήκους 5m όπου για το ένεμα κατά μήκος του ήλου ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 6.108$  MPa,  $c=3.05$ MPa,  $\varphi=0^\circ$ . Μετά την αστοχία η συνοχή μηδενίζεται,  $c_t=0.0$  MPa ενώ η εφελκυστική αντοχή παραμένει σταθερή. Για το ένεμα στο βάθος του διατρήματος ισχύει:  $E=0.00845$  GPa,  $\sigma_t = 0.6108$  MPa,  $c=1.763$  MPa,  $\varphi=30^\circ$ . Η συνοχή μετά την αστοχία στο ήμισυ της αρχικής,  $c_t=0.8815$  MPa και η εφελκυστική αντοχή μειώνεται στο 10% της μέγιστης μετά την αστοχία.

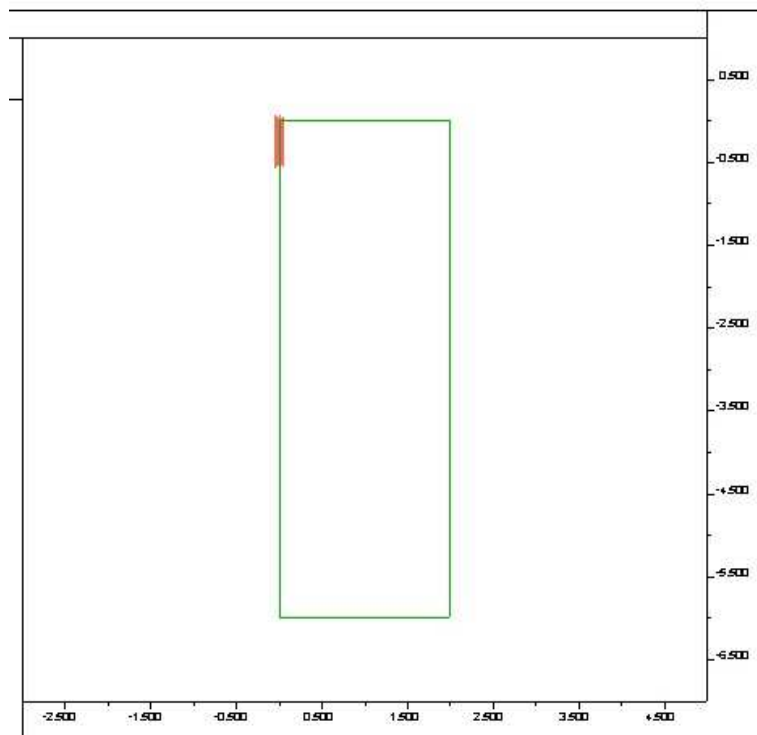


Σχήμα 104 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την παραμόρφωση των 20mm σε ήλο μήκους 5m.

Παρατηρείται στο διάγραμμα του σχήματος 104 πως και στους δύο ήλους η τιμή της παραμένουσας συνοχής δεν επηρεάζει την μορφή της κατανομής της διατμητικής τάσης.



Σχήμα 105 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 5 m – Διαρροή ενέματος –  $Cr=0.5C$ .



Σχήμα 106 Απεικόνιση μοντέλου για ήλο 3 m – Διαρροή ενέματος -  $Cr=0$ .

#### 4.3.3.3 Εξολκεύσεις σε ελαστοπλαστικό αφόρτιστο πέτρωμα

Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν 33 μοντέλα. Στα μοντέλα αυτά ο ήλος έχει μήκος 3m, διάμετρο 25mm και θεωρείται ελαστικός. Το ένεμα έχει πάχος 11.5 mm προσομοιώνεται με τρεις ζώνες εκ των οποίων οι δύο ζώνες πλησίον του ήλου είναι ελαστικές και η ζώνη πλησίον του πετρώματος είναι ελαστοπλαστική. Το πέτρωμα είχε GSI ίσο με 50. Η πλάκα στήριξης προσομοιώνεται δεσμεύοντας την κατακόρυφη κίνηση των κόμβων που αντιστοιχούν σε ακτίνα 10 cm (Σχήμα 107). Η προσομοίωση της εξόλκευσης έγινε με εφαρμογή τάσεως σε τρία στάδια στην ζώνη που αντιπροσωπεύει τον ήλο. Οι τάσεις ήταν στο πρώτο στάδιο 100 MPa, στο δεύτερο 250 MPa και στο τρίτο 500 MPa. Έγιναν έξι παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες εξετάσθηκε:

- η επίδραση της παραμένουσας συνοχής του ενέματος,
- η επίδραση της γωνίας τριβής του ενέματος,
- η επίδραση της συνοχής του ενέματος,
- η επίδραση της παραμέτρου  $m_i$  του πετρώματος και
- η επίδραση της τιμής του GSI του πετρώματος.

Στις παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν το ένεμα είχε τις ιδιότητες που αντιστοιχούν σε αναλογία νερού/τσιμέντου (w/c) 0.32, 0.41 και 0.52.

Ιδιότητες ενέματος (Hoek, 2007):

Αναλογία w/c	$\sigma_c$ MPa	Γωνία τριβής $\phi_b$ (°)	Συνοχή c MPa	Μέτρο ελαστικότητας, E GPa	Λόγος Poisson, $\nu$
<b>0.32</b>	78	24	25	16	0.2
<b>0.41</b>	54	20	19	12	0.2
<b>0.52</b>	38	17	14	10	0.2

Ιδιότητες πετρώματος:

GSI	$m_i$	$\sigma_{ci}$ MPa	$E_i$ GPa	$m_b$	s	a	Erm	Ποκνότητα	Λόγος Poisson, $\nu$
50	10	50	55	1.667	0.0039	0.506	16895.22E6	2700	0.25
65	10	50	55	2.865	0.0205	0.502	37744.57E6	2700	0.25
35	10	50	55	0.981	0.0007	0.516	6.237.39E6	2700	0.3

Πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω έξι παραμετρικές αναλύσεις:

1	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\phi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	50	10	0.32	0°	$\phi_b$	0.1c
			0.41			c
			0.52			0

2	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\phi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	50	10	0.32	0°	0°	0.1c
			0.41		$\phi_b$	
			0.52		2 $\phi_b$	

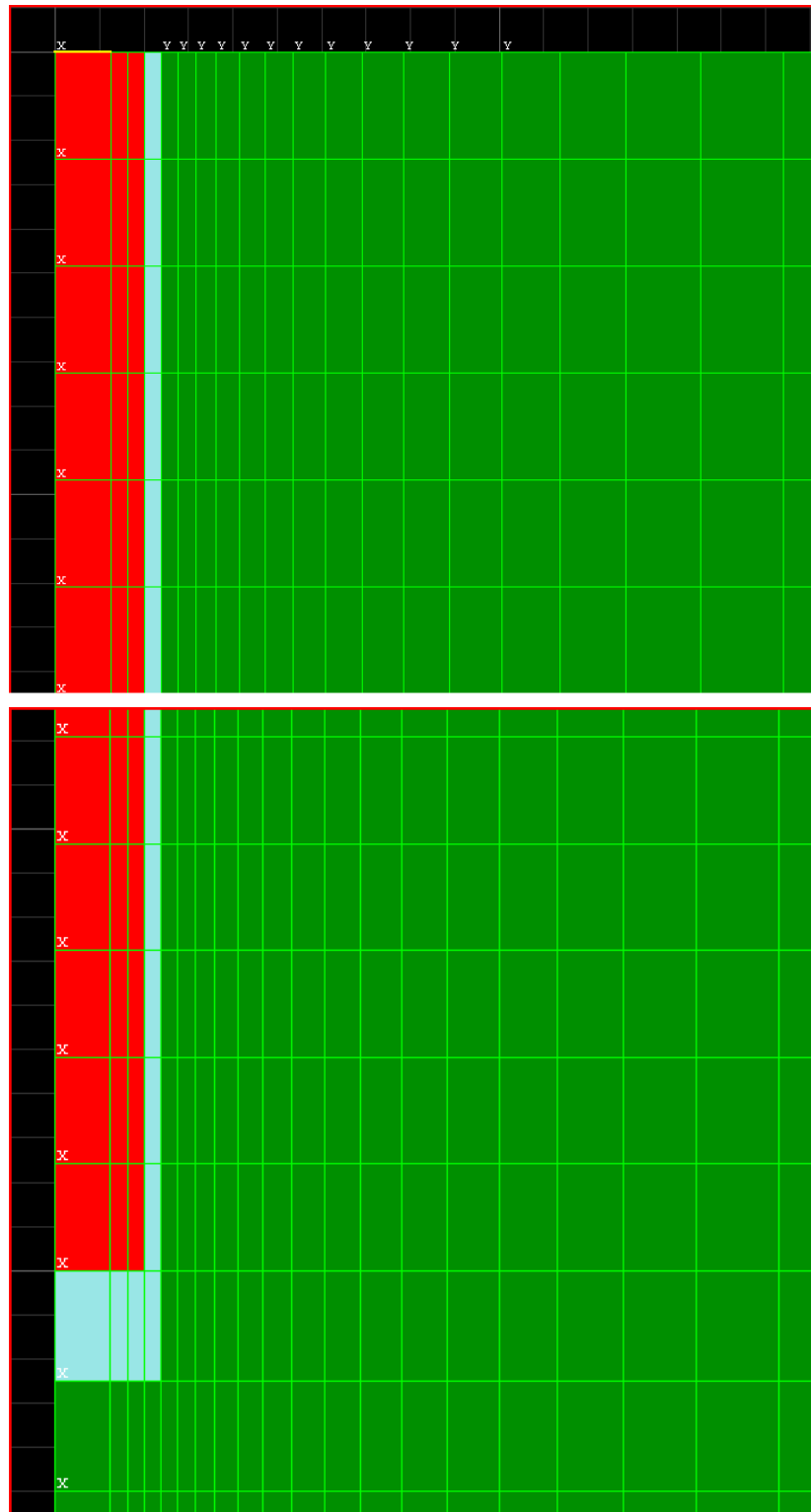


3	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\varphi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa	Συνοχή c MPa
	50	10	0.32	0°	$\varphi_b$	0.1c	$\pm 30\% c$
			0.41				
			0.52				

4	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\varphi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	50	5	0.32	0°	$\varphi_b$	0.1c
		10	0.41			
		20	0.52			

5	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\varphi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	35	10	0.32	0°	$\varphi_b$	0.1c
	50		0.41			c
	65		0.52			0

Στο σχήμα 107, που ακολουθεί, φαίνεται ο ήλος (1<sup>η</sup> ζώνη - κόκκινο χρώμα). Οι επόμενες δύο ζώνες αντιστοιχούν στο ελαστικό ένεμα και η 3<sup>η</sup> ζώνη στο ελαστοπλαστικό ένεμα (γαλάζιο χρώμα). Οι υπόλοιπες ζώνες αντιστοιχούν στο πέτρωμα (πράσινο χρώμα).



Σχήμα 107 Απεικόνιση των μοντέλων στο FLAC2D.

## 1<sup>η</sup> Παραμετρική ανάλυση

1	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\phi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	50	10	0.32	0°	$\phi_b$	0.1c
			0.41			c
			0.52			0

Μελετήθηκε η επίδραση στην κατανομή φορτίου και διατμητικών τάσεων όταν μεταβάλλεται η παραμένουσα συνοχή του ενέματος.

Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση όπου η παραμένουσα συνοχή του ενέματος μειώνεται έως το 10% της αρχικής τιμής ( $c_r=0.1c$ ).

- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 18 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 79 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 22 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 79 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 40 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 94 cm σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.

Στην συνέχεια εξετάστηκε η περίπτωση όπου η παραμένουσα συνοχή του ενέματος παραμένει σταθερή ( $c_r=c$ ).

- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 14 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 72 cm σε βάθος και έως 46 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 19 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 74 cm σε βάθος και έως 46 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 21 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 74 cm σε βάθος και έως 46 cm σε πλάτος.

Τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση όπου η παραμένουσα συνοχή του ενέματος μηδενίζεται ( $c_r=0$ ).

- $w/c=0.32$

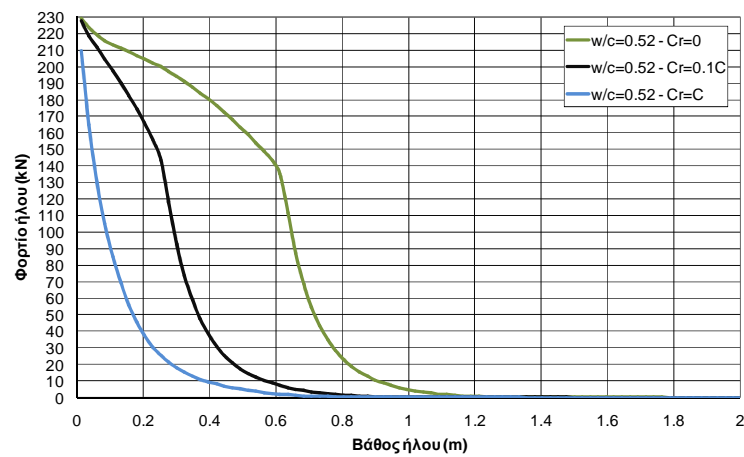
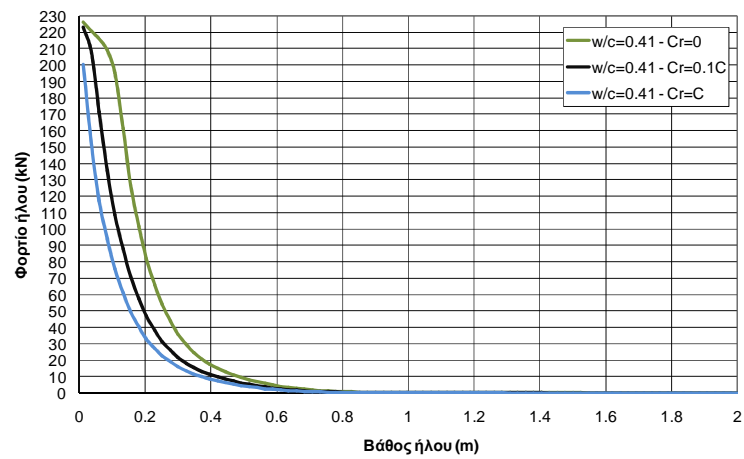
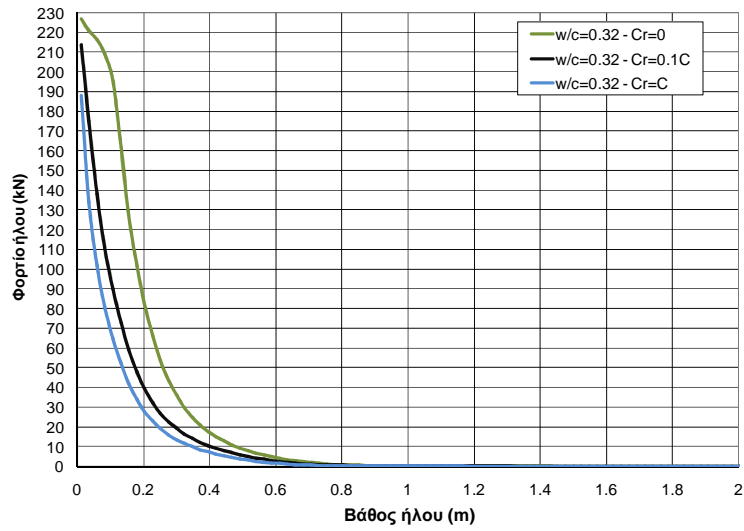
Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 19 cm, ενώ το πέτρωμα έως τα 79 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

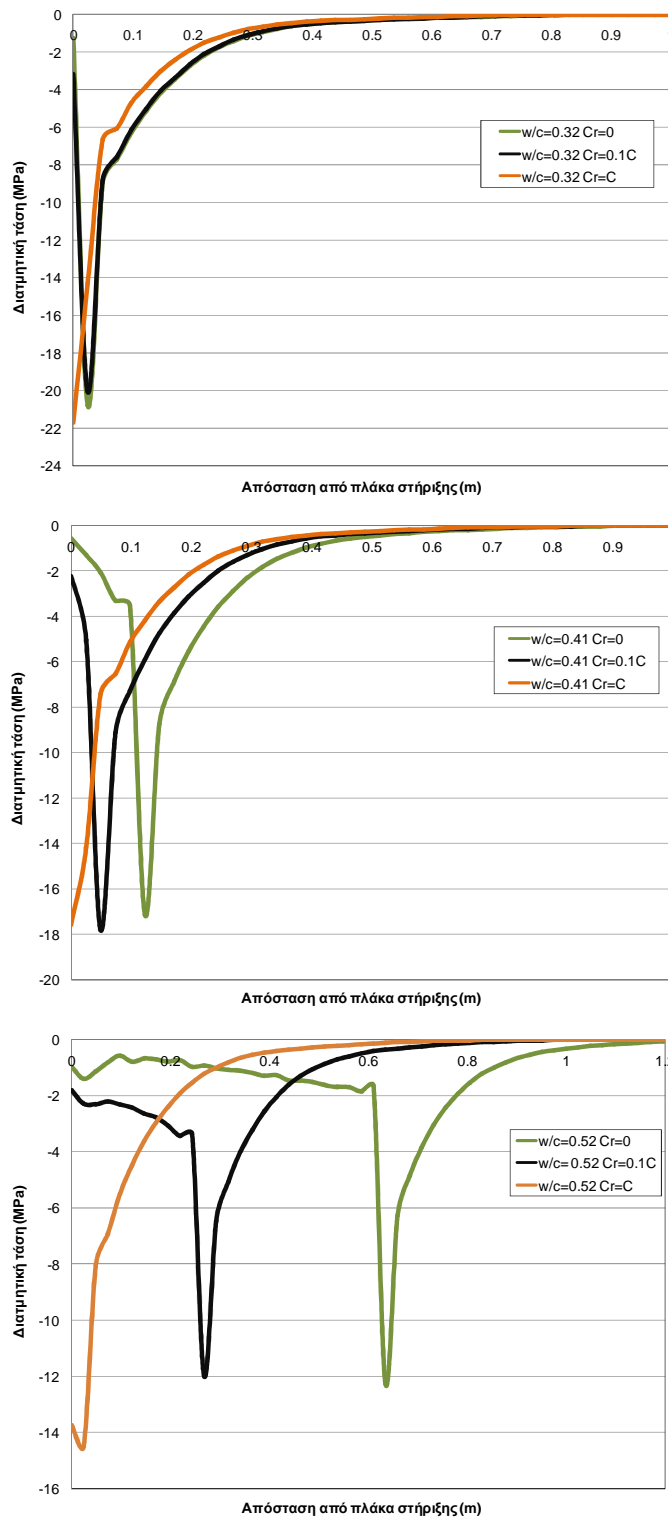
Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 28 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 86 cm σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.52$

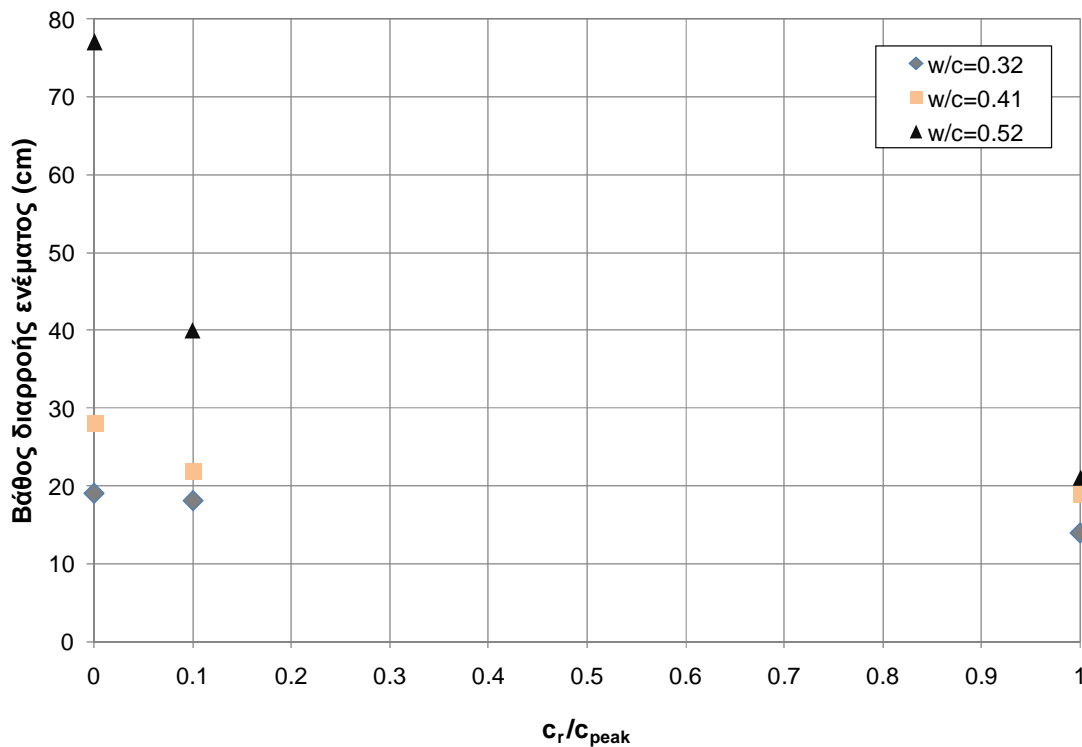
Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500 MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 77 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.25 m σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.



Σχήμα 108 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την επιβολή τάσεως ίση με 500 MPa για πέτρωμα με GSI 50, παραμένονσα συνοχή ενέματος  $Cr=0.1C$ ,  $Cr=C$ ,  $Cr=0$  και  $w/c=0.32$ ,  $w/c=0.41$ ,  $w/c=0.52$ .



Σχήμα 109 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την επιβολή τάσεως 500 MPa σε πέτρωμα με GSI=50 και για παραμένονσα συνοχή ενέματος Cr=0.1C, Cr=C, Cr=0 (νερό/τσιμέντο = 0.32, 0.41 και 0.52).



Σχήμα 110 Βάθος διαρροής ενέματος σε συσχέτιση με τον λόγο της παραμένουσας συνοχής προς την αρχική.

Όσον αφορά την επίδραση της παραμένουσας συνοχής του ενέματος διαπιστώθηκε ότι για την ίδια ποιότητα ενέματος η μείωση της (παραμένουσας συνοχής), οδηγεί σε αύξηση του μέγιστου αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου καθώς και σε αύξηση του βάθους μέχρι το οποίο μεταβιβάζονται δυνάμεις. Η συμπεριφορά αυτή γίνεται εντονότερη καθώς αυξάνεται ο λόγος νερού/τσιμέντου ( $w/c$ ).

Επίσης, με την αύξηση του λόγου  $w/c$  η μέγιστη διατμητική τάση στο ένεμα μειώνεται και το βάθος εμφάνισης της αυξάνεται. Στο σχήμα 110, παρατηρείται πως το βάθος διαρροής του ενέματος αυξάνεται όταν η παραμένουσα συνοχή μειώνεται και όταν ο λόγος  $w/c$  αυξάνεται.

## 2<sup>η</sup> Ανάλυση:

2	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\phi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	50	10	0.32	0°	0°	0.1C
			0.41		$\phi_b$	
			0.52		2 $\phi_b$	

Έπειτα για πέτρωμα με GSI=50 και  $m_i=10$  εξετάστηκε η επιρροή του μηδενισμού της γωνίας τριβής του ενέματος και έχουμε:

- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 26 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 86 cm σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 45 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.0 m σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 80 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.25 m σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.

