

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΣΟΦΙΑΝΟΣ

Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΑΠΟ:

Υποστήριξη Υπογείων Έργων

Ε.Μ.Π

**Επιλεγμένα Κεφάλαια από:
Υποστήριξη Υπογείων Έργων**

Συγγραφή

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
Φεβρουάριος 2018

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
Κεφάλαιο 2.....	1
1. Ενεργητικοί ήλοι.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Διάκριση με βάση την εσωτερική σύζευξη	4
1.2.1 Πάκτωση με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου (EB= mechanically anchored Expansion Bolt)	4
1.2.2 Πάκτωση με ρητινική κόλλα (RB=Resin rock Bolt)	6
1.3 Πάκτωση, τάνυση, λειτουργία ήλων	8
1.3.1 Εξωτερική σύζευξη	8
1.3.2 Τάνυση και ροπή στρέψης.....	8
1.4 Ενδοτικότητα ήλωσης	10
1.5 Βελτίωση της βραχομάζας λόγω της αντίστασης στη διάτμηση ασυνεχειών	13
1.5.1 Δράση βλήτρου.....	13
1.5.2 Αύξηση ορθής τάσης λόγω προέντασης	15
1.5.3 Διαστολή της ασυνέχειας.....	15
1.5.4 Μήκυνση του ήλου.....	15
1.5.5 Συνιστώσα προέντασης στη διεύθυνση διάτμησης	15
1.5.6 Συνολική δράση	15
1.6 Έλεγχοι.....	17
Βιβλιογραφία/Αναφορές	17
Κριτήρια αξιολόγησης.....	18
Κριτήριο αξιολόγησης 1	18
Απάντηση/Λύση	19
Κριτήριο αξιολόγησης 2	20
Απάντηση/Λύση	20
Κριτήριο αξιολόγησης 3	21
Απάντηση/Λύση	21
Κριτήριο αξιολόγησης 4.....	21
Απάντηση/Λύση	21
Κεφάλαιο 3.....	24
2. Παθητικοί ήλοι	24
2.1 Ακτινικά τοποθετούμενοι ήλοι.....	24
2.1.1 Διάκριση με βάση την εσωτερική σύζευξη	25
2.1.2 Σύζευξη	32
2.2 Δοκίδες προπορείας.....	34

2.2.1	Ράβδοι προπορείας	34
2.2.2	Δοκίδα προπορείας ελαφρού τύπου (SNp=fully grouted Pipe bolt–spile)	35
2.2.3	Δοκίδα προπορείας από διατρητικό ήλο (SDBp=Self-Drilling Pipe Bolt - Spile)	36
2.2.4	Σανίδες προπορείας.....	37
2.3	Κατασκευαστικά θέματα.....	38
2.3.1	Συνήθεις αιτίες αστοχιών	38
2.3.2	Γενικές οδηγίες.....	38
2.3.3	Εξοπλισμός διάτρησης.....	39
2.3.4	Καταλληλότητα ήλων	40
Βιβλιογραφία/Αναφορές		40
Κριτήρια αξιολόγησης.....		42
Κριτήριο αξιολόγησης 1		42
Απάντηση/Λύση		42
Κριτήριο αξιολόγησης 2.....		43
Απάντηση/Λύση		43
Ασκήσεις εμπέδωσης της ύλης		44
Άσκηση 1		44
Άσκηση 2		44
Άσκηση 3		44
Άσκηση 4		44
Κεφάλαιο 4.....		45
3.	Μηχανική του εκτοξευμένου σκυροδέματος.....	45
3.1	Εισαγωγή	45
3.2	Ορισμοί σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-02-00.....	46
3.2.1	Γενικοί.....	46
3.2.2	Παραγόμενο υλικό.....	46
3.2.3	Μέθοδοι κατασκευής	46
3.2.4	Ιδιότητες	47
3.2.5	Δοκιμές.....	48
3.3	Υλικά.....	48
3.3.1	Συνήθη υλικά.....	49
3.3.2	Πρόσμικτα (admixtures)	52
3.4	Μέθοδοι μίξης	56
3.4.1	Ξηρή μέθοδος	56
3.4.2	Υγρή μέθοδος	58
3.4.3	Επιλογή της μεθόδου	62
3.5	Εκτέλεση της εργασίας.....	63
3.5.1	Προετοιμασία υλικών	63