Έπειτα εξετάστηκε η επιρροή του διπλασιασμού της γωνίας τριβής του ενέματος και έχουμε:

- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 18 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 80 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

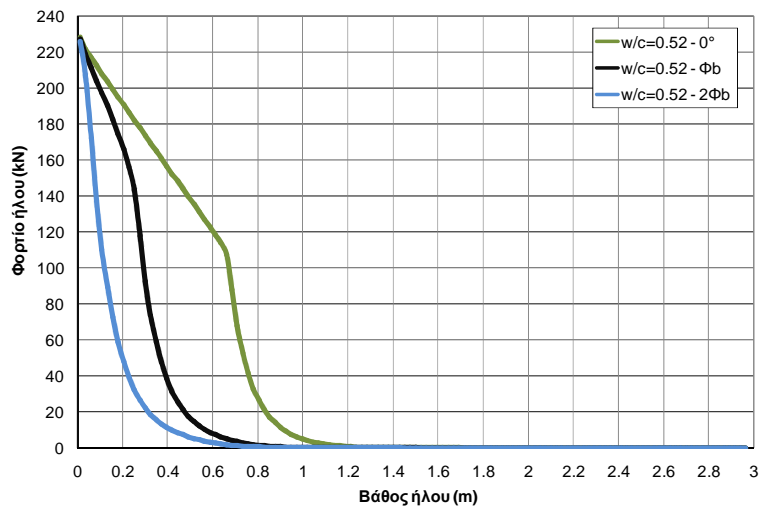
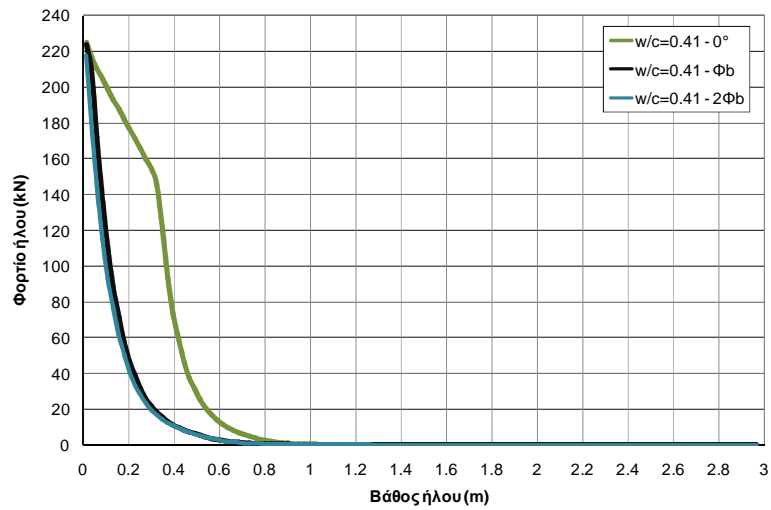
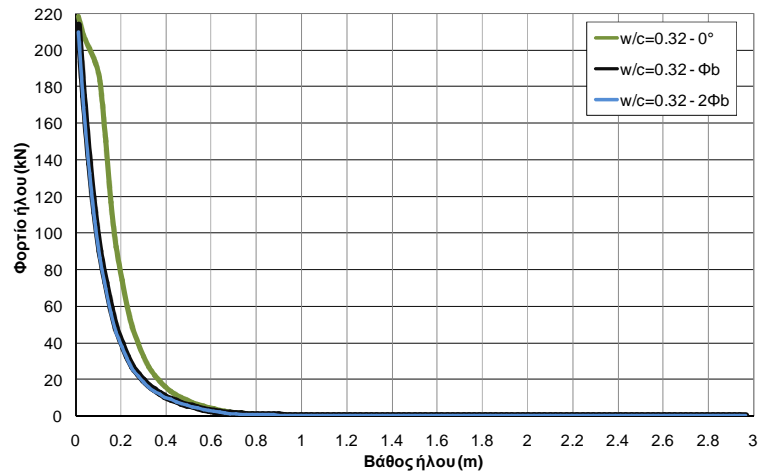


Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 21 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 80 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

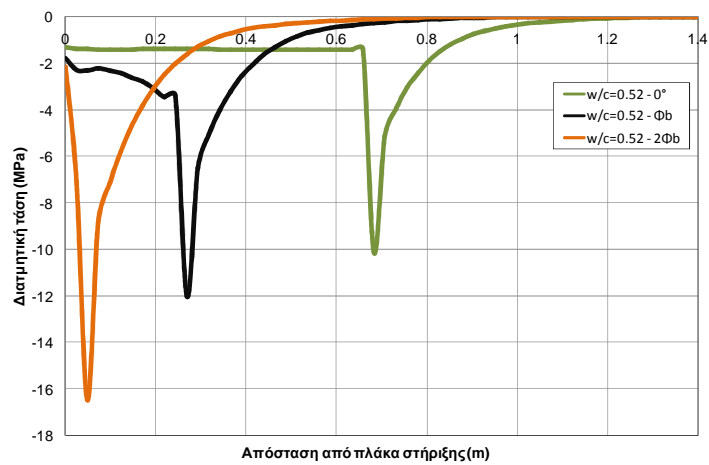
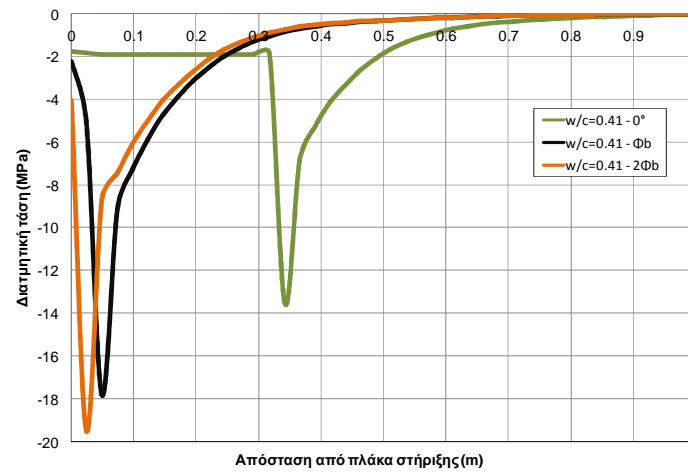
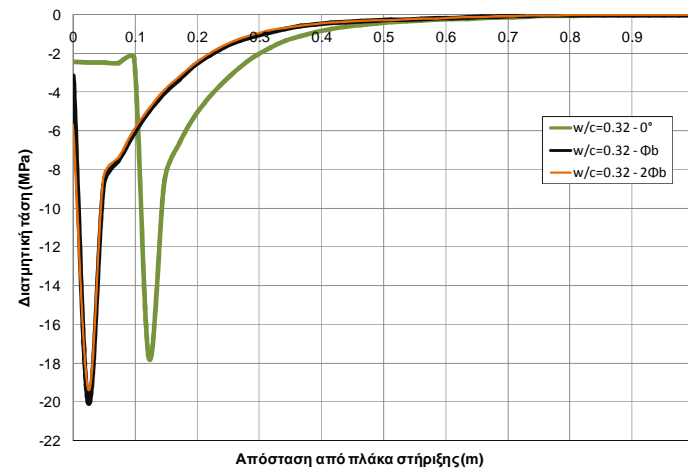
- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 23 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 80 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

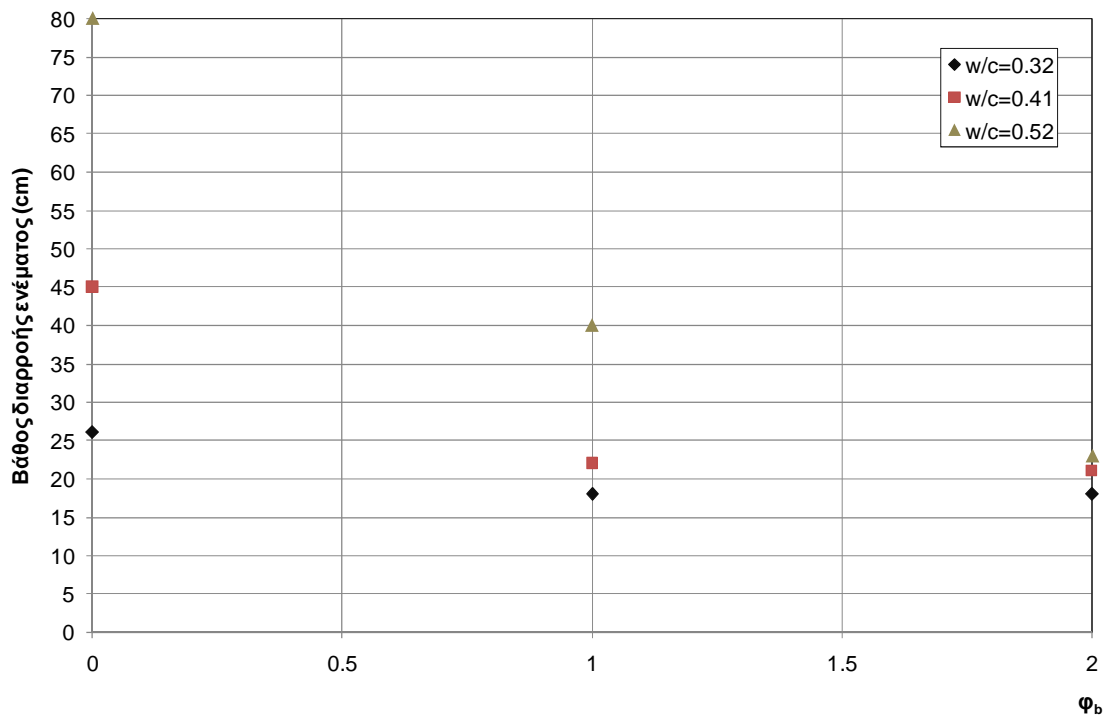
Όσον αφορά την επίδραση της γωνίας τριβής του ενέματος παρατηρήθηκε ότι καθώς μειώνεται η γωνία τριβής, για διαφορετικούς λόγους  $w/c$ , αυξάνεται το βάθος μεταφοράς δυνάμεων και μειώνεται η μέγιστη διατμητική τάση. Για τον ίδιο λόγο  $w/c$  το βάθος εμφάνισης της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης αυξάνεται. Στο σχήμα 115 φαίνεται πως όταν μειώνεται η γωνία τριβής, αυξάνεται το βάθος διαρροής του ενέματος, ειδικότερα για τον λόγο  $w/c = 0.52$ .



Σχήμα 111 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για GSI=50 και για γωνία τριβής του ενέματος  $\phi_b$ ,  $2\phi_b$  και  $\phi=0^\circ$  ( $w/c=0.32$ ,  $w/c=0.41$ ,  $w/c=0.52$ ).



Σχήμα 112 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για GSI=50 και για γωνία τριβής του ενέματος  $\phi_b$ ,  $2\phi_b$  και  $\phi=0$  (νερό/τσιμέντο=0.32, νερό/τσιμέντο=0.41, νερό/τσιμέντο=0.52).



Σχήμα 113 Βάθος διαρροής ενέματος όταν η γωνία τριβής είναι  $0^\circ$ ,  $\phi_b$  και  $2\phi_b$ .

### 3<sup>η</sup> Ανάλυση

3	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\phi_b(^{\circ})$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ (MPa)	Συνοχή c (MPa)
	50	10	0.32	$0^\circ$	$\phi_b$	0.1c	$\pm 30\% c$
			0.41				
			0.52				

Έπειτα για πέτρωμα με  $GSI=50$  και  $m_i=10$  εξετάζεται η επιρροή της αύξησης και μείωσης της συνοχής του ενέματος κατά 30% και προκύπτει:

- Αύξηση κατά 30%
- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 19 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 80 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 21 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 80 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 28 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 80 cm σε βάθος και έως 52 cm σε πλάτος.

- Μείωση κατά 30%
- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 26 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 85 cm σε βάθος και έως 55 cm σε πλάτος.

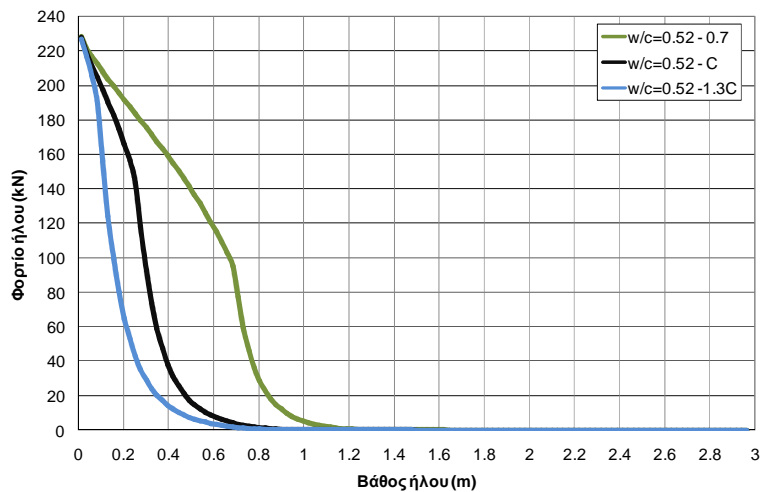
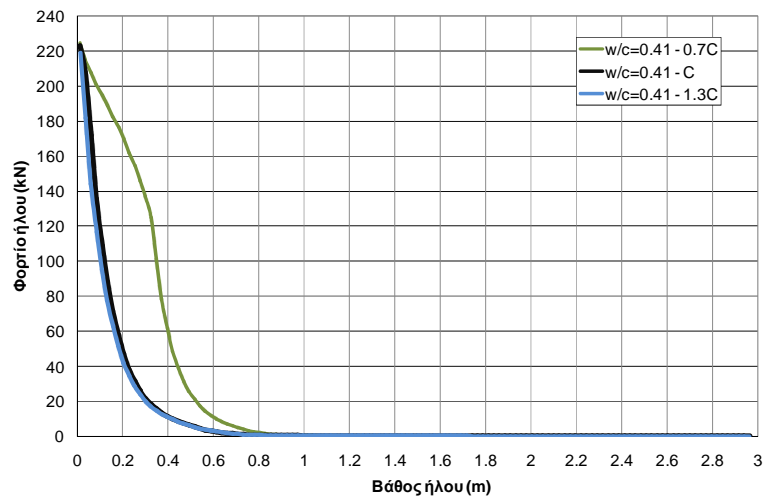
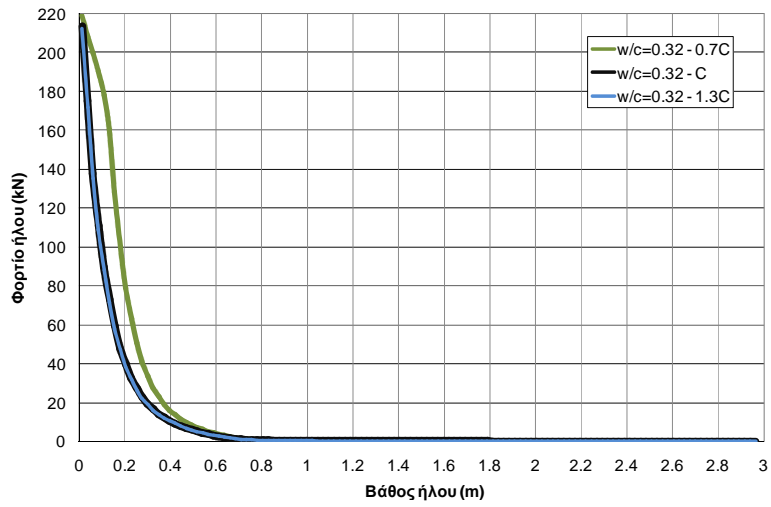
- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 43 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 96 cm σε βάθος και έως 58 cm σε πλάτος.

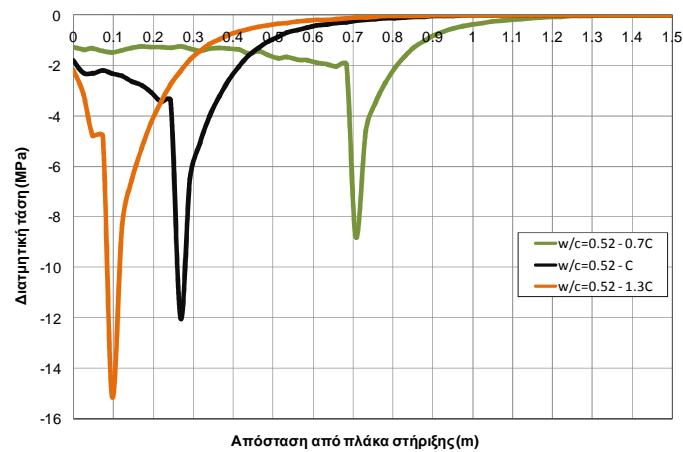
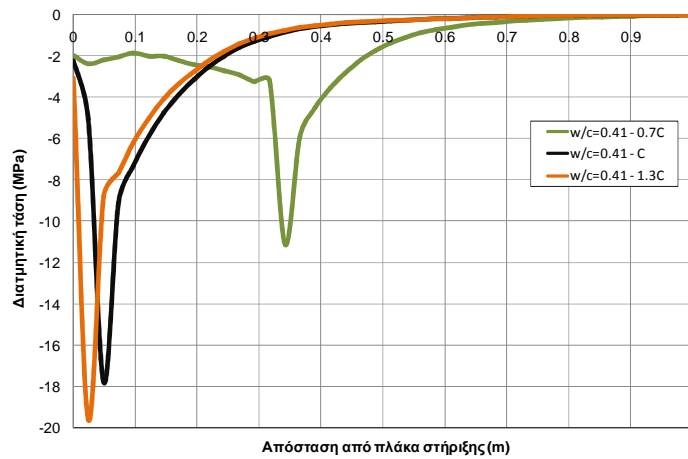
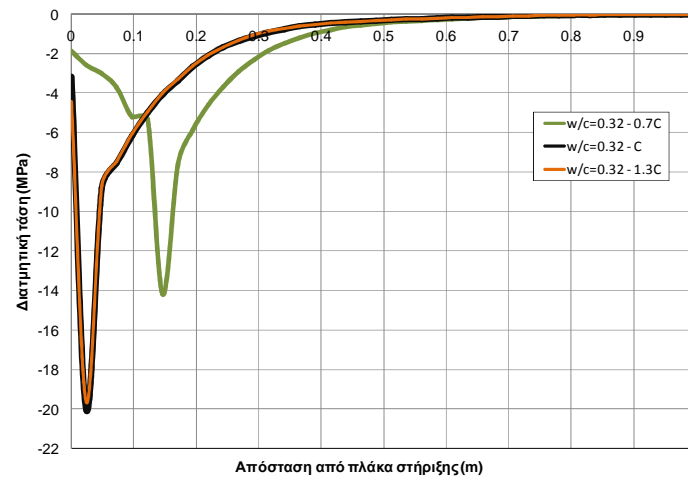
- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 80 cm ενώ το πέτρωμα έως το 1.25 m σε βάθος και έως 46 cm σε πλάτος.

Παρατηρείται λοιπόν πως η συνοχή του ενέματος, επηρεάζει το βάθος μεταφοράς δυνάμεων μόνο όταν ο λόγος  $w/c$  είναι 0.52 και προκαλεί αύξηση της τιμής του αξονικού φορτίου για το ίδιο βάθος. Επίσης, μείωση της συνοχής προκαλεί αύξηση του βάθους διαρροής του ενέματος και μείωση της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης.



Σχήμα 114 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c του ενέματος ίση με 0.32, 0.41 και 0.52 όταν GSI=50 και η συνοχή του ενέματος είναι αυξημένη κατά 30% και μειωμένη κατά 30%.



Σχήμα 115 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c του ενέματος ίση με 0.32, 0.41, 0.52 όταν GSI=50 και η συνοχή του ενέματος είναι αυξημένη κατά 30% και μειωμένη κατά 30%.

#### 4<sup>η</sup> Ανάλυση:

4	GSI	$m_i$	Αναλογία w/c	$\delta$	Γωνία τριβής $\varphi^\circ$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	50	5	0.32	0°	$\varphi_b$	0.1c
		10	0.41			
		20	0.52			

Αρχικά για πέτρωμα με GSI=50 και  $m_i=5$  έχουμε:

- w/c=0.32

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 21 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 68 cm σε βάθος και έως 41 cm σε πλάτος.

- w/c=0.41

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 23 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 68 cm σε βάθος και έως 41 cm σε πλάτος.

- w/c=0.52

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 35 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 75 cm σε βάθος και έως 41 cm σε πλάτος.

Έπειτα για πέτρωμα με GSI=50 και  $m_i=20$  έχουμε:

- w/c=0.32

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 16 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 94.5 cm σε βάθος και έως 65 cm σε πλάτος.

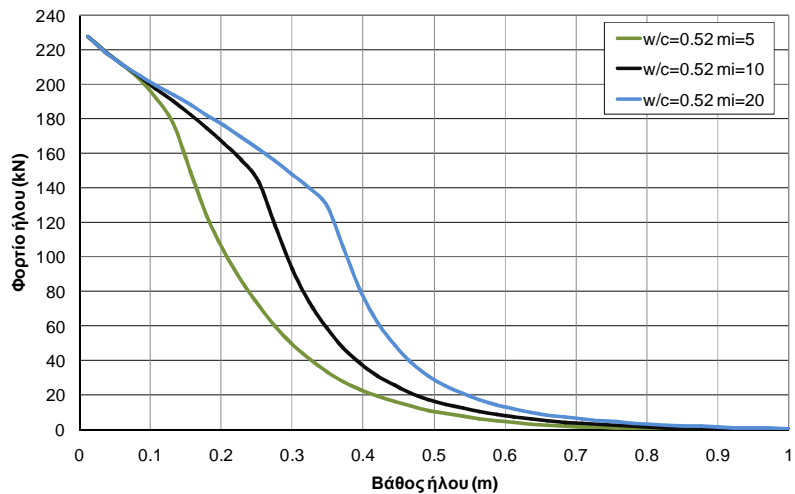
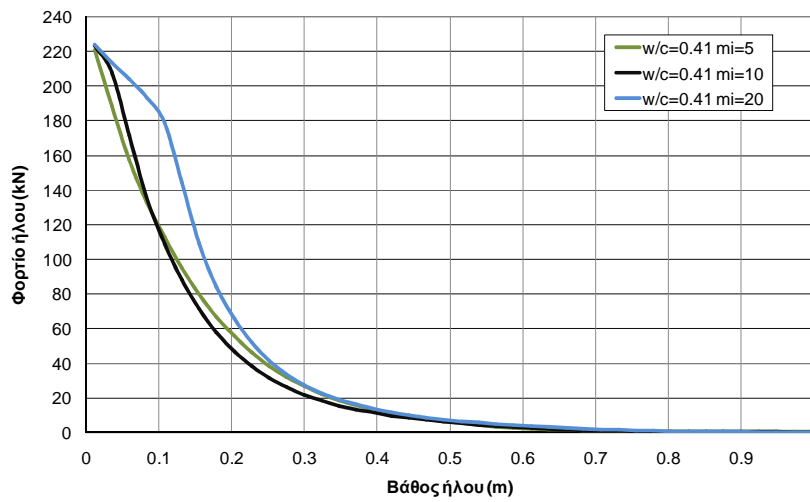
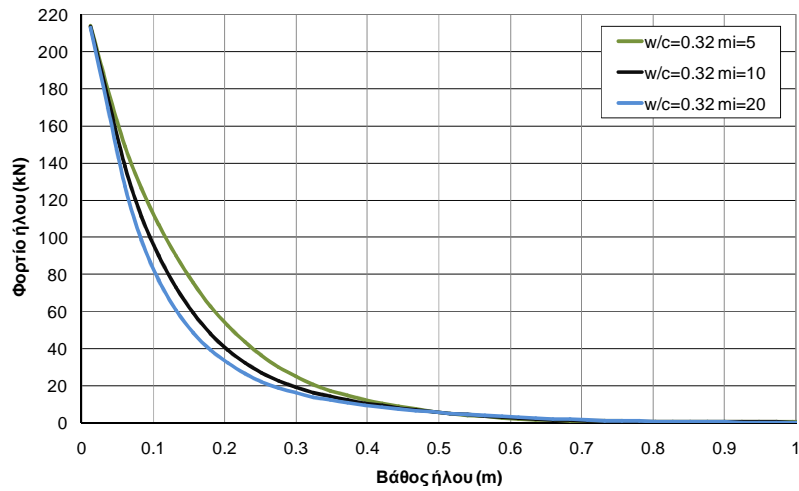
- w/c=0.41

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 26 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 96 cm σε βάθος και έως 65 cm σε πλάτος.

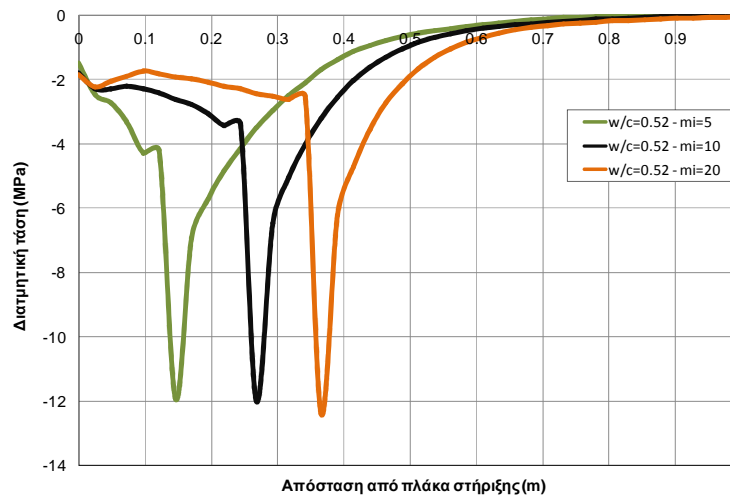
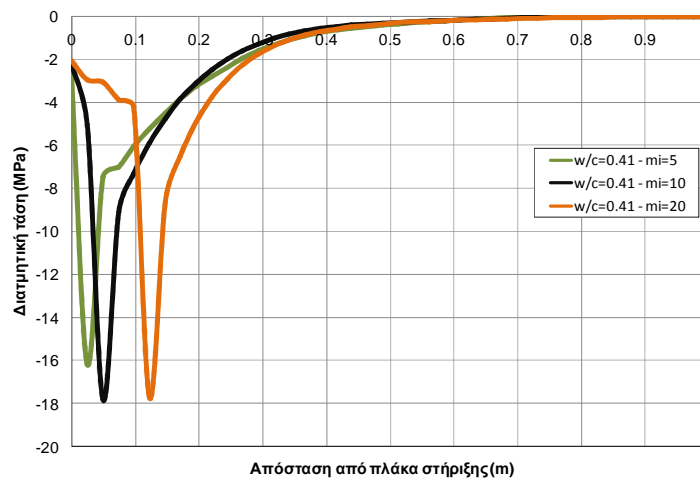
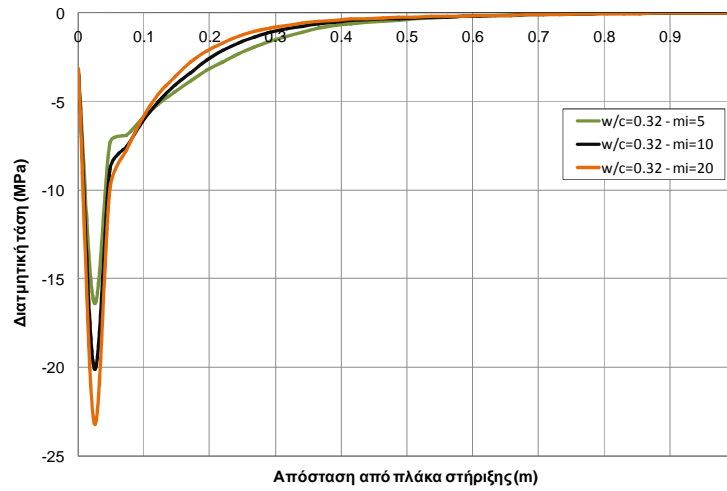
- w/c=0.52

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 48 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.14 m σε βάθος και έως 74 cm σε πλάτος.





Σχήμα 116 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c του ενέματος ίση με 0.32, 0.41 και 0.52 όταν GSI=50 και α) mi=5, β) mi=10, γ) mi=20.



Σχήμα 117 Κατανομή διαμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία  $w/c$  του ενέματος 0.32, 0.41 και 0.52 όταν  $GSI=50$  και  $m_i=5, m_i=10, m_i=20$ .

Για την ίδια τιμή της παραμέτρου  $m_i$  όσο αυξάνεται ο λόγος  $w/c$  αυξάνεται το βάθος εμφάνισης της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης.

Επιπλέον, παρατηρείται πως όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του πετρώματος τόσο αυξάνεται το βάθος διαρροής του ενέματος.

#### 5<sup>η</sup> Ανάλυση:

6	GSI	$m_i$	Αναλογία $w/c$	$\delta$	Γωνία τριβής $\varphi^\circ$	Παραμένουσα συνοχή $c_r$ MPa
	35	10	0.32	$0^\circ$	$\varphi_b$	0.1c
	50		0.41			c
	65		0.52			0

Αρχικά, εξετάστηκε η περίπτωση όπου το GSI ήταν ίσο με 35 και η παραμένουσα αντοχή του ενέματος ήταν ίση με το 10% της αρχικής ( $c_r=0.1c$ ).

- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 31 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.42 m σε βάθος και έως 83 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 33 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.42 m σε βάθος και έως 83 cm σε πλάτος.

- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 38 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 1.42 m σε βάθος και έως 83 cm σε πλάτος.

Και τέλος, εξετάστηκε η περίπτωση όπου το GSI ήταν ίσο με 65 και η παραμένουσα αντοχή του ενέματος ήταν ίση με το 10% της αρχικής ( $c_r =0.1c$ ).

- $w/c=0.32$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 13.4 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 45 cm σε βάθος και έως 28 cm σε πλάτος.

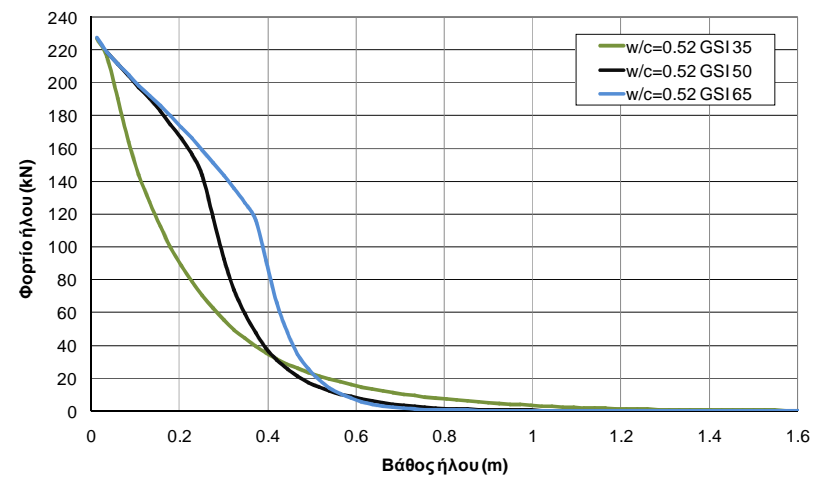
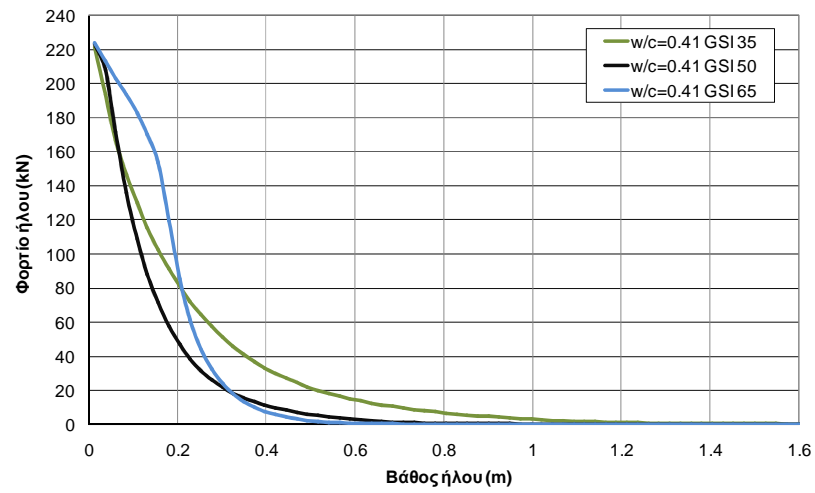
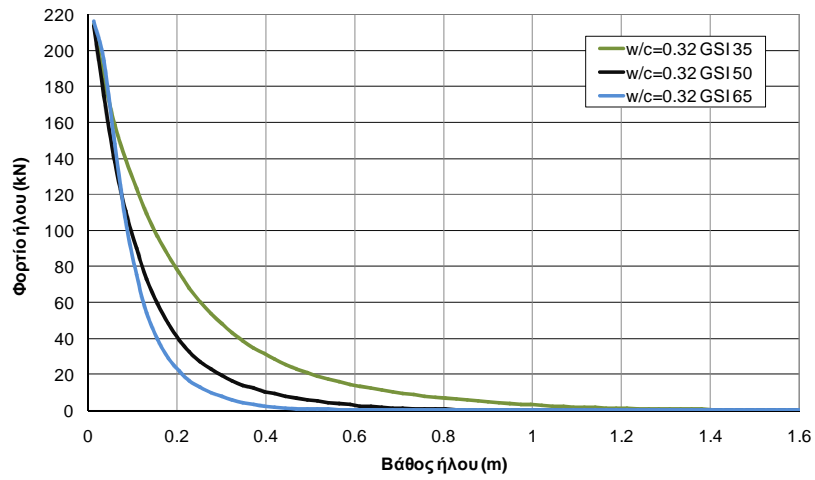
- $w/c=0.41$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 25.5 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 54.5 cm σε βάθος και έως 28 cm σε πλάτος.

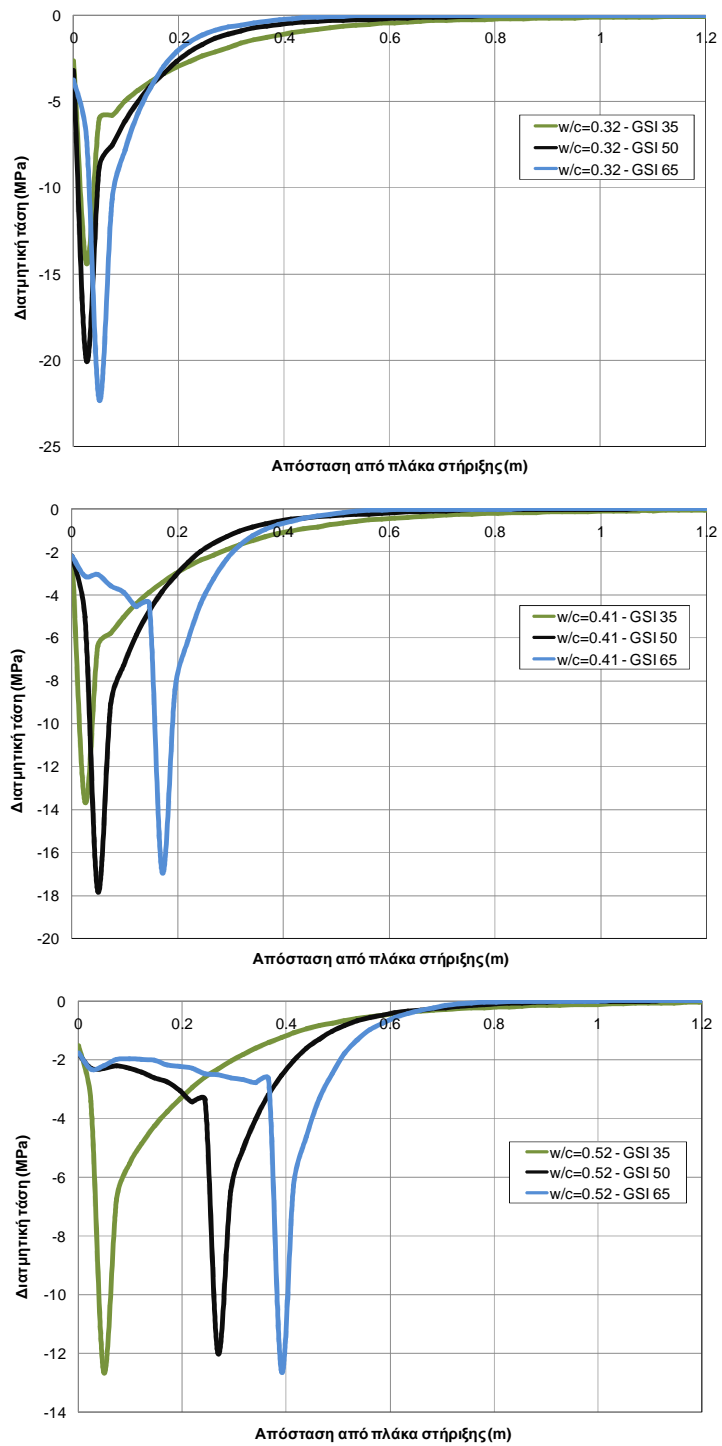
- $w/c=0.52$

Ύστερα από εφαρμογή τάσεως 500MPa, το ένεμα διέρρευσε έως τα 47.2 cm ενώ το πέτρωμα έως τα 72 cm σε βάθος και έως 25 cm σε πλάτος.

Παρατηρείται πως όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του πετρώματος τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διαρροής του ενέματος για διάφορους λόγους  $w/c$  (Σχήμα 121).



Σχήμα 118 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c ενέματος =0.52 όταν το GSI είναι ίσο με 35, 50 και 65.



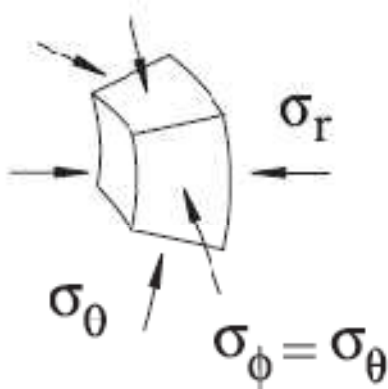
Σχήμα 119 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης κατά την φόρτιση των 500 MPa για αναλογία w/c ενέματος =0.32, 0.41 και 0.52 όταν το GSI είναι ίσο με 35, 50 και 65.

## 4.4 Σύγκριση μοντέλων σε FLAC<sup>2D</sup> και FLAC<sup>3D</sup>

### 4.4.1 FLAC<sup>2D</sup>

Με το FLAC<sup>2D</sup> κατασκευάστηκαν τέσσερα μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν έναν ήλο σε σφαιρικό άνοιγμα. Ο ήλος είναι τοποθετημένος σε κάρναβο 1m x 1m. Το μοντέλο παριστάνεται σχηματικά από έναν κώνο και αποτελείται από τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο το πέτρωμα έχει αρχική φόρτιση ίση με 10 MPa. Στο δεύτερο στάδιο μηδενίζεται η εσωτερική πίεση και τοποθετείται ο ήλος, το ένεμα και η πλάκα στήριξης και στο τρίτο γίνεται η εξόλκευση. Για να αποδειχθεί η ισχύς του μοντέλου συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα ενός ελαστικού μοντέλου με τα αποτελέσματα της ελαστικής λύσης για σφαίρα.

#### Ελαστική λύση σφαίρας (Lamé,1852)



$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 - \frac{\alpha^3}{r^3} \right)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha^3}{r^3} \right)$$

$$u_r = \sigma_0 \frac{1 + \nu}{2E} \frac{\alpha^3}{r^2}$$

Ενδεικτικά, για πέτρωμα με GSI 50 με μέτρο ελαστικότητας  $E = 1.6895 \times 10^{10}$  Pa,  $\nu = 0.25$ ,  $\sigma_0 = 10$  MPa και για ακτίνα  $\alpha = 5$  m και απόσταση  $r = 5$  m ισχύει:

$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 - \frac{\alpha^3}{r^3} \right) = 1 \times 10^7 \left( 1 - \frac{5^3}{5^3} \right) = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha^3}{r^3} \right) = 1 \times 10^7 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{5^3}{5^3} \right) = 10^7 \times 1.5 = 15 \text{ MPa}$$

$$u_r = \sigma_0 \frac{1 + \nu}{2E} \frac{\alpha^3}{r^2} = 1 \times 10^7 \frac{1 + 0.25}{2 \times 1.6895 \times 10^{10}} \frac{5^3}{5^2} = 0.001850 \text{ m}$$

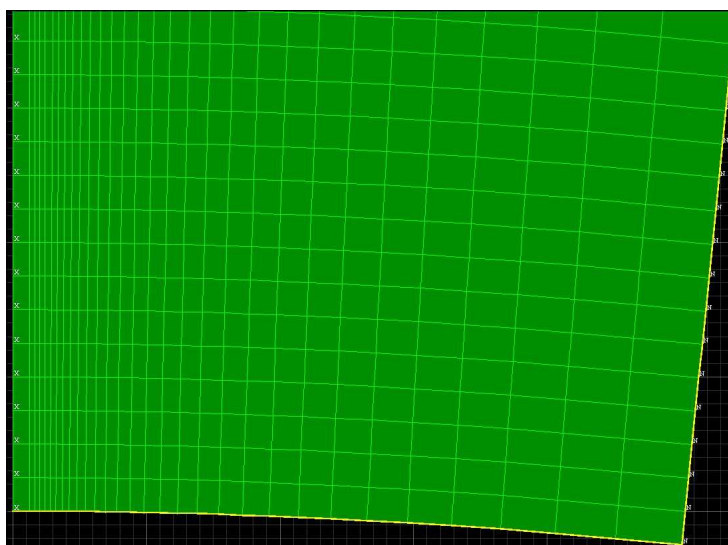
	Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης	Αποτελέσματα FLAC
$\sigma_r$	0	0
$\sigma_\theta$	15 MPa	15 MPa
$u_r$	1.85 mm	1.85 mm

Το ελαστικό μοντέλο του FLAC για πέτρωμα με GSI=50 στο στάδιο που μηδενίζεται η εσωτερική πίεση έδωσε τα ίδια αποτελέσματα.

### Χαρακτηριστικά μοντέλου

Το ένεμα προσομοιώνεται με τρεις ζώνες. Στην ζώνη που είναι σε επαφή με το πέτρωμα, το ένεμα είναι ελαστοπλαστικό και στις άλλες δύο είναι ελαστικό. Το ένεμα έχει συνοχή 25MPa, γωνία τριβής 24°, διασταλτικότητα 0° και εφελκυστική αντοχή 7.38 MPa. Η συνοχή μειώνεται κατά 90% μετά την αστοχία του ενέματος, ενώ η γωνία τριβής και η εφελκυστική αντοχή παραμένουν σταθερές. Η πλάκα είχε τις ίδιες ιδιότητες με τον ήλο, είναι ελαστική και έχει πάχος 2cm και ακτίνα 10cm. Το πέτρωμα είχε GSI 90, 70, 50 και 30. Η προσομοίωση της εξόλκευσης έγινε με εφαρμογή σταθερής ταχύτητας ( $u=10^7$  m/sec) στην ζώνη που αντιπροσωπεύει τον ήλο.

### Α' Στάδιο

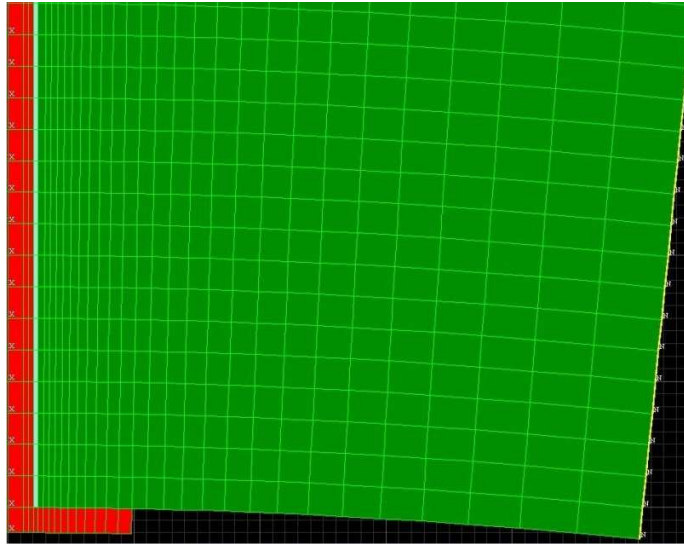


Σχήμα 120 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC<sup>2D</sup> – Πέτρωμα με αρχική φόρτιση.



### **B' Στάδιο – Τοποθέτηση ήλου**

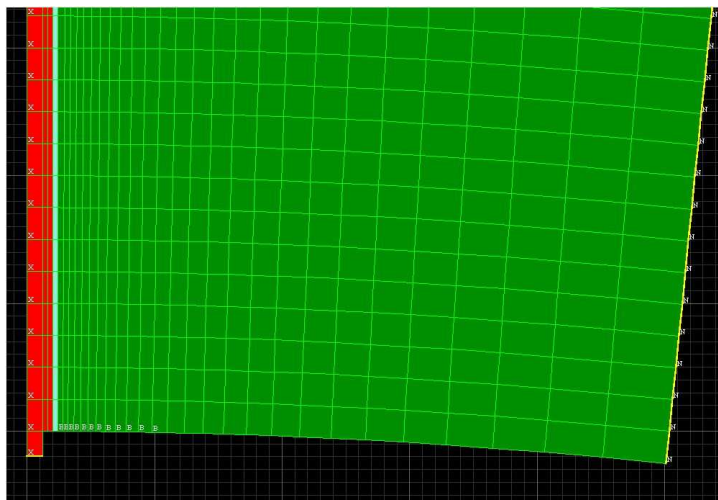
Η πρώτη ζώνη εξ αριστερών αντιστοιχεί στον ήλο, οι επόμενες τρεις στο ένεμα (κόκκινο χρώμα=ελαστικό, γαλάζιο=ελαστοπλαστικό), και οι υπόλοιπες ζώνες στο πέτρωμα. Η ζώνη στο αρχικό τμήμα του μοντέλου με ακτίνα 10cm αντιστοιχεί στην πλάκα στήριξης.



Σχήμα 121 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC<sup>2D</sup> – Στάδιο τοποθέτησης ήλου.

### **Γ' Στάδιο – Εξόλκευση ήλου**

Στο στάδιο αυτό αφαιρείται η πλάκα και δεσμεύονται οι κόμβοι που αντιστοιχούν σε αυτή. Η εξόλκευση προσομοιώνεται με εφαρμογή σταθερής ταχύτητας ( $u=10^7$  m/sec) στην ζώνη που αντιπροσωπεύει τον ήλο.



Σχήμα 122 Απεικόνιση τμήματος μοντέλου κατά την εξόλκευση (αντικατάσταση πλάκας από στηρίξεις).