3.5.2	Προετοιμασία επιφάνειας.....	65
3.5.3	Εξοπλισμός	65
3.5.4	Διάστρωση.....	65
3.5.5	Χειρισμός	66
3.5.6	Συντήρηση	68
3.6	Έλεγχος ποιότητας.....	68
3.6.1	Νωπό σκυρόδεμα.....	68
3.6.2	Νεαρό σκυρόδεμα.....	68
3.6.3	Σκληρυμένο σκυρόδεμα.....	70
3.7	Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα.....	71
3.8	Δράσεις.....	73
3.8.1	Αντίσταση στην πτώση τεμαχίων	73
3.8.2	Διάδραση με το πέτρωμα.....	74
	Κανονισμοί-Προδιαγραφές	77
	Βιβλιογραφία/Αναφορές	79
	Κριτήρια αξιολόγησης.....	80
	Ασκήσεις εμπέδωσης	84

Κεφάλαιο 1

Σύνοψη

Η ενεργητική στήριξη του πετρώματος επιτυγχάνεται με γραμμικά, κυρίως μεταλλικά, στοιχεία-ράβδους, τα οποία το ενισχύουν ή το στηρίζουν αναλαμβάνοντας εφελκυστικές δυνάμεις εντός αυτού, συνδέοντας ή/και συμπιέζοντάς το. Αναπτύσσονται οι τύποι των στοιχείων αυτών, η τοποθέτησή τους, η δράση τους και οι έλεγχοί τους.

Προαπαιτούμενη γνώση

Μαθήματα: Μηχανική των πετρωμάτων, Τεχνική Γεωλογία. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Hoek et al. (1995), Stillborg (1994), GT6R4A1 (2014).

1. Ενεργητικοί ήλοι

1.1 Εισαγωγή

Τα πετρώματα είναι υλικά ισχυρά σε θλίψη και ασθενή σε εφελκυσμό και διάτμηση. Η ενίσχυσή τους επιτυγχάνεται, σε αντιστοιχία προς το σκυρόδεμα, με δομικά στοιχεία:

- Οπλισμού, τα οποία του προσδίδουν εφελκυστική και διατμητική αντοχή,
- Προέντασης, που δημιουργεί εσωτερικές θλιπτικές τάσεις.

Με τη δράση τους οι ήλοι συμπλέκουν τη βραχομάζα, αυξάνουν τη διατμητική της αντοχή (Dight, 1982), και μειώνουν τις παραμορφώσεις λόγω ολίσθησης, περιστροφής ή διαρροής. Επίσης, σε σχετικά ογκοτεμαχισμένα πετρώματα αναρτούν τα τεμάχια από βαθύτερα στρώματα.