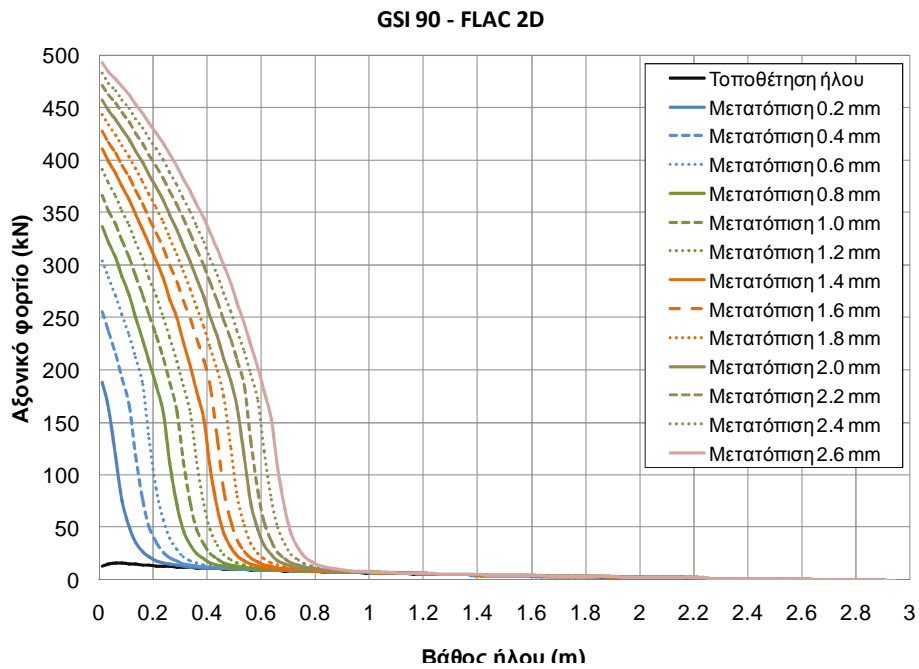
Η κατανομή του αξονικού φορτίου και της διατμητικής τάσης στις τέσσερις περιπτώσεις παρουσιάζεται στα σχήματα 123-130. Παρατηρείται πως στην περίπτωση όπου το GSI είναι ίσο με 90, όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο τόσο αυξάνεται και το βάθος επίδρασης του. Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με την φέρουσα ικανότητα του ήλου οι δυνάμεις μεταφέρονται έως τα 0.9 m. Επίσης, η διατμητική τάση είναι χαμηλή στο τμήμα που έχει αποσυζευχθεί και μειώνεται εκθετικά στο τμήμα που δεν έχει αποσυζευχθεί.

Όταν το GSI είναι ίσο με 70 παρατηρείται και πάλι πως όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο τόσο αυξάνεται και το βάθος επίδρασης του. Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με την φέρουσα ικανότητα του ήλου οι δυνάμεις μεταφέρονται έως τα 0.7 m. Η διατμητική τάση είναι χαμηλή στο τμήμα που έχει αποσυζευχθεί και μειώνεται εκθετικά στο τμήμα που δεν έχει αποσυζευχθεί.

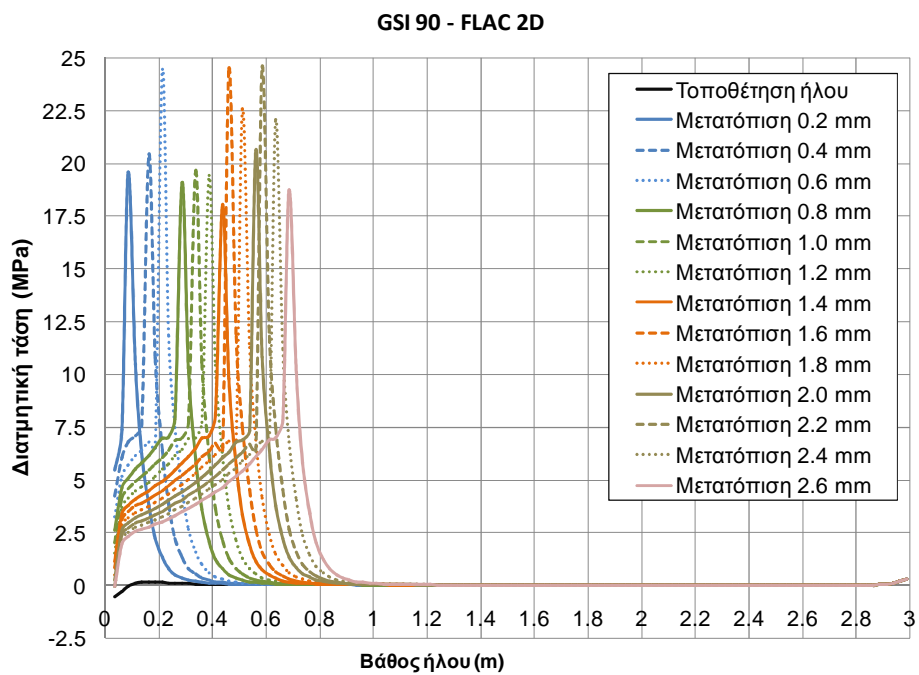
Όταν το GSI είναι ίσο με 50 το ουδέτερο σημείο (neutral point) βρίσκεται σε απόσταση 0.313 m από την πλάκα στήριξης. Κατά την εξόλκευση, η θέση του ουδέτερου σημείου είναι διαφορετική διότι το φορτίο στο τμήμα ανάληψης επιμηκύνει το τμήμα αγκύρωσης του ήλου και το μεταφέρει προς το άνοιγμα της σήραγγας. Οι δυνάμεις μεταφέρονται έως τα 0.7 m.

Επίσης, παρατηρείται πως ο ήλος, όταν το GSI είναι ίσο με 30, αναλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο φορτίο από την φέρουσα ικανότητα του (500kN) και διαρρέει από το στάδιο τοποθέτησης του.

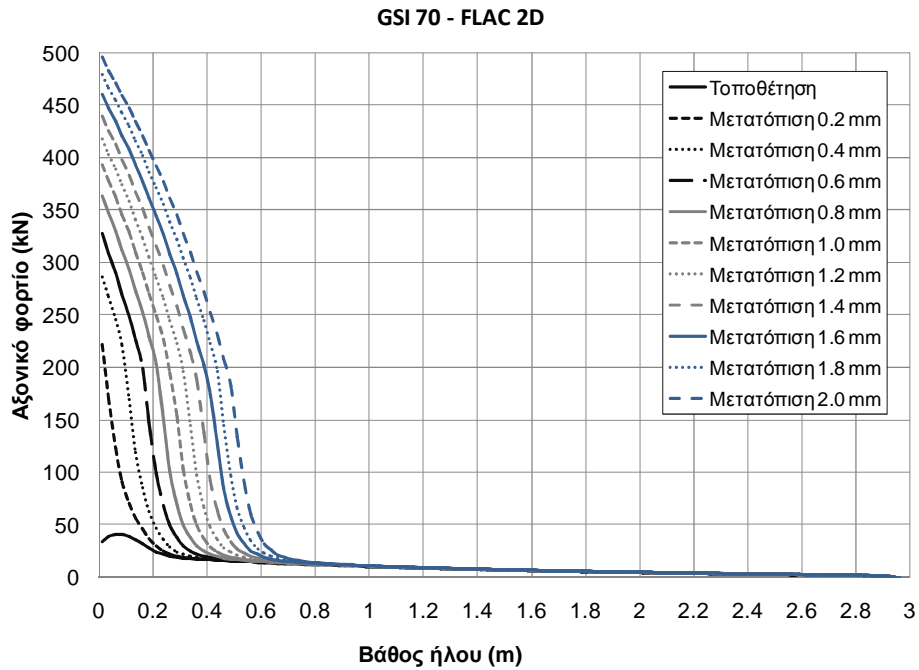
Επιπλέον, παρατηρείται πως όσο πιο χαμηλή είναι η ποιότητα του πετρώματος τόσο πιο μικρή είναι μετατόπιση του ήλου στην οποία το αξονικό φορτίο του ήλου είναι ίσο με την φέρουσα ικανότητα του (500 kN). Αυτό συμβαίνει επειδή όσο χαμηλότερη είναι η ποιότητα του πετρώματος τόσο περισσότερο τανύεται ο ήλος με την τοποθέτηση, με αποτέλεσμα όσο εξολκεύεται να τανύεται πλήρως.



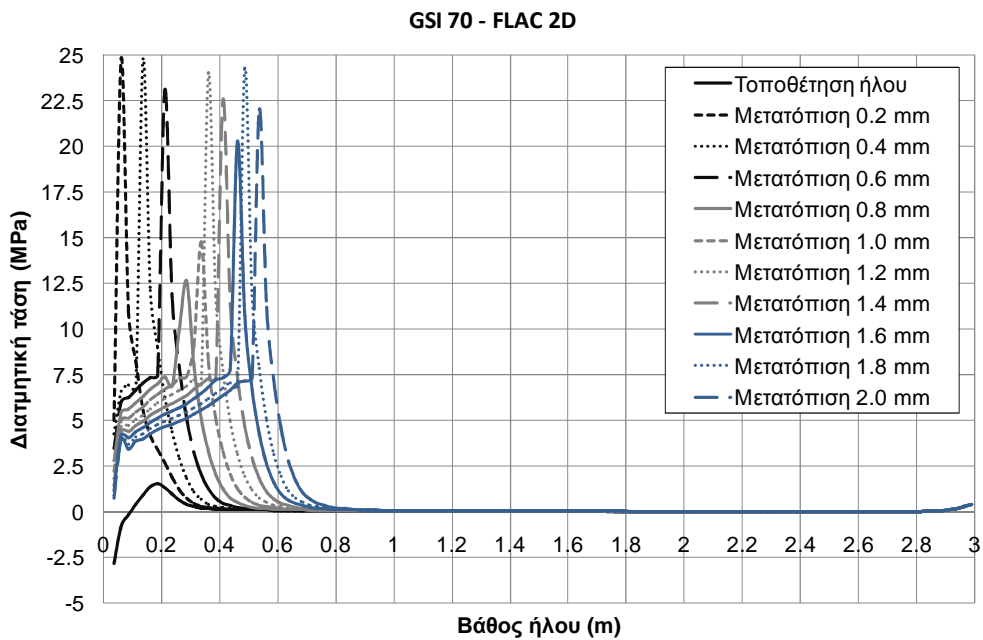
Σχήμα 123 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=90.



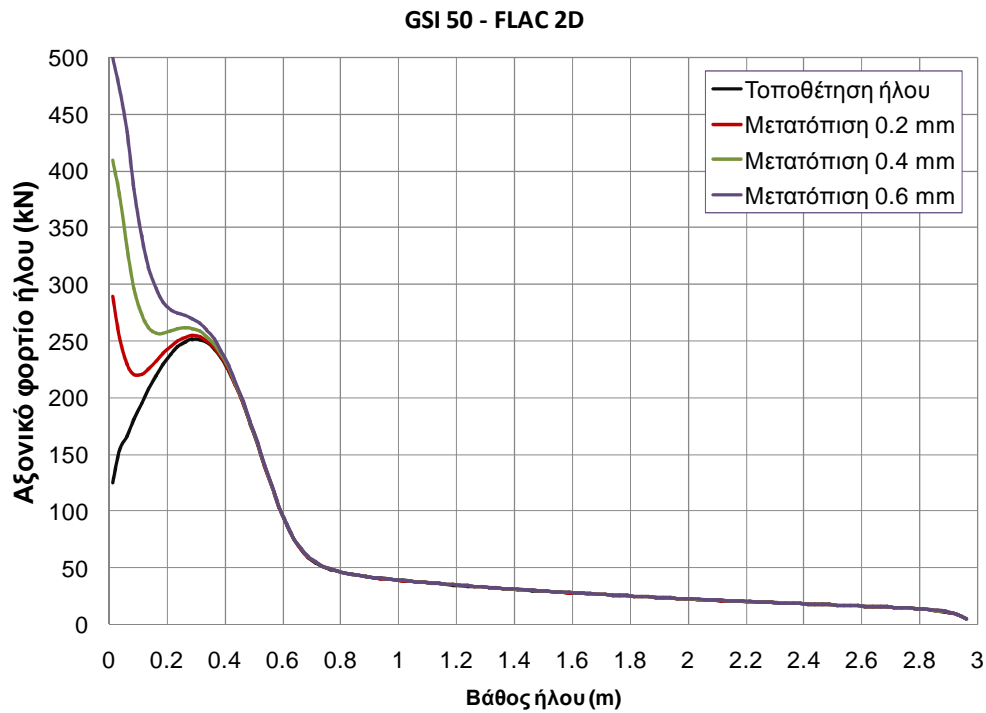
Σχήμα 124 Κατανομή διαμημητικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=90.



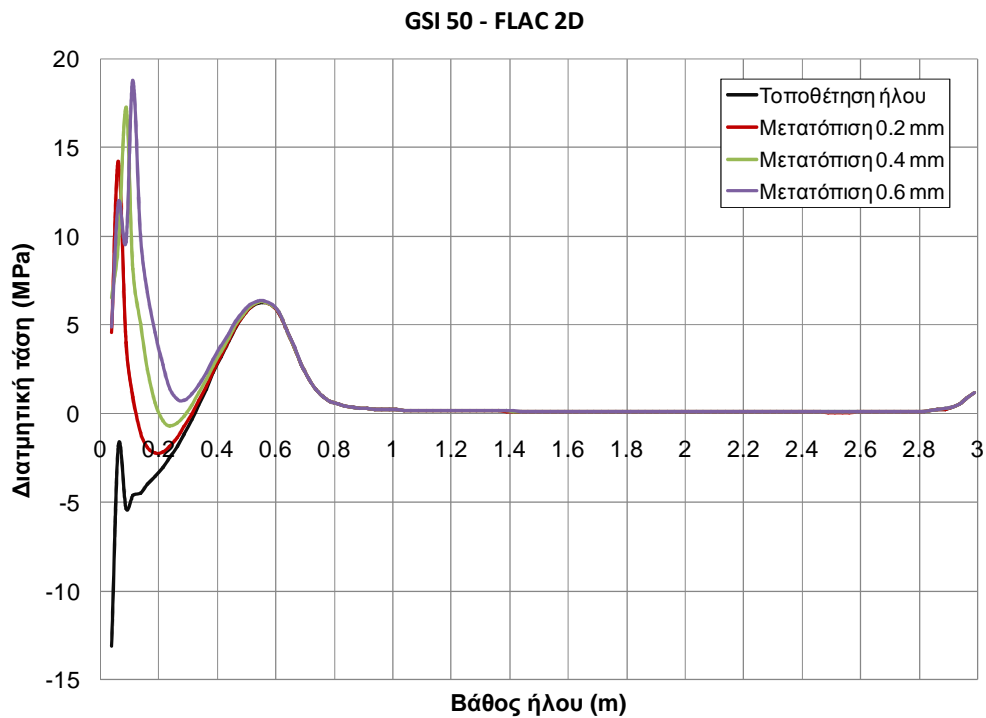
Σχήμα 125 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=70.



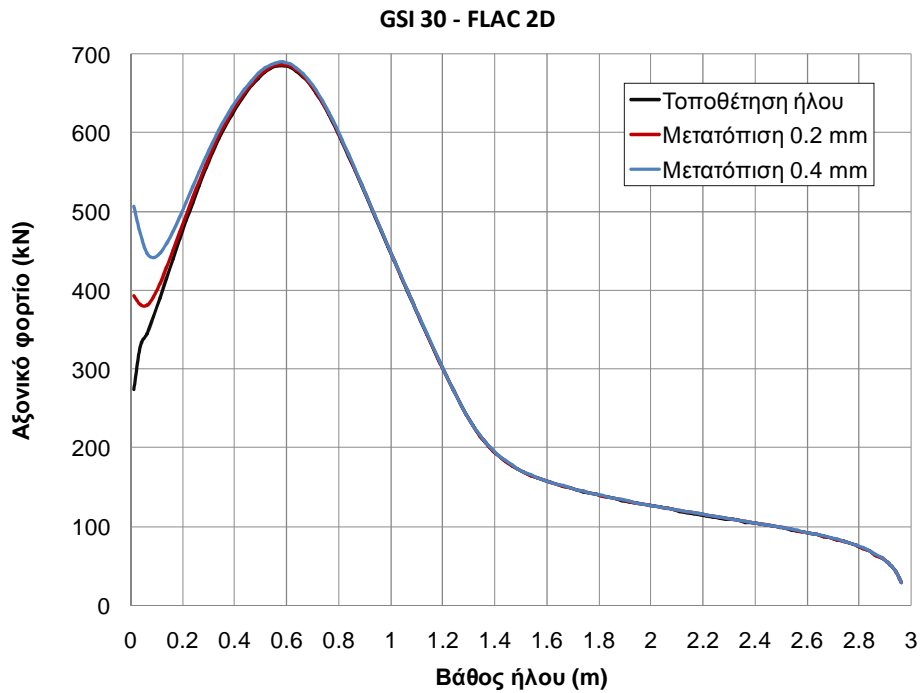
Σχήμα 126 Κατανομή διαμημικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=70.



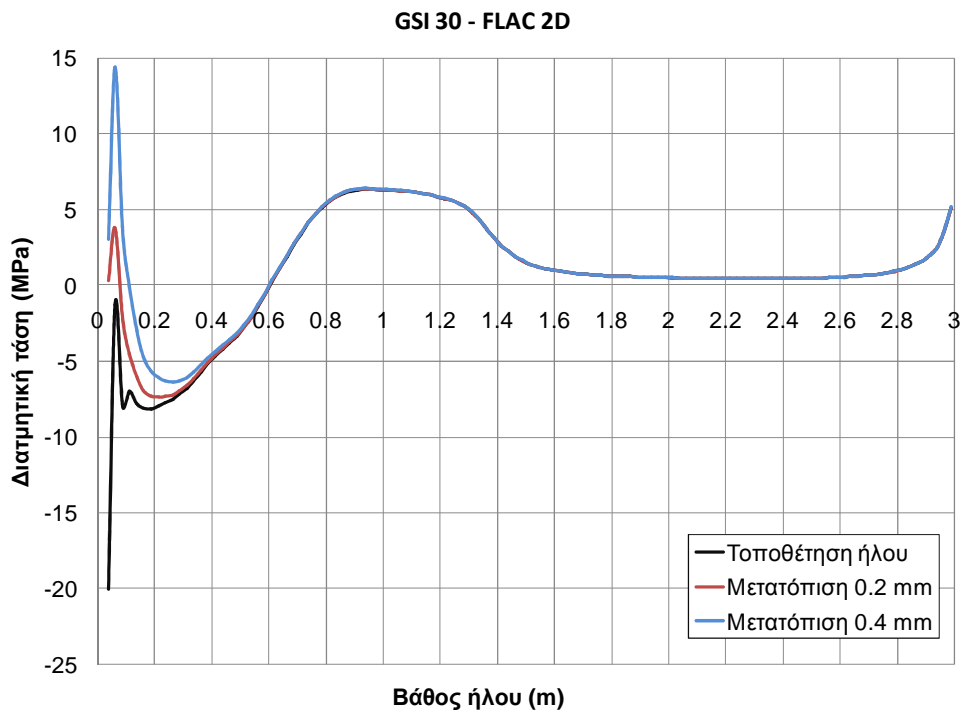
Σχήμα 127 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=50.



Σχήμα 128 Κατανομή διατμητικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=50.



Σχήμα 129 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=30.



Σχήμα 130 Κατανομή διαμητρικής τάσης κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=30.

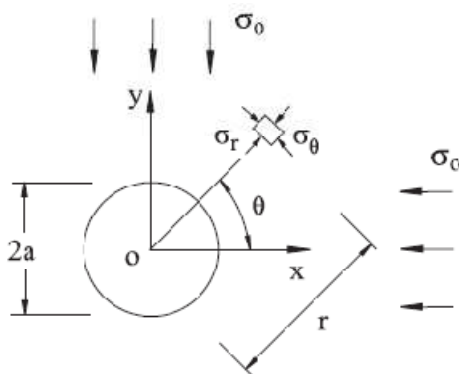
#### 4.4.2 FLAC<sup>3D</sup>

Με το FLAC<sup>3D</sup> κατασκευάστηκαν επιπλέον τέσσερα μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν ήλο στην στέψη κυκλικής σήραγγας. Ο ήλος είναι τοποθετημένος σε κάναβο 1m x 1m. Το μοντέλο παριστάνεται σχηματικά από το ¼ κώνου και αποτελείται από τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το πέτρωμα έχει αρχική φόρτιση ίση με 10 MPa. Στο δεύτερο στάδιο, μηδενίζεται η εσωτερική πίεση και τοποθετείται ο ήλος, το ένεμα και η πλάκα στήριξης και στο τρίτο γίνεται η εξόλκευση. Για να αποδειχθεί η ισχύς του μοντέλου συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα ενός ελαστικού μοντέλου με τα αποτελέσματα της ελαστικής λύσης για κύλινδρο.

Το ένεμα έχει συνοχή 25MPa, γωνία τριβής 24°, διασταλτικότητα 0° και εφελκυστική αντοχή 7.38 MPa. Η συνοχή μειώνεται κατά 90% μετά την αστοχία του ενέματος, ενώ η γωνία τριβής και η εφελκυστική αντοχή παραμένουν σταθερές. Η πλάκα είχε τις ίδιες ιδιότητες με τον ήλο, είναι ελαστική και έχει πάχος 2cm και ακτίνα 10cm. Το πέτρωμα είχε GSI 90, 70, 50 και 30.

Η προσομοίωση της εξόλκευσης έγινε με εφαρμογή σταθερής ταχύτητας ( $u=10^{-7}$ m/sec) στις ζώνες που αντιπροσωπεύουν τον ήλο.

#### Ελαστική λύση κυλίνδρου (Lamé,1852)



$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 - \frac{\alpha^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\alpha^2}{r^2} \right)$$

$$u_r = \sigma_0 \frac{1 + \nu}{E} \frac{\alpha^2}{r}$$

Ενδεικτικά, για πέτρωμα με GSI 50 με μέτρο ελαστικότητας  $E = 1.6895e10$  Pa,  $\nu = 0.25$ ,  $\sigma_0 = 10$  MPa και για ακτίνα  $a=5$ m και απόσταση  $r = 5$ m ισχύει:

$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 - \frac{\alpha^2}{r^2} \right) = 1 \times 10^7 \left( 1 - \frac{5^2}{5^2} \right) = 0 \text{ MPa}$$

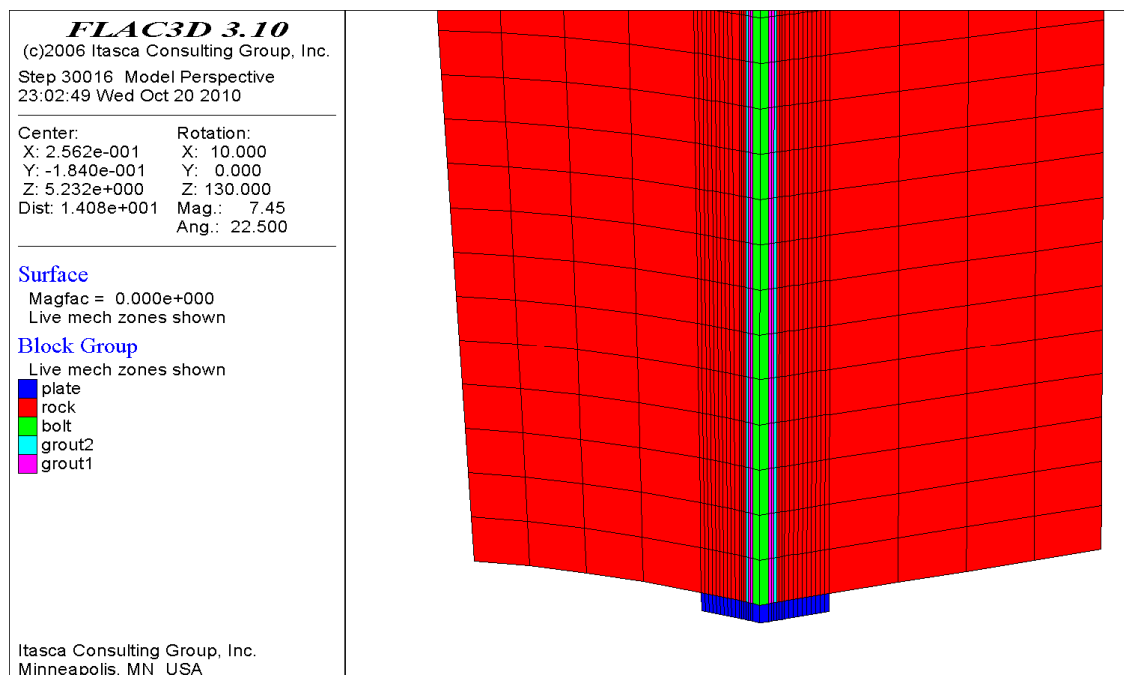
$$\sigma_\theta = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\alpha^2}{r^2} \right) = 1 \times 10^7 \left( 1 + \frac{5^2}{5^2} \right) = 10^7 \times 2 = 20 \text{ MPa}$$

$$u_r = \sigma_0 \frac{1 + \nu}{E} \frac{\alpha^2}{r} = 1 \times 10^7 \frac{1 + 0.25}{1.6895 \times 10^{10}} \frac{5^2}{5} = 0.0036 \text{ m}$$

	Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης	Αποτελέσματα FLAC <sup>3D</sup>
$\sigma_r$	0	0
$\sigma_\theta$	20 MPa	30 MPa
$u_r$	3.6 mm	3.6 mm

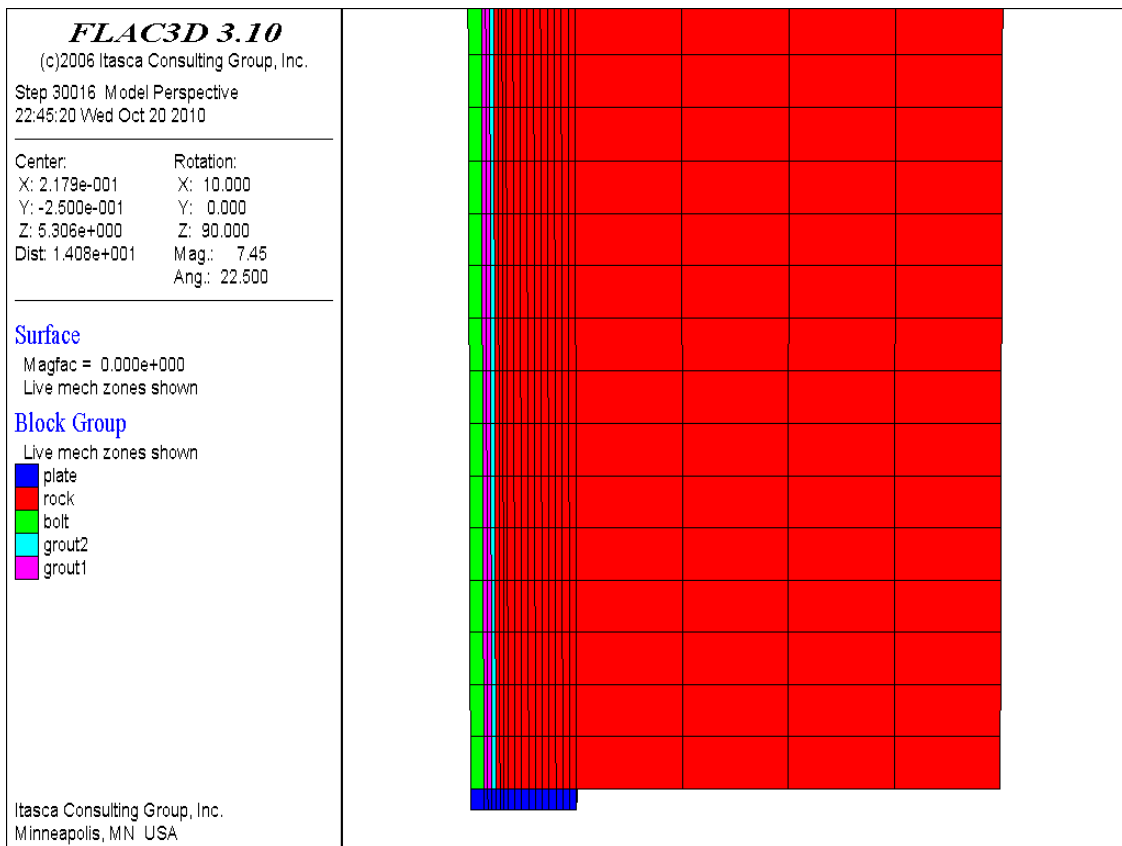
Το ελαστικό μοντέλο του FLAC<sup>3D</sup> για πέτρωμα με GSI 50 στο στάδιο που μηδενίζεται η εσωτερική πίεση έδωσε τα ίδια αποτελέσματα.

### Β' Στάδιο – Τοποθέτηση ήλου



Σχήμα 131 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC<sup>3D</sup> – Στάδιο τοποθέτησης ήλου.





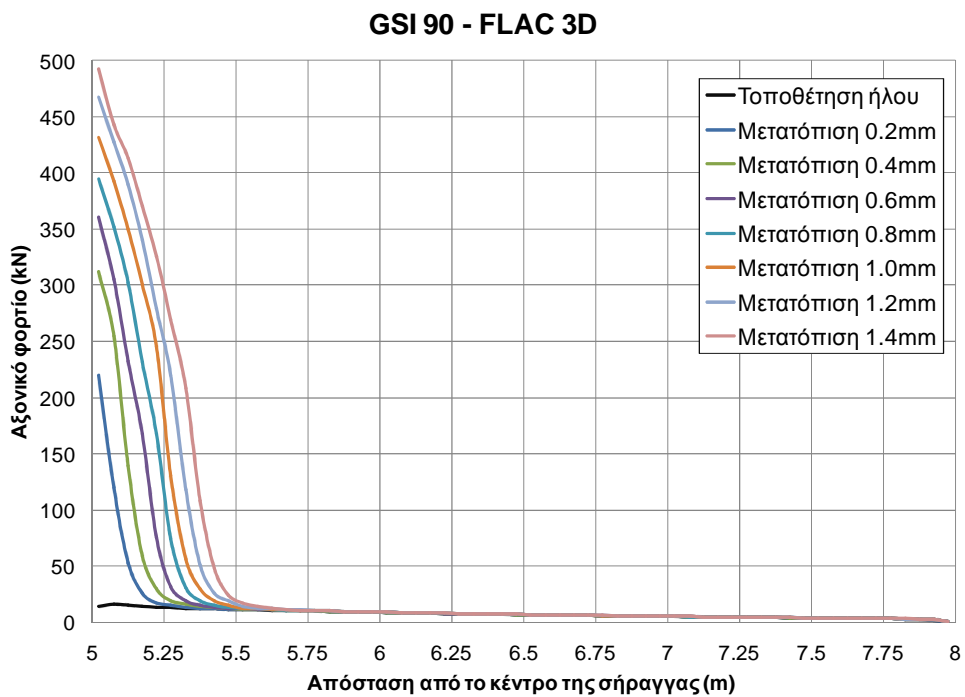
Σχήμα 132 Απεικόνιση μοντέλου σε FLAC<sup>3D</sup> – Στάδιο τοποθέτησης ήλου.

Η κατανομή του αξονικού φορτίου και της διατμητικής τάσης στις τέσσερις περιπτώσεις παρουσιάζεται στα σχήματα 133-156. Στην περίπτωση όπου το GSI είναι ίσο με 90 παρατηρείται πως το ουδέτερο σημείο βρίσκεται στα 0.13 m. Επιπλέον όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο τόσο αυξάνεται και το βάθος επίδρασης του. Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με την φέρουσα ικανότητα του ήλου οι δυνάμεις μεταφέρονται έως τα 0.63m. Επίσης, η διατμητική τάση είναι χαμηλή στο τμήμα που έχει αποσυζευχθεί και μειώνεται εκθετικά στο τμήμα που δεν έχει αποσυζευχθεί.

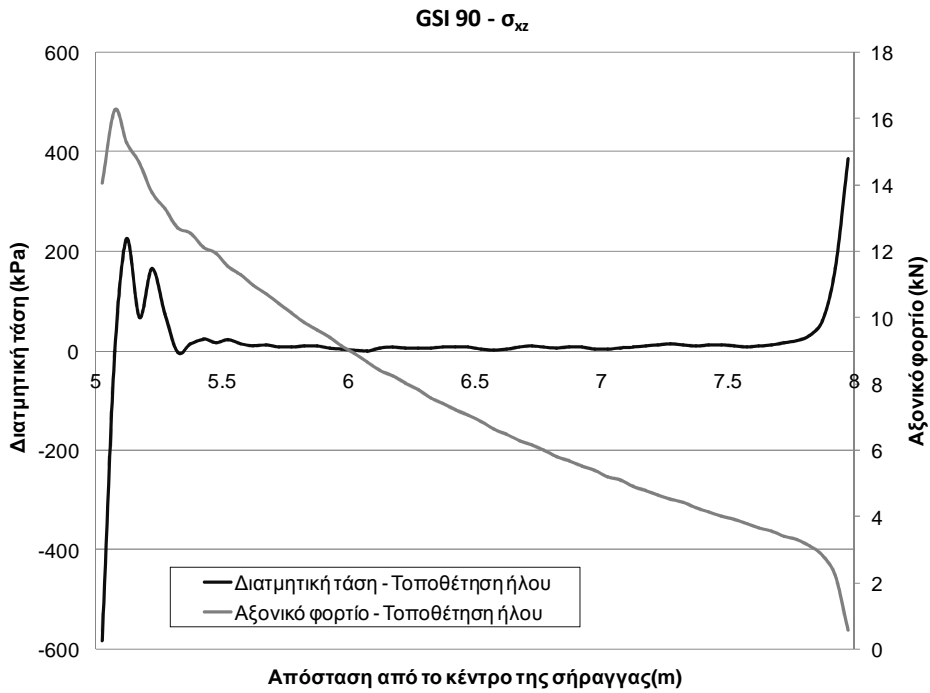
Όταν το GSI είναι ίσο με 70 το ουδέτερο σημείο βρίσκεται στα 0.13 m. Παρατηρείται και πάλι πως όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο τόσο αυξάνεται και το βάθος επίδρασης του. Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με την φέρουσα ικανότητα του ήλου οι δυνάμεις μεταφέρονται έως τα 0.58 m. Η διατμητική τάση είναι χαμηλή στο τμήμα που έχει αποσυζευχθεί και μειώνεται εκθετικά στο τμήμα που δεν έχει αποσυζευχθεί.

Όταν το GSI είναι ίσο με 50 το ουδέτερο σημείο (neutral point) βρίσκεται σε απόσταση 0.38 m από την πλάκα στήριξης. Κατά την εξόλκευση, η θέση του ουδέτερου σημείου είναι διαφορετική διότι το φορτίο στο τμήμα ανάληψης επιμηκύνει το τμήμα αγκύρωσης του ήλου και το μεταφέρει προς το άνοιγμα της σήραγγας. Οι δυνάμεις μεταφέρονται έως τα 1.63m.

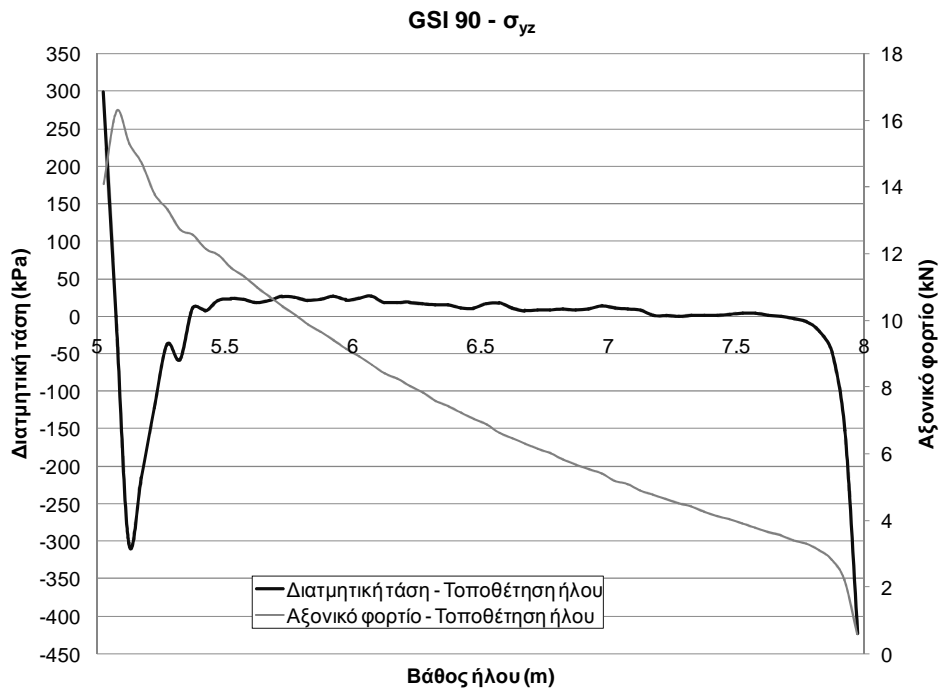
Επίσης, παρατηρείται πως ο ήλος, όταν το GSI είναι ίσο με 30, αναλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο φορτίο από την φέρουσα ικανότητα του (500kN) και διαρρέει από το στάδιο τοποθέτησης του.



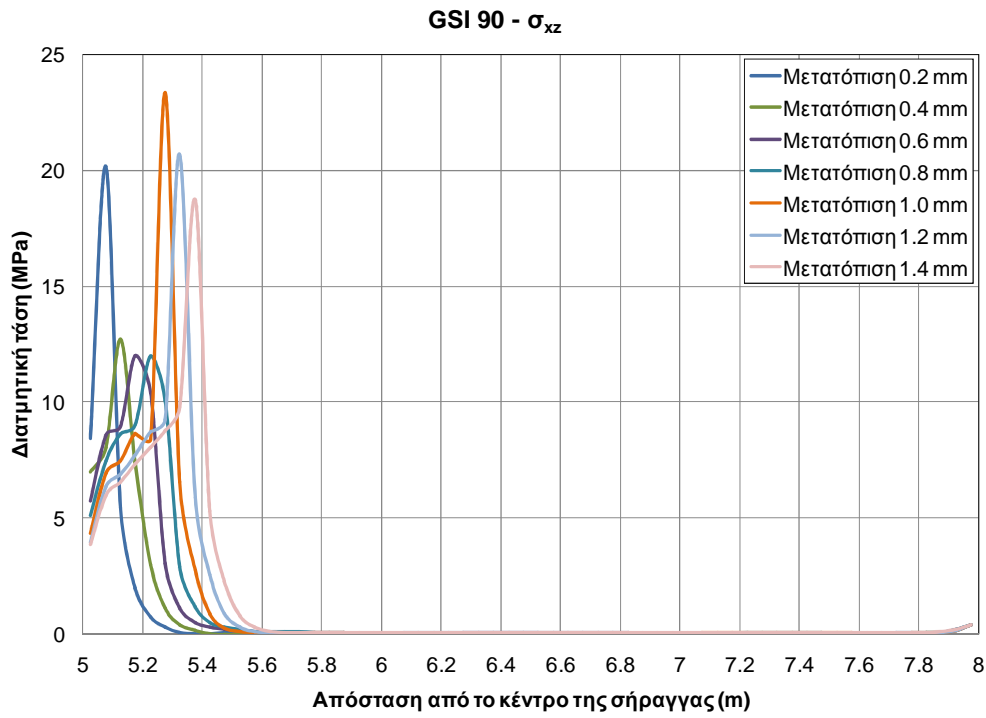
Σχήμα 133 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=90.



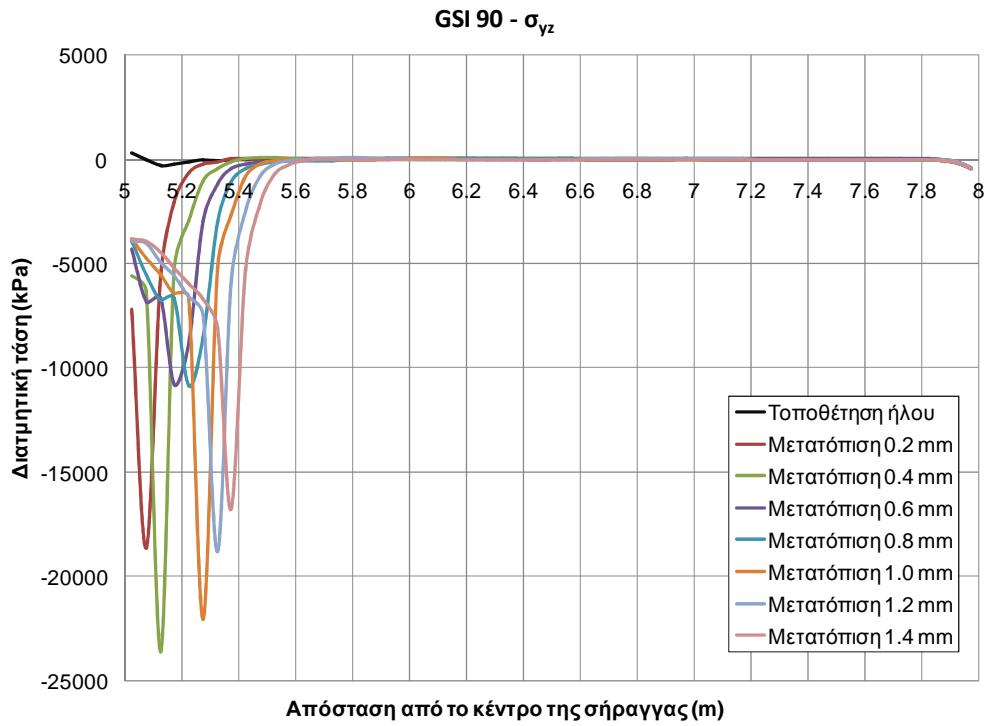
Σχήμα 134 Κατανομή διαμητρικής τάσης  $\sigma_{xz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=90.



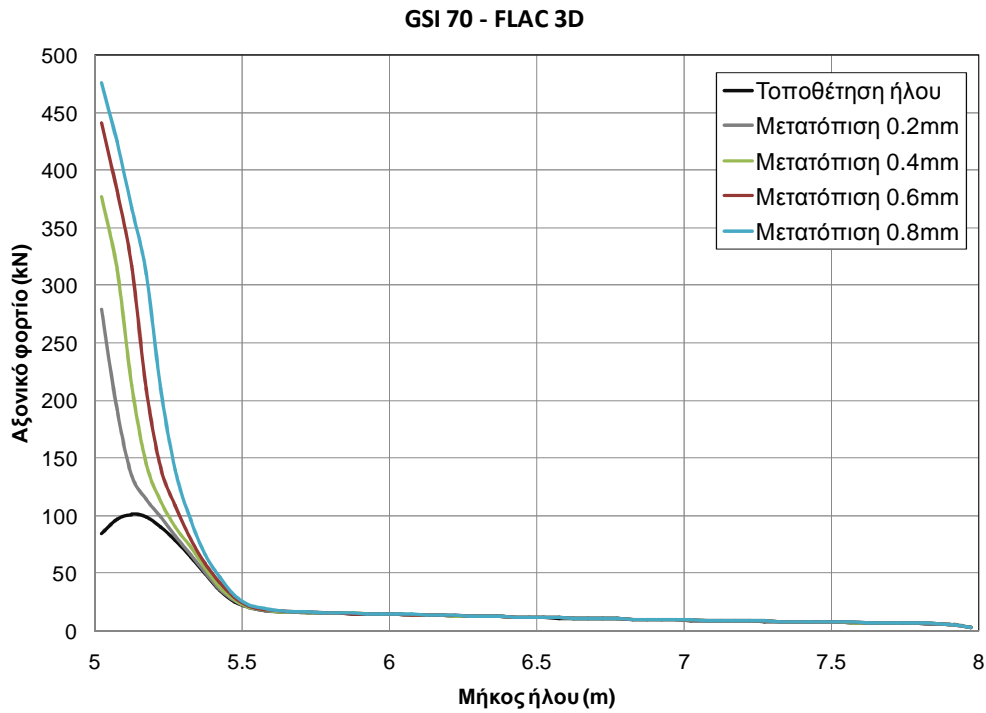
Σχήμα 135 Διάγραμμα κατανομής διαμητρικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=90.



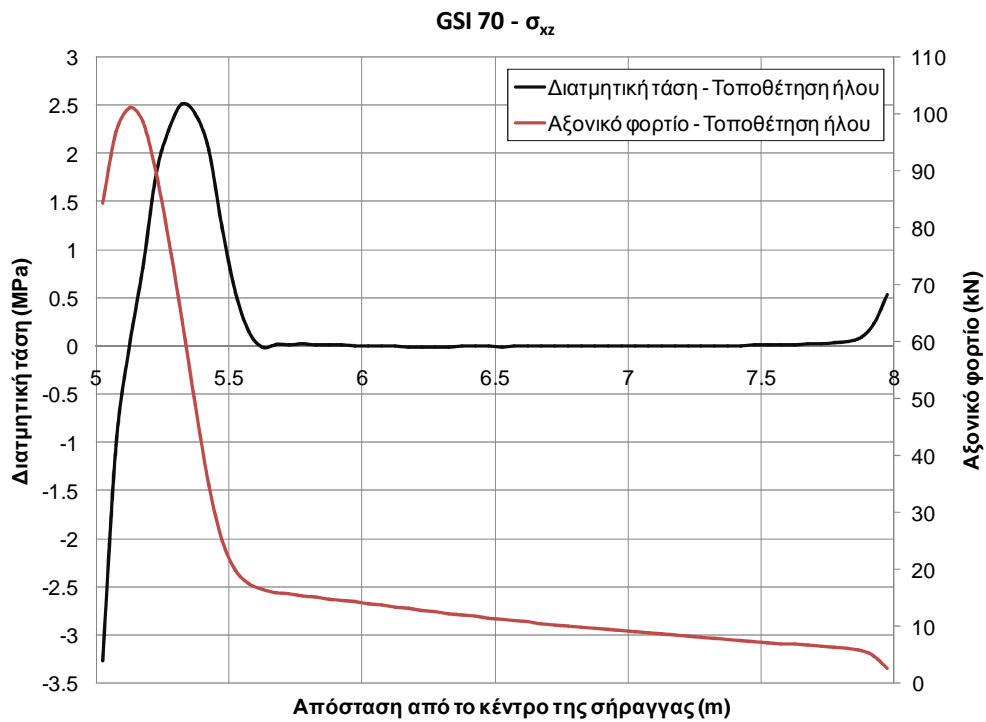
Σχήμα 136 Διάγραμμα κατανομής διασμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  κατά την εξόλκευση του ήλου - GSI=90.



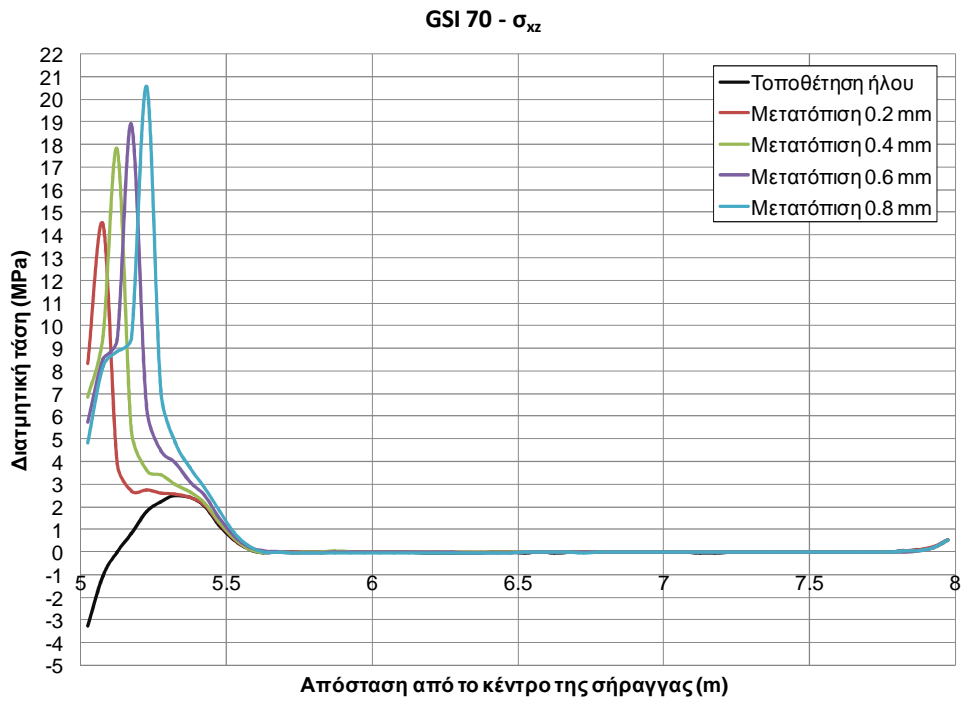
Σχήμα 137 Διάγραμμα κατανομής διασμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  κατά την εξόλκευση του ήλου - GSI=90.