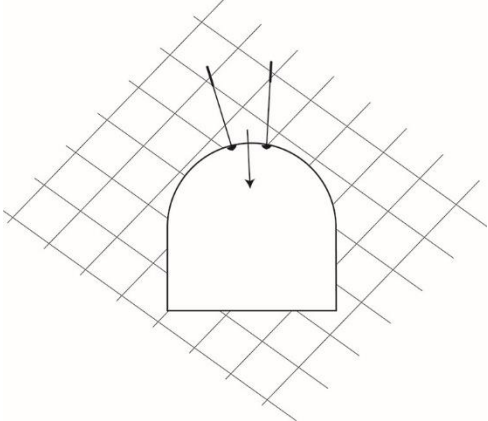
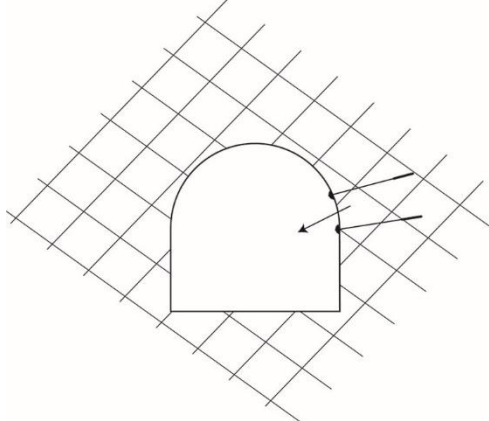
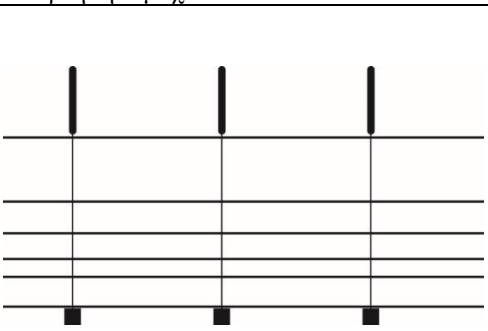
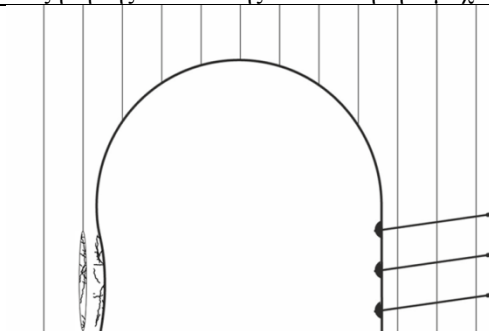
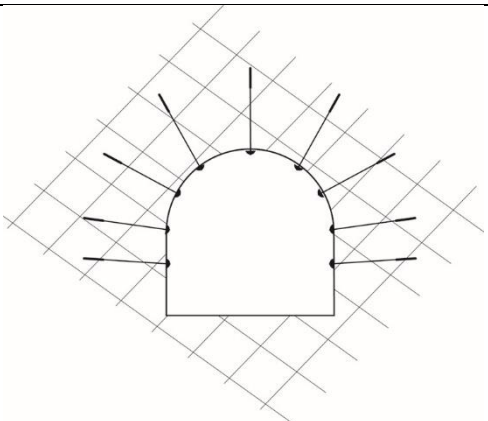
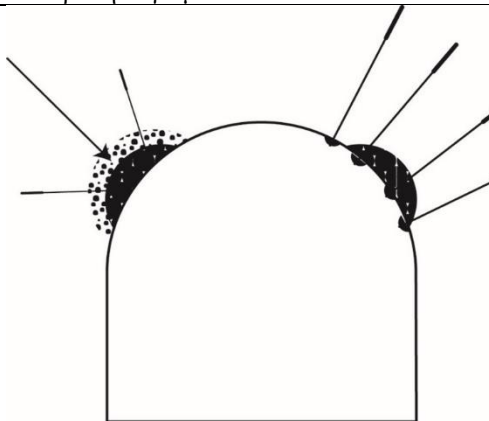
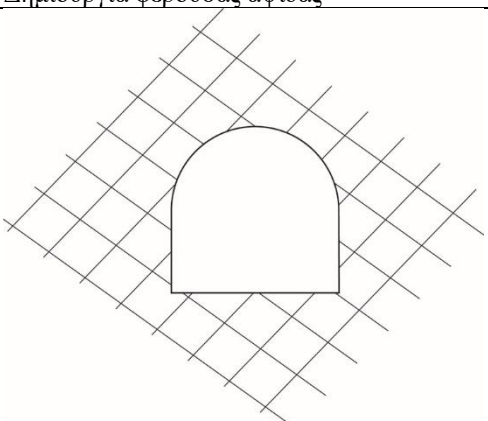
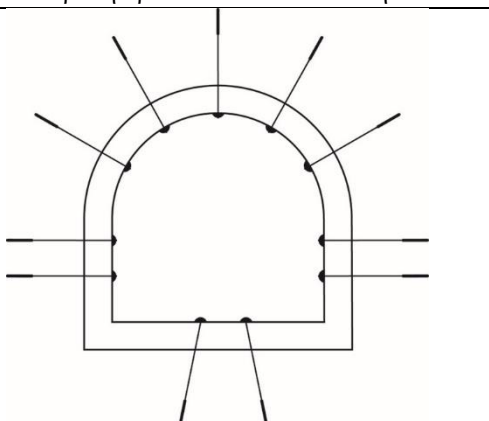
Το σύστημα ενίσχυσης (Windsor, 1997) αποτελείται από τέσσερα επιμέρους στοιχεία, ήτοι: το πέτρωμα, το στέλεχος, την εσωτερική σύζευξη, και την εξωτερική σύζευξη. Το στέλεχος είναι ράβδος, συνήθως μεταλλική, η οποία τοποθετείται σε διάτρημα στο πέτρωμα. Η εσωτερική σύζευξη στελέχους-πετρώματος πραγματοποιείται είτε σημειακά-τοπικά είτε ολόσωμα. Η εξωτερική σύζευξη δύναται να επιτυγχάνεται με πλάκα που ωθείται από περικόχλιο προς το πέτρωμα. Διακρίνονται, σε στοιχεία ενίσχυσης διατομής και σε προενίσχυσης.

Ενίσχυση της διατομής υπογείων ανοιγμάτων επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ήλων¹