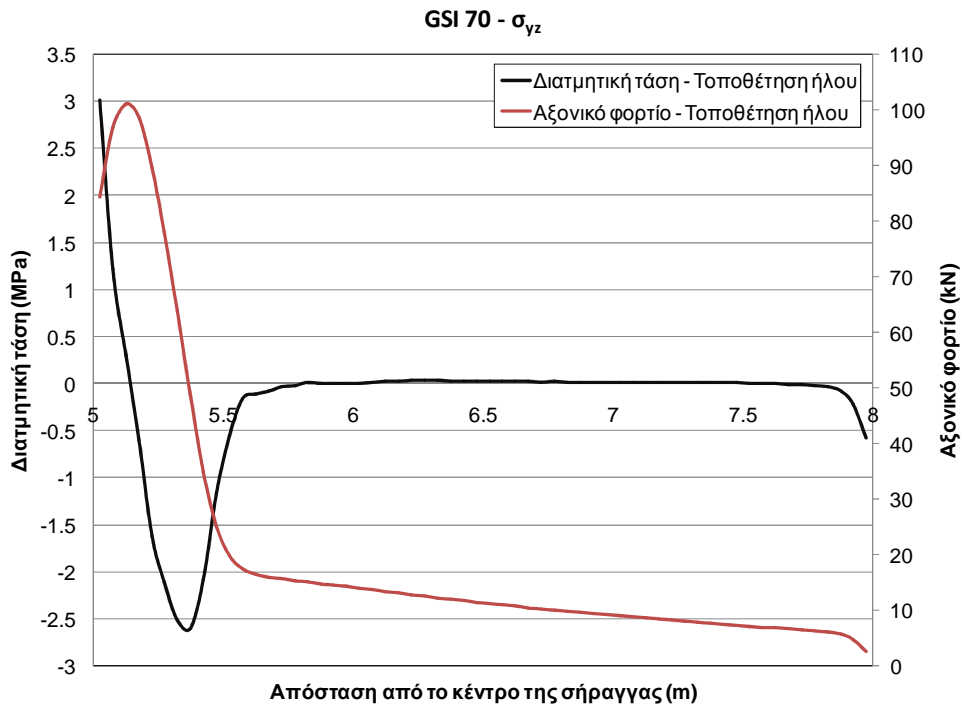
**Σχήμα 138 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=70.**



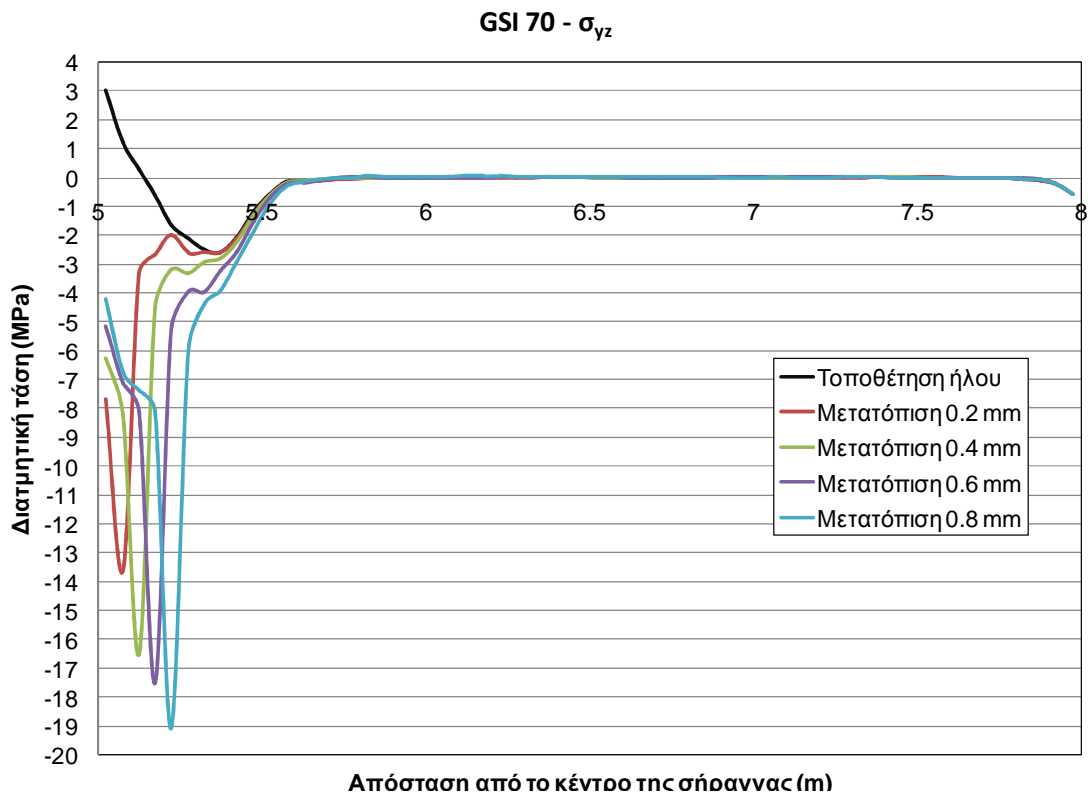
**Σχήμα 139 Κατανομή διατμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=70.**



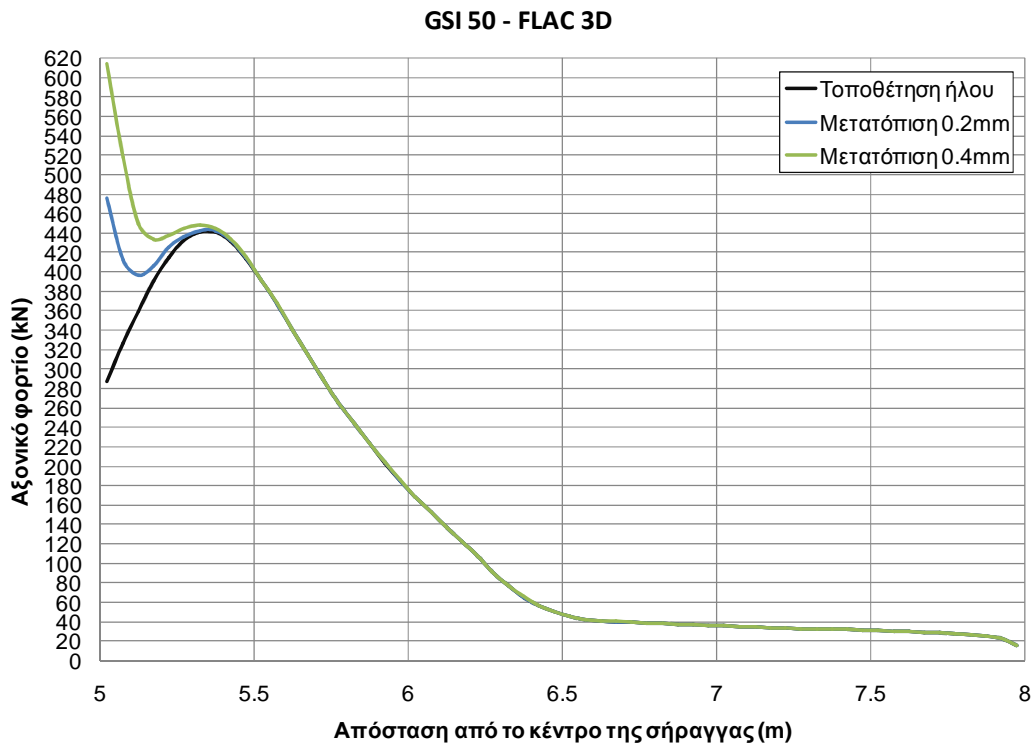
Σχήμα 140 Κατανομή διατμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε διάφορες μετατοπίσεις - GSI=70.



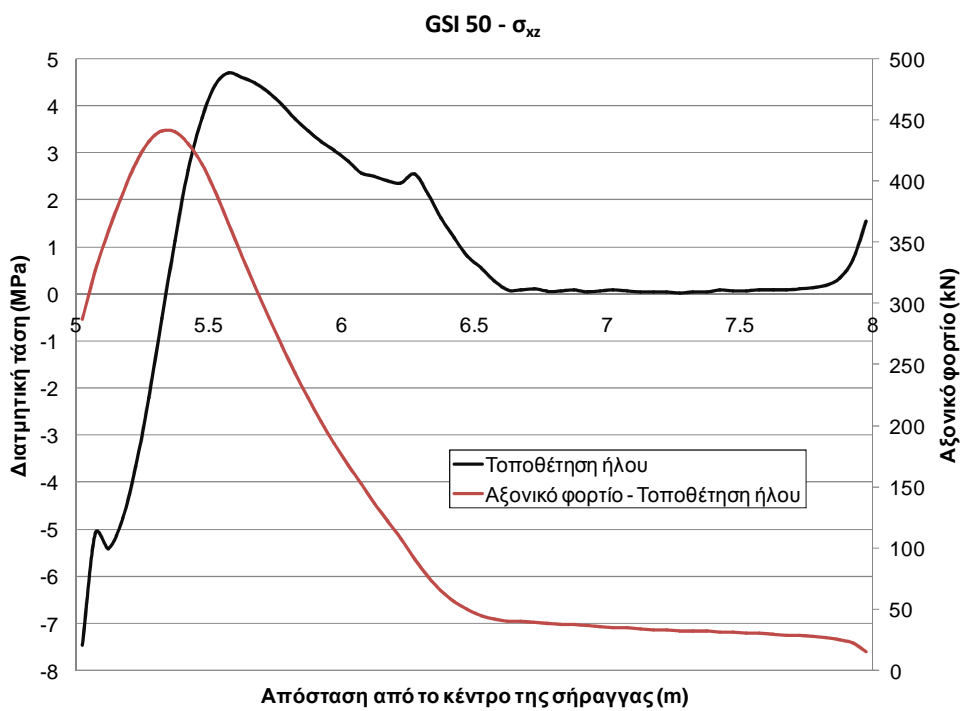
Σχήμα 141 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=70.



Σχήμα 142 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε διάφορες μετατοπίσεις - GSI=70.

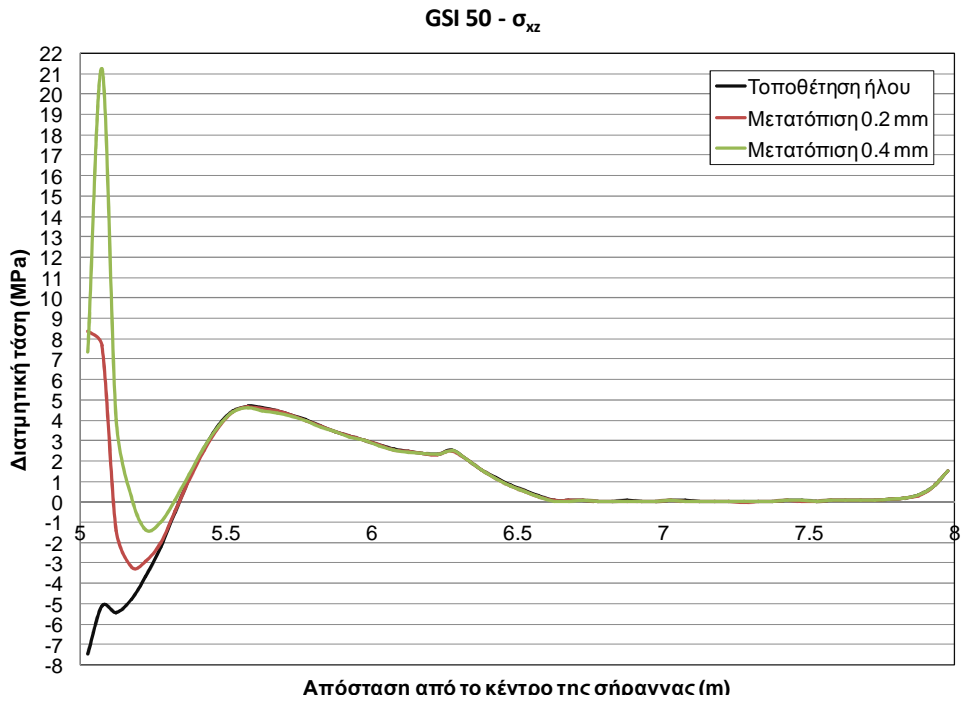


Σχήμα 143 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI=50.

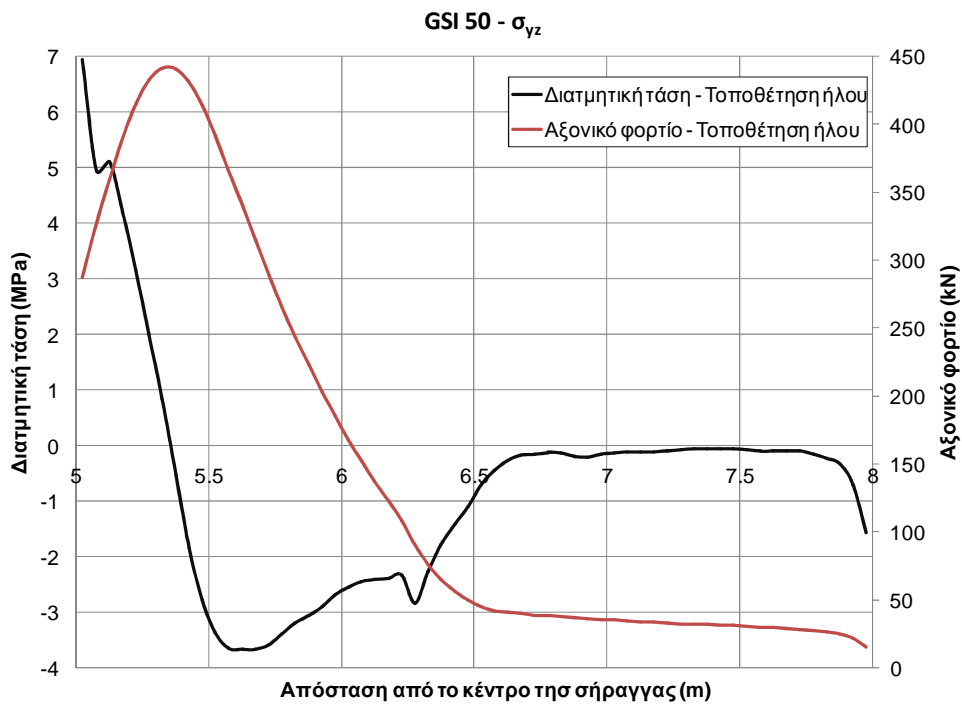


Σχήμα 144 Κατανομή διατμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=50.

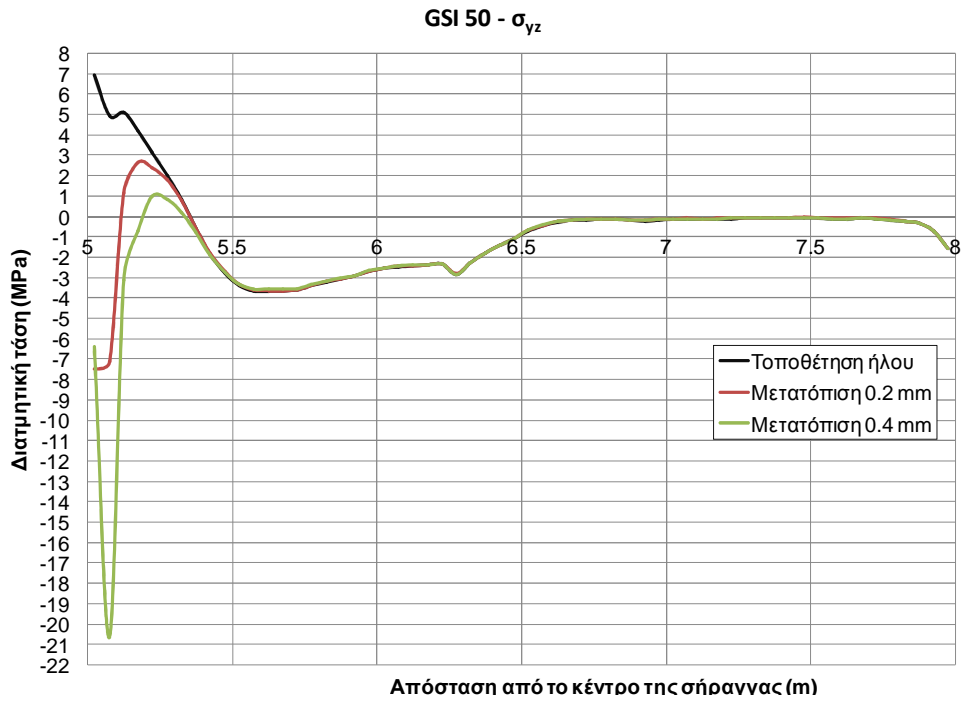




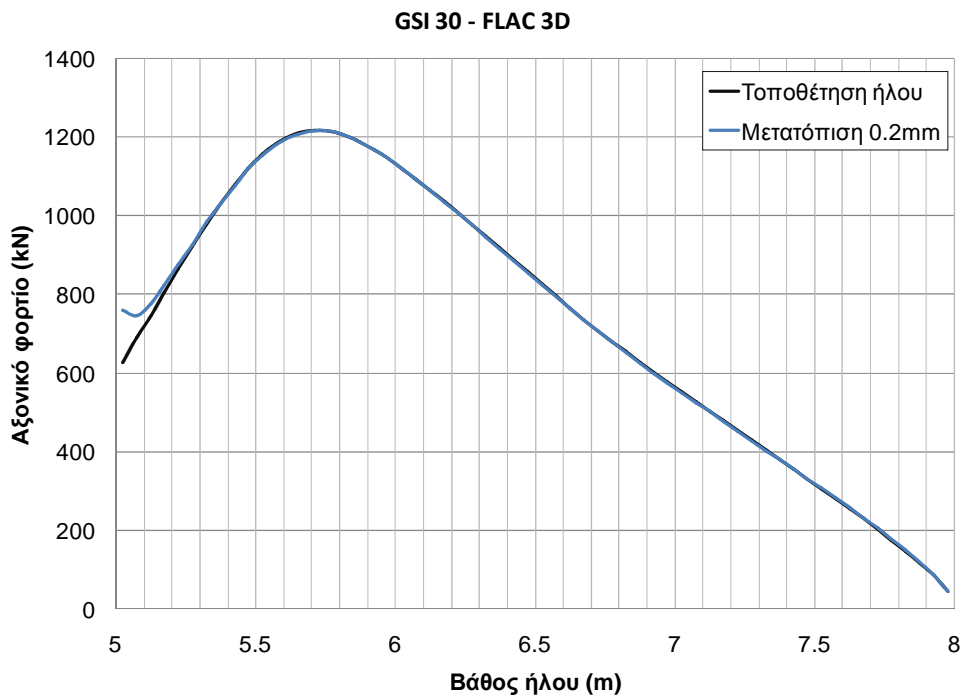
Σχήμα 145 Κατανομή διατμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε μετατόπιση 0.2mm και 0.4mm - GSI=50.



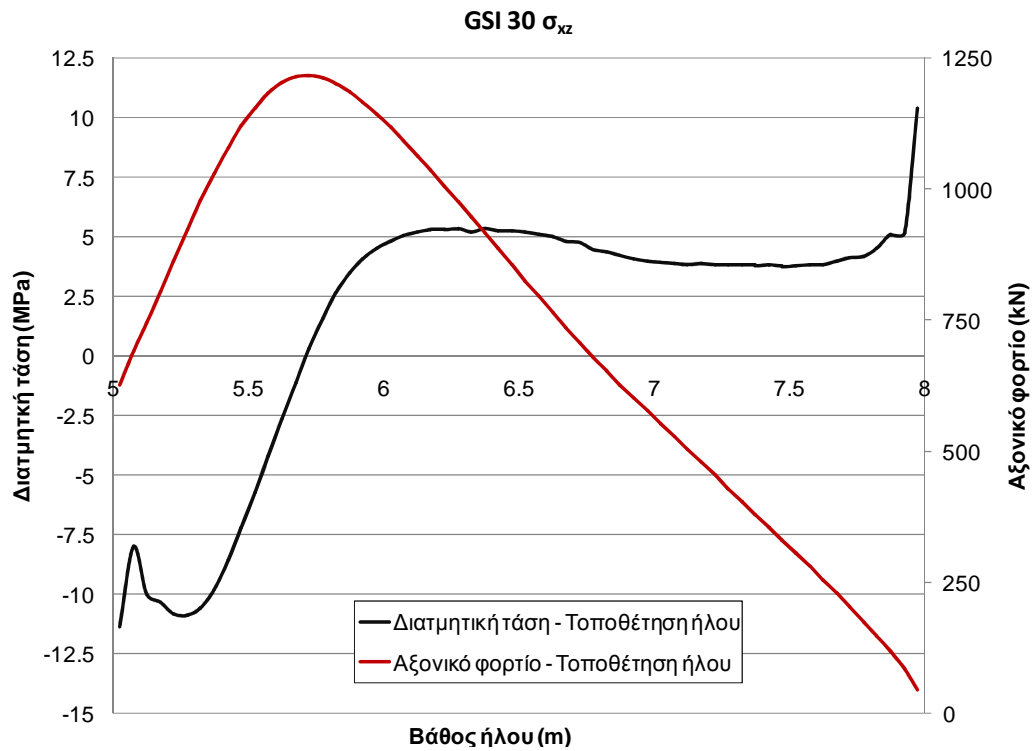
Σχήμα 146 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=50.



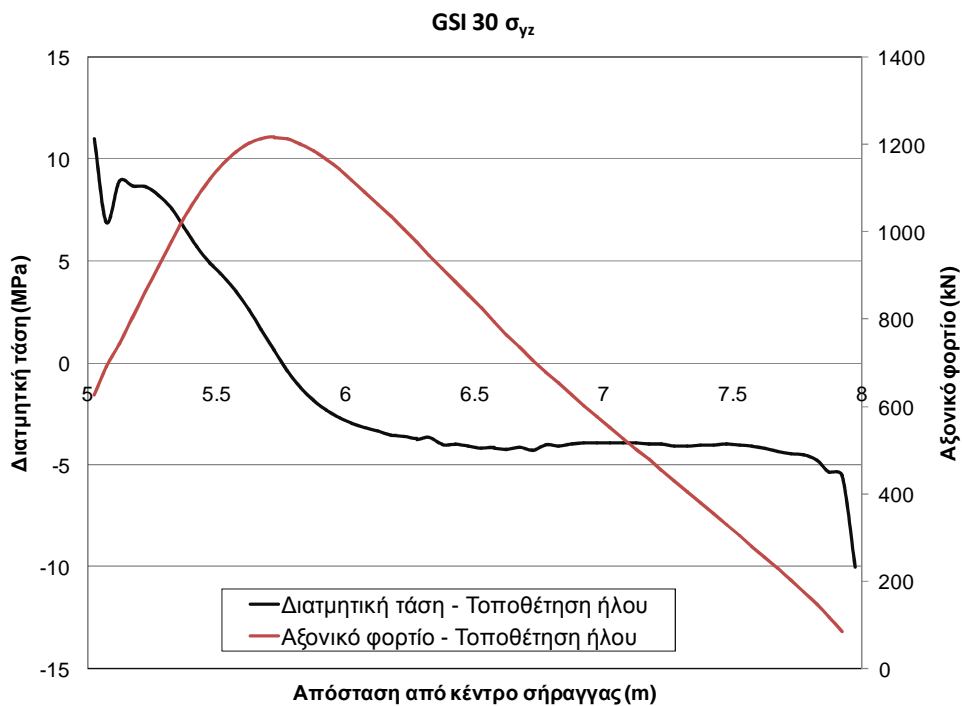
Σχήμα 147 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε μετατόπιση 0.2 mm και 0.4 mm - GSI=50.



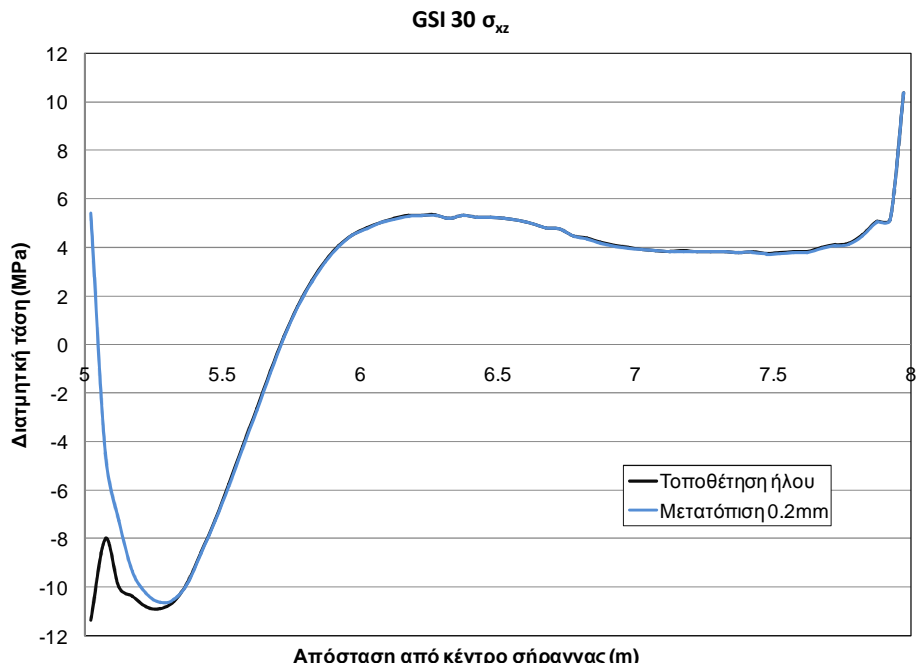
Σχήμα 148 Κατανομή αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου και κατά την εξόλκευση σε πέτρωμα με GSI 30.



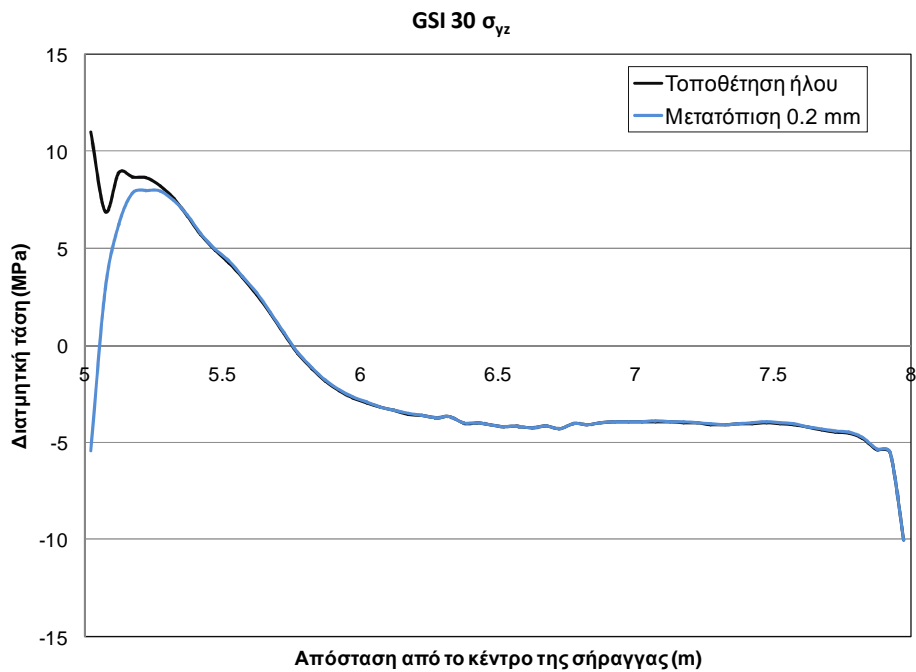
Σχήμα 149 Κατανομή διατμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=30.



Σχήμα 150 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=30.



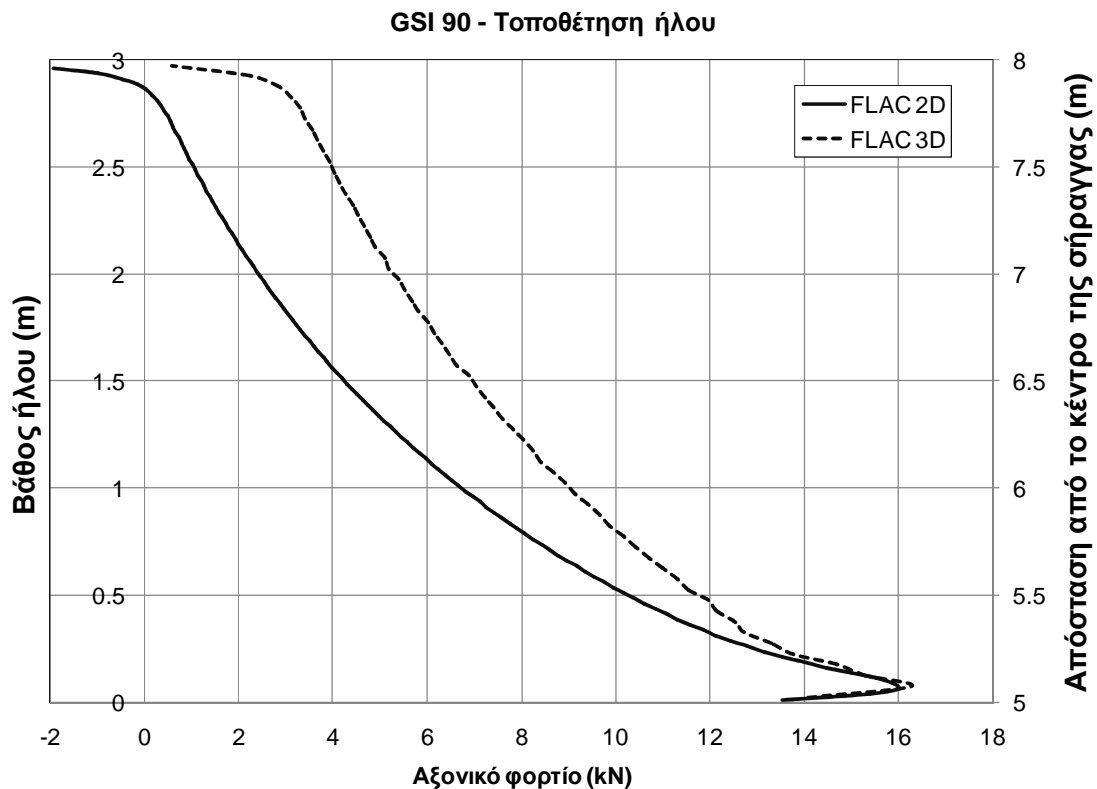
Σχήμα 151 Κατανομή διατμητικής τάσης  $\sigma_{xz}$  κατά την τοποθέτηση του ήλου και σε μετατόπιση ίση με 0.2mm - GSI=30.



Σχήμα 152 Διάγραμμα κατανομής διατμητικής τάσης  $\sigma_{yz}$  και αξονικού φορτίου κατά την τοποθέτηση του ήλου - GSI=30.

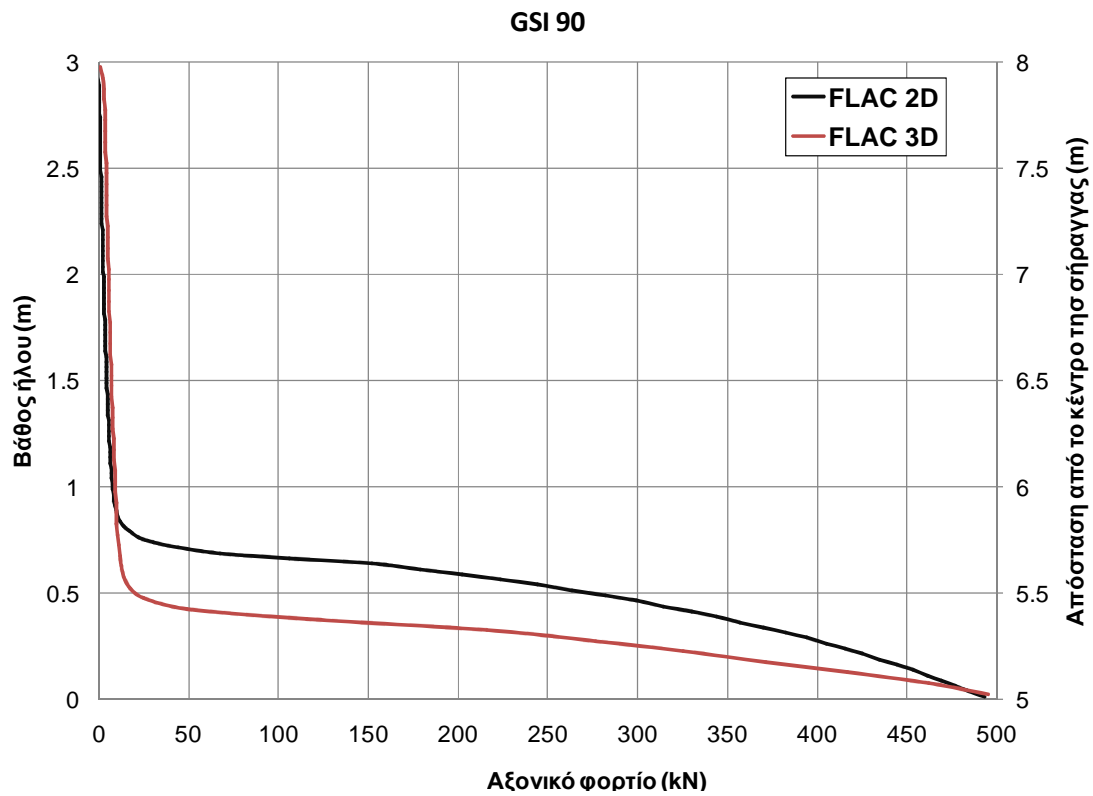
#### 4.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων FLAC<sup>2D</sup> και FLAC<sup>3D</sup>

Στα επόμενα διαγράμματα συγκρίνεται η κατανομή του αξονικού φορτίου και της διατμητικής τάσης για τις τέσσερις τιμές GSI κατά το στάδιο της τοποθέτησης του ήλου όπως αυτή προέκυψε από το FLAC<sup>2D</sup> και FLAC<sup>3D</sup> αλλά και κατά το στάδιο όπου προσεγγίζεται η τιμή της φέρουσας ικανότητας του ήλου σύμφωνα με το FLAC<sup>3D</sup> με το αντίστοιχο στάδιο στο FLAC<sup>2D</sup>.



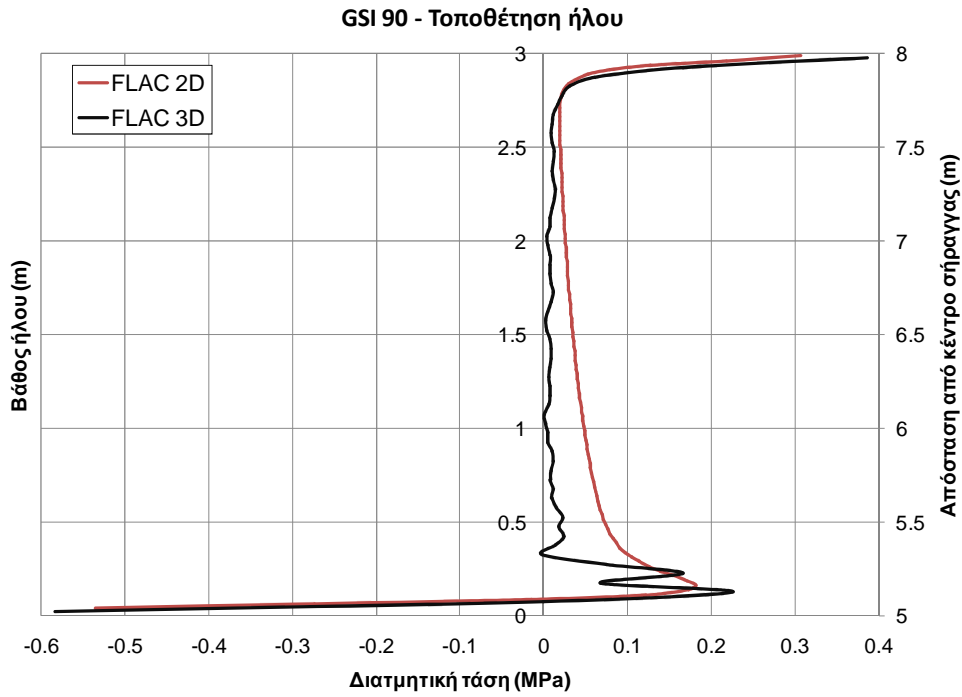
Σχήμα 153 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του και για πέτρωμα με GSI=90.

Παρατηρείται πως όταν η ποιότητα του πετρώματος είναι καλή, στο στάδιο της τοποθέτησης του ήλου η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου σχεδόν ταυτίζεται και στα δύο μοντέλα και εμφανίζεται και στο ίδιο βάθος εντός του ήλου.

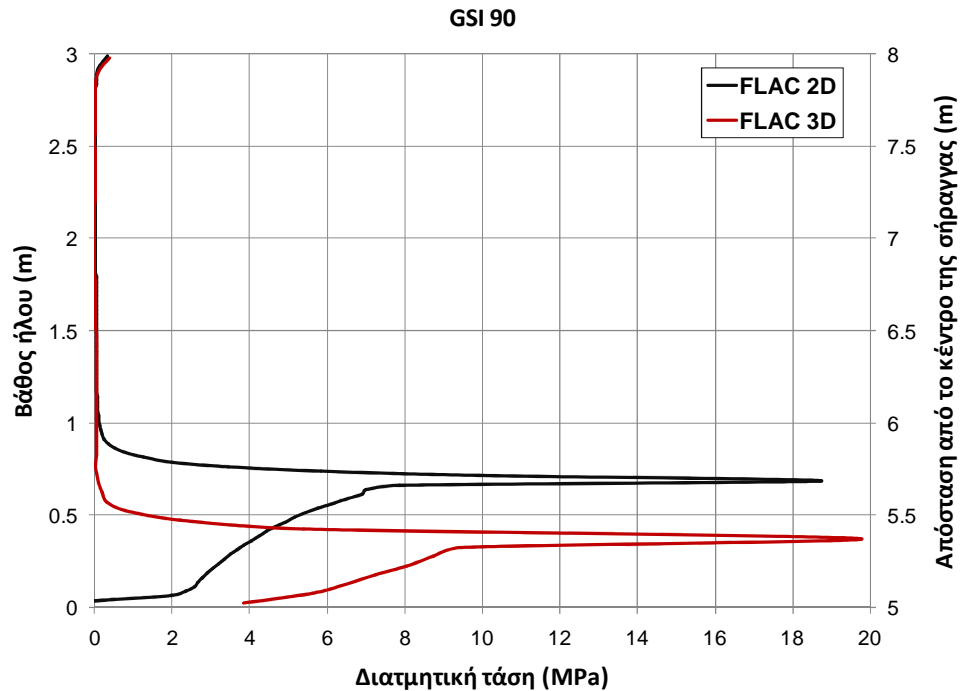


Σχήμα 154 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου ίσο με 500 kN κατά μήκος ήλου 3m - Πέτρωμα με GSI=90.

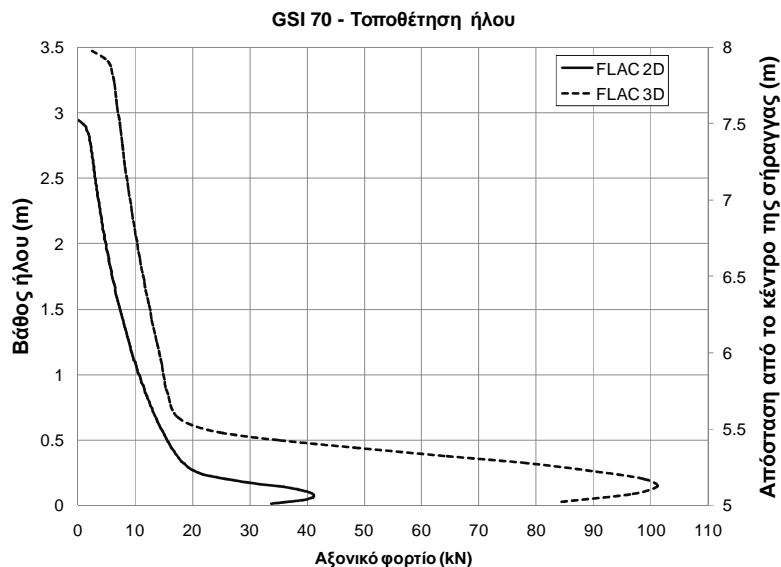
Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN παρατηρείται πως στο ίδιο βάθος του ήλου μεταφέρεται λιγότερο φορτίο στο τριδιάστατο μοντέλο.



Σχήμα 155 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=90.

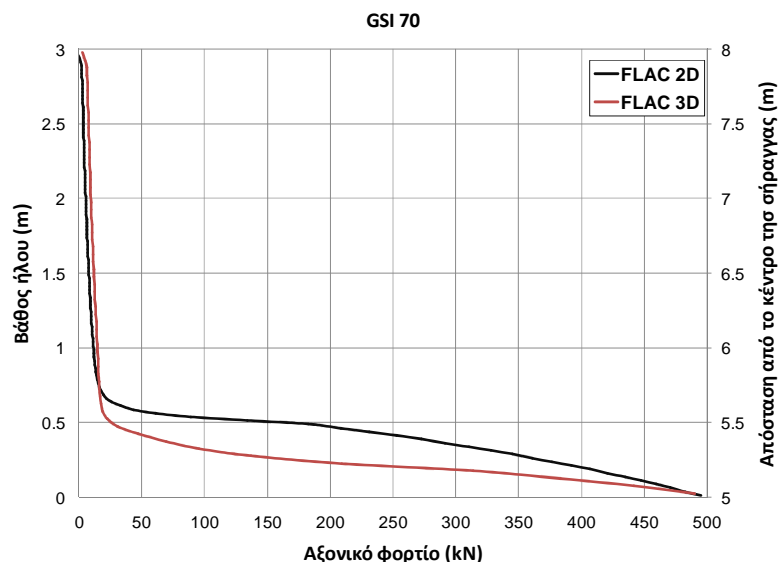


Σχήμα 156 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN - πέτρωμα με GSI=90.



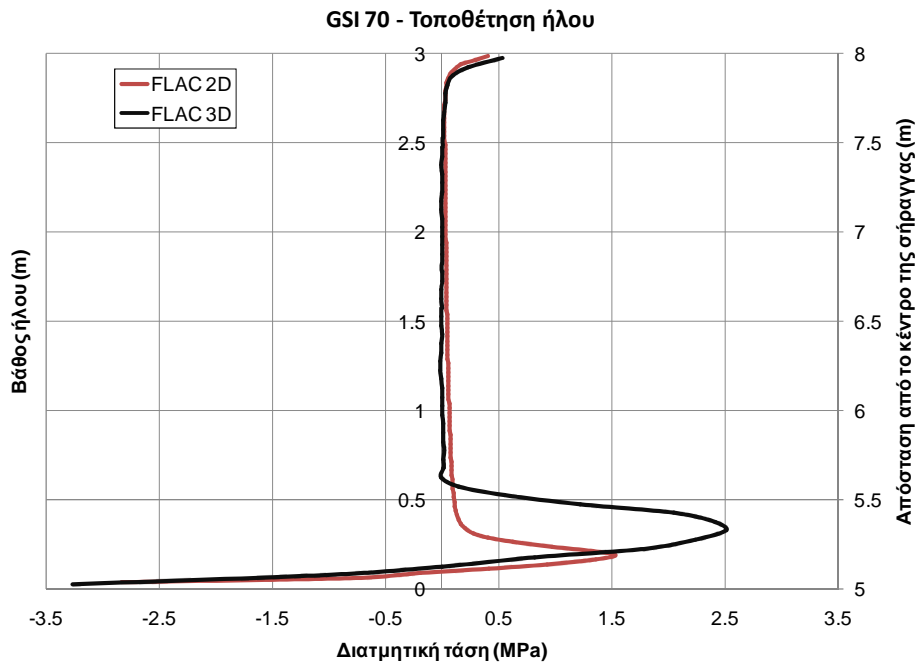
Σχήμα 157 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του και για πέτρωμα με GSI=70.

Παρατηρείται πως όταν το πέτρωμα έχει GSI=70, στο στάδιο της τοποθέτησης του ήλου η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου είναι 2.46 φορές μεγαλύτερη στο τριδιάστατο μοντέλο. Η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου εμφανίζεται στο ίδιο βάθος του ήλου. Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN παρατηρείται πως στο ίδιο βάθος του ήλου μεταφέρεται λιγότερο φορτίο στο τριδιάστατο μοντέλο.

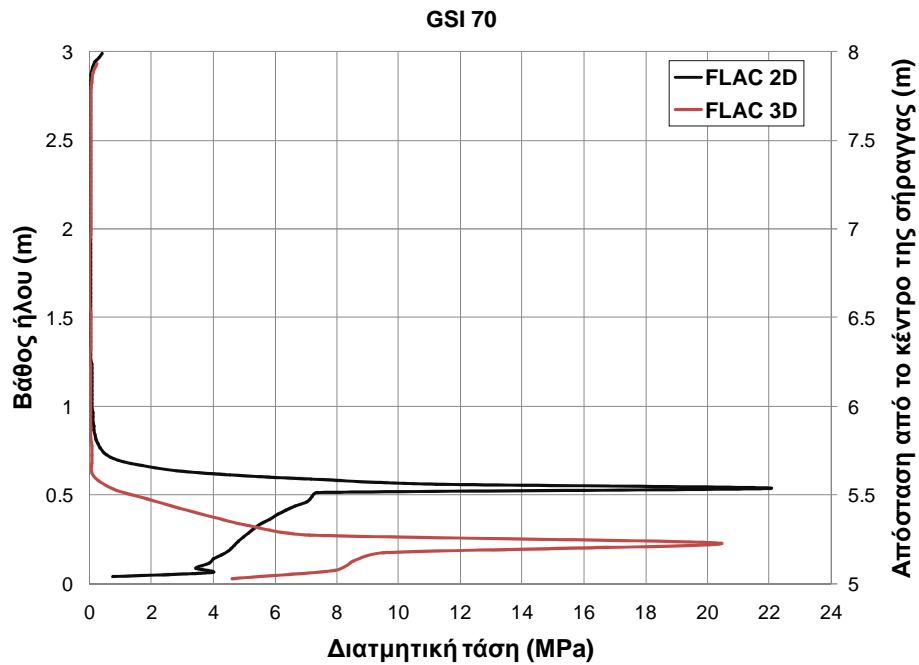


Σχήμα 158 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου ίσο με 500 kN κατά μήκος ήλου 3m - Πέτρωμα με GSI=70.



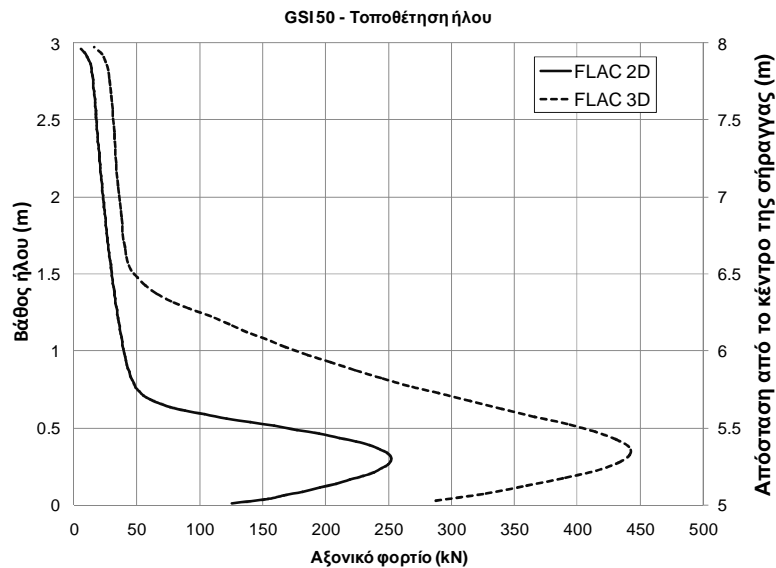


Σχήμα 159 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=70.

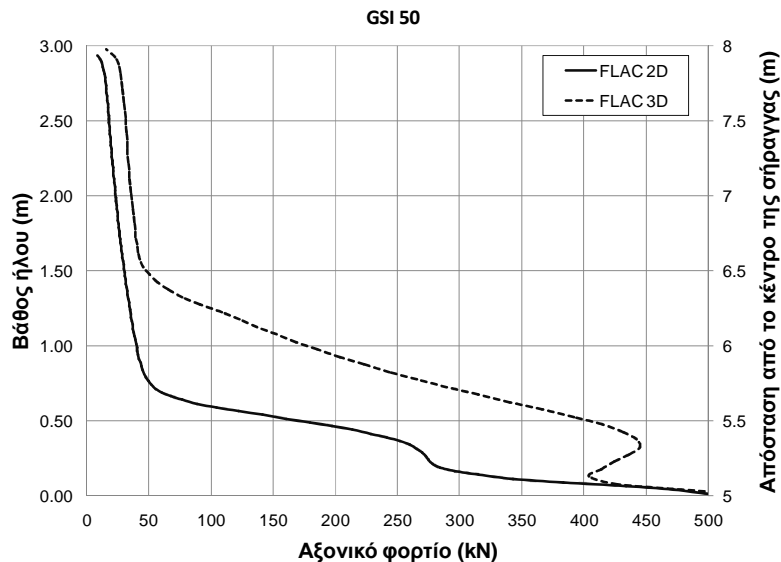


Σχήμα 160 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διατμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN - πέτρωμα με GSI=70.

Παρατηρείται πως όταν το πέτρωμα έχει  $GSI=50$ , στο στάδιο της τοποθέτησης του ήλου η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου είναι 1.7 φορές μεγαλύτερη στο τριδιάστατο μοντέλο και η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου εμφανίζεται στο ίδιο βάθος. Όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN παρατηρείται πως στο ίδιο βάθος του ήλου μεταφέρεται λιγότερο φορτίο στο τριδιάστατο μοντέλο.

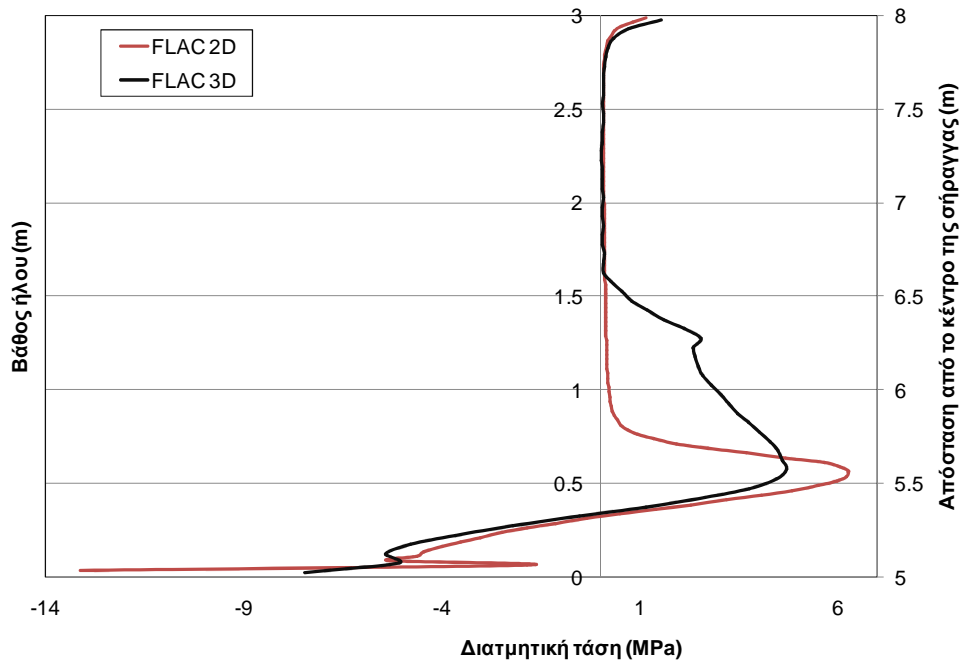


Σχήμα 161 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτησή του - πέτρωμα με  $GSI=50$ .



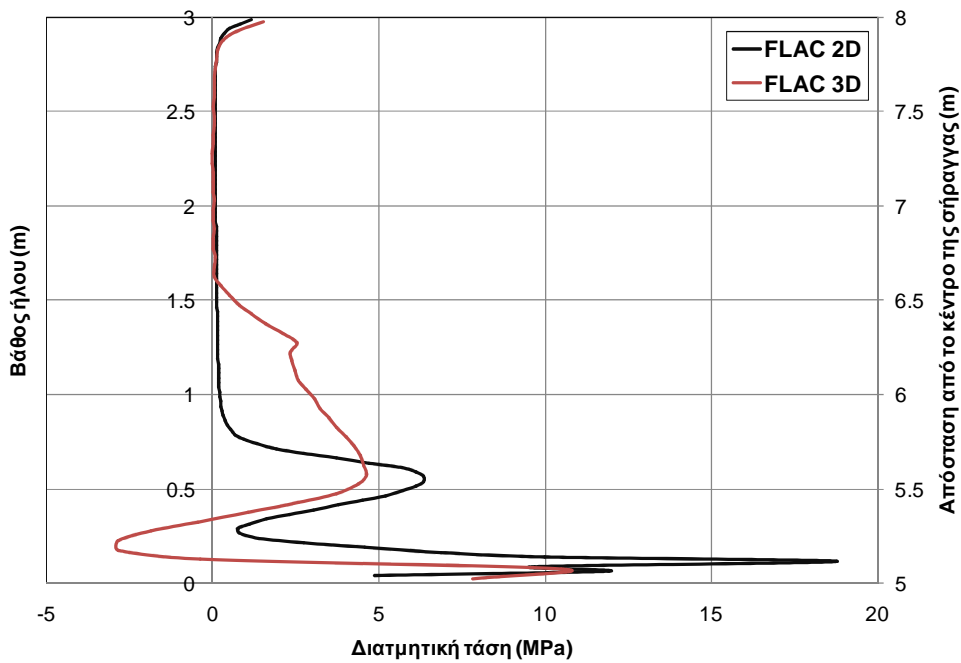
Σχήμα 162 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίου ίσο με 500 kN κατά μήκος ήλου 3m - πέτρωμα με  $GSI=50$ .

GSI 50 - Τοποθέτηση ήλου

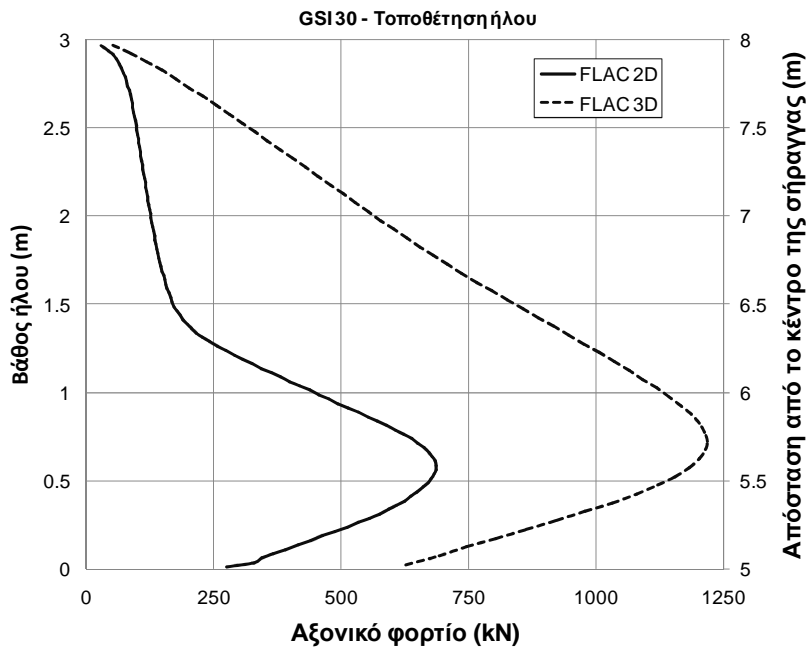


Σχήμα 163 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίο κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του - πέτρωμα με GSI=50.

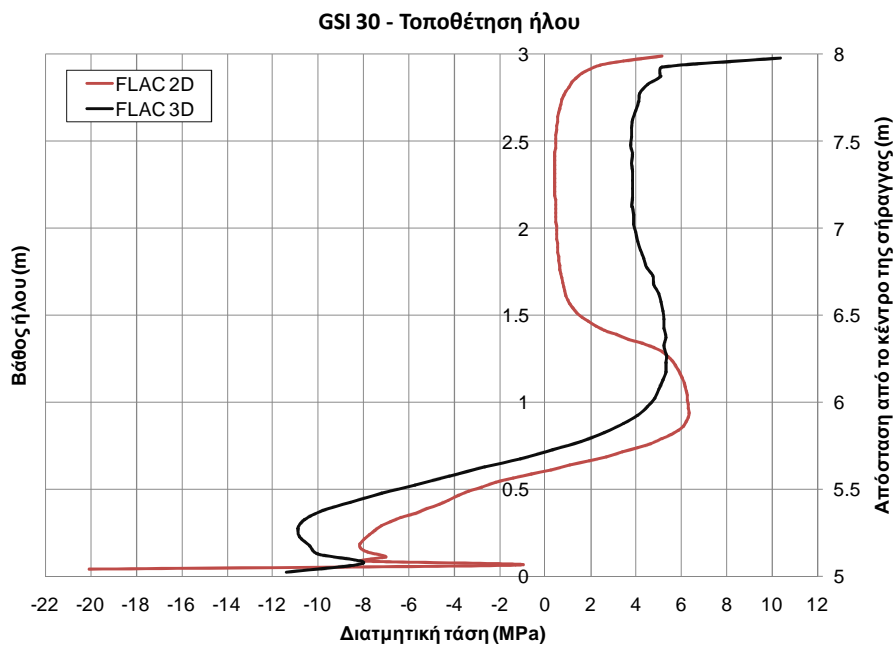
GSI 50



Σχήμα 164 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διαμητρικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m όταν το αξονικό φορτίο είναι ίσο με 500 kN - πέτρωμα με GSI=50.



Σχήμα 165 Σύγκριση καμπύλων κατανομής αξονικού φορτίο κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση του και για πέτρωμα με GSI 30.



Σχήμα 166 Σύγκριση καμπύλων κατανομής διαμητικής τάσης κατά μήκος ήλου 3m κατά την τοποθέτηση των 0.4mm - πέτρωμα με GSI=30.

Παρατηρείται πως και στα δύο μοντέλα όταν  $GSI=30$  ο ήλος διαρρέει από την τοποθέτηση του και σύμφωνα με το τριδιάστατο μοντέλο η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου είναι 1.8 φορές η τιμή που προκύπτει από το διδιάστατο μοντέλο.

Τέλος, παρατηρείται πως στο στάδιο της τοποθέτησης του ήλου η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη στα διδιάστατα μοντέλα από ότι στα τριδιάστατα μοντέλα. Αυτό συμβαίνει διότι με το  $FLAC^{2D}$  προσομοιώνεται ήλος σε σφαιρικό άνοιγμα που αντιστοιχεί σε ήλο κοντά στο μέτωπο σήραγγας, ενώ με το  $FLAC^{3D}$  προσομοιώνεται ήλος που βρίσκεται σε κυλινδρική σήραγγα και βρίσκεται μακριά από το μέτωπο της σήραγγας.

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τους Carranza-Torres & Fairhurst (2000), ο ήλος φορτίζεται κατά την προχώρηση, επομένως η αξονική δύναμη στον ήλο κοντά στο μέτωπο είναι μικρότερη καθώς είναι μικρότερη η μετατόπιση που την προκαλεί.

	$FLAC^{2D}$		$FLAC^{3D}$	
	Στάδιο τοποθέτησης ήλου		Στάδιο τοποθέτησης ήλου	
<b>GSI</b>	<b>Μέγιστο αξονικό φορτίο (kN)</b>	<b>Βάθος εμφάνισης μέγιστου αξονικού φορτίου (m)</b>	<b>Μέγιστο αξονικό φορτίο (kN)</b>	<b>Βάθος εμφάνισης μέγιστου αξονικού φορτίου (m)</b>
<b>90</b>	<b>16</b>	<b>0.06</b>	<b>16.3</b>	<b>0.08</b>
<b>70</b>	<b>41</b>	<b>0.08</b>	<b>101</b>	<b>0.13</b>
<b>50</b>	<b>252</b>	<b>0.31</b>	<b>441</b>	<b>0.38</b>
<b>30</b>	<b>686</b>	<b>0.59</b>	<b>1220</b>	<b>0.73</b>

Πίνακας 10 Σύγκριση μέγιστου αξονικού φορτίου και βάθους εμφάνισης αυτού στα διδιάστατα και τριδιάστατα μοντέλα.



## 5 Συμπεράσματα

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας αυτής έγινε σύγκριση δύο αξονοσυμμετρικών μοντέλων προσομοίωσης εξόλκευσης. Το πρώτο μοντέλο των Nitzsche και Haas (1976) είχε επιλυθεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ το δεύτερο επιλύθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών κάνοντας χρήση του προγράμματος FLAC<sup>2D</sup> V 6.0. Διαπιστώθηκε πως και με τις δύο μεθόδους επίλυσης είχαμε τα ίδια αποτελέσματα όσον αφορά την κατανομή αξονικού φορτίου.

Στην συνέχεια, έγινε διερεύνηση για το αν και κατά πόσο επηρεάζει το μέγεθος της πλάκας στήριξης την κατανομή του φορτίου κατά μήκος του ήλου. Παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνεται το μέγεθος της πλάκας στήριξης, ελαφρώς μεγαλύτερο φορτίο μεταφέρεται στο ίδιο βάθος εντός του ήλου. Επομένως, προτιμώνται πλάκες μεγάλου μεγέθους έτσι ώστε να μεταφέρονται δυνάμεις σε μεγαλύτερος βάθος.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως όταν η πλάκα στήριξης προσομοιώνεται με δέσμευση των κόμβων που αντιστοιχούν στην εκάστοτε ακτίνα της πλάκας, η τιμή του αξονικού φορτίου καθώς και το βάθος επίδρασης του δεν επηρεάζεται από το εύρος των δεσμευμένων κόμβων.

Επίσης, όσον αφορά την επίδραση του μέτρου ελαστικότητας του ενέματος, παρατηρήθηκε πως για το ίδιο μέτρο ελαστικότητας η αύξηση του πάχους του ενέματος, οδηγεί σε αύξηση του βάθους μεταφοράς δυνάμεων στον ήλο. Ακόμη, όταν το ένεμα έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας το φορτίο που μεταφέρεται στο ίδιο βάθος του ήλου είναι μεγαλύτερο.

Στο δεύτερο στάδιο, κατασκευάστηκε αξονοσυμμετρικό μοντέλο το οποίο προσέγγισε το μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης της εφαρμογής του FLAC με τίτλο «Simulation of Pull-Tests for Grouted Cable Anchors».

Στο τρίτο στάδιο, μελετήθηκε η εξόλκευση σε αφόρτιστο πέτρωμα όπου κατασκευάστηκαν 33 μοντέλα. Στα μοντέλα αυτά ο ήλος έχει μήκος 3m και διάμετρο 25mm. Το ένεμα έχει πάχος 11.5 mm. Το πέτρωμα είχε GSI ίσο με 50. Στις παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν το ένεμα είχε τις ιδιότητες που αντιστοιχούν σε αναλογία νερού/τσιμέντου (w/c) 0.32, 0.41 και 0.52. Έγιναν έξι παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες εξετάστηκε:

- η επίδραση της παραμένουσας συνοχής του ενέματος,
- η επίδραση της γωνίας τριβής του ενέματος,

- η επίδραση της συνοχής του ενέματος,
- η επίδραση του δείκτη  $m_i$  του πετρώματος και
- η επίδραση της τιμής του GSI του πετρώματος.

Αναλυτικότερα, όσον αφορά την επίδραση της παραμένουσας συνοχής του ενέματος διαπιστώθηκε ότι για την ίδια ποιότητα ενέματος η μείωση της (παραμένουσας συνοχής), οδηγεί σε αύξηση του μέγιστου αξονικού φορτίου κατά μήκος του ήλου καθώς και σε αύξηση του βάθους μέχρι το οποίο μεταβιβάζονται δυνάμεις. Η συμπεριφορά αυτή γίνεται εντονότερη καθώς αυξάνεται ο λόγος νερού/τσιμέντου (w/c). Με την αύξηση του λόγου w/c η μέγιστη διατμητική τάση στο ένεμα μειώνεται και το βάθος εμφάνισης της αυξάνεται. Ομοίως αυξάνεται και το βάθος διάδοσης της. Επιπλέον, το βάθος διαρροής του ενέματος αυξάνεται όταν η παραμένουσα συνοχή μειώνεται και όταν ο λόγος w/c αυξάνεται.

Όσον αφορά την επίδραση της γωνίας τριβής του ενέματος παρατηρήθηκε ότι καθώς μειώνεται η γωνία τριβής, για διαφορετικούς λόγους w/c, αυξάνεται το βάθος μεταφοράς δυνάμεων και μειώνεται η μέγιστη διατμητική τάση. Για τον ίδιο λόγο w/c το βάθος εμφάνισης της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης αυξάνεται. Επίσης, όταν μειώνεται η γωνία τριβής αυξάνεται το βάθος διαρροής του ενέματος.

Όσον αφορά την συνοχή του ενέματος, αυτή επηρεάζει το βάθος μεταφοράς δυνάμεων μόνο όταν το ένεμα είναι κακής ποιότητας και προκαλεί αύξηση της τιμής του αξονικού φορτίου για το ίδιο βάθος. Επίσης, μείωση της συνοχής προκαλεί αύξηση του βάθους εμφάνισης της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης.

Ακόμη, όσον αφορά την επίδραση της παραμέτρου  $m_i$ , παρατηρήθηκε πως όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του πετρώματος τόσο αυξάνεται το βάθος διαρροής του ενέματος. Ακόμη για τον ίδιο συντελεστή  $m_i$  όσο αυξάνεται ο λόγος w/c αυξάνεται το βάθος εμφάνισης της μέγιστης τιμής της διατμητικής τάσης και μειώνεται το αξονικό φορτίο.

Τέλος, παρατηρήθηκε πως όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του πετρώματος τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διαρροής του ενέματος για διάφορους λόγους w/c.

Στο τελευταίο στάδιο, κατασκευάστηκαν αξονοσυμμετρικά μοντέλα εξόλκευσης ήλου για τέσσερα διαφορετικής ποιότητας πετρώματα (GSI 90, 70, 50 και 30). Τα μοντέλα αυτά μελετήθηκαν και με το πρόγραμμα FLAC<sup>2D</sup> και με το FLAC<sup>3D</sup>.

Όταν το πέτρωμα είναι καλής ποιότητας (GSI=90) τα αποτελέσματα του τριδιάστατου μοντέλου όσον αφορά την μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου στο στάδιο της τοποθέτησης του ήλου σχεδόν ταυτίζονται με αυτά που προέκυψαν από το διδιάστατο



μοντέλο. Στις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, η μέγιστη τιμή του αξονικού φορτίου σύμφωνα με το τριδιάστατο μοντέλο ήταν μεγαλύτερη από την τιμή που πρόεκυψε από το διδιάστατο. Αυτό συμβαίνει διότι με το FLAC<sup>2D</sup> προσομοιώνεται ήλος σε σφαιρικό άνοιγμα που αντιστοιχεί σε ήλο κοντά στο μέτωπο σήραγγας, ενώ με το FLAC<sup>3D</sup> προσομοιώνεται ήλος που βρίσκεται σε κυλινδρική σήραγγα και βρίσκεται μακριά από το μέτωπο της σήραγγας. Κατά τους Carranza-Torres & Fairhurst (2000), ο ήλος φορτίζεται κατά την προχώρηση, επομένως η αξονική δύναμη στον ήλο κοντά στο μέτωπο είναι μικρότερη καθώς είναι μικρότερη η μετατόπιση που την προκαλεί.

Επιπλέον, οι μετατοπίσεις κατά τις οποίες το φορτίο έφτανε να έχει την τιμή της φέρουσας ικανότητας του ήλου ήταν πολύ μικρότερες σύμφωνα με το τριδιάστατο μοντέλο. Τέλος, και τα δύο μοντέλα, τριδιάστατο και διδιάστατο, έδειξαν πως σε κακής ποιότητας πέτρωμα ο ήλος φορτίζεται σημαντικά.



## Βιβλιογραφία

- Οικονομόπουλος Ι.Ν., Κορωνάκης Ν.Ι., (1991). «Δοκιμές ελέγχου και μετρήσεις προς διαπίστωση της συμπεριφοράς συστημάτων κοχλίωσης της οροφής», Ορυκτός Πλούτος, Τεύχος 75.
- Ρόζος Δ., (2007). *Μέθοδοι Βελτίωσης – Αντιστήριξης Εδάφους – Υπεδάφους*. Αθήνα.
- Παπασπύρου Σ., (1985). *Αγκυρώσεις*. Αθήνα.
- Σοφιανός Α.Ι., (2008). *Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων*. Αθήνα.
- Buys B.J., Heyns P. S. and Loveday P.W., (2008). *Rock bolt condition monitoring using ultrasonic guided waves*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Cai Y., Esaki T., Jiang Y. (2004). “An analytical model to predict axial load in grouted rock bolt for soft rock tunneling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 19, Issue 6, Pages 607-618.
- Cai Y., Esaki T., Jiang Y. (2004). “A rock bolt and rock mass interaction model”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 41, Issue 7, Pages 1055-1067
- Carranza-Torres C., (2009). “Analytical and Numerical Study of the Mechanics of Rockbolt Reinforcement around Tunnels in Rock Masses.
- Douglas T.H., Arthur L.J., (1983), *A guide to the use of rock reinforcement in underground excavations*, CIRIA, Report 101, London.
- Hoek E., (2007). *Practical Rock Engineering*, Chapter 14 - Rockbolts and cables.
- Itasca, *FLAC2D Manual*, V. 6.0.
- Jing L., Hudson J.A, (2002). “Numerical methods in rock mechanics”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 39, Issue 4, Pages 409-427.
- Li C. C., (2010). “A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 47, Issue 3, Pages 396-404.
- Li. C., Stillborg B., (1999). “Analytical models for rock bolts”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 36, Number 8, pp. 1013-1029.

Littlejohn G. S., (1975). *Rock anchors – state of the art*, Ground Engineering.

Nitzsche R. N., Haas C. J., (1976). “*Installation Induced Stresses for Grouted Roof Bolts*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Volume 13, Issue 1, Pages 17-24.

Stillborg B., (1994). *Professional Users Handbook for Rock Bolting*. 2<sup>nd</sup> edition, Vol. 18, Trans Tech Publications, Germany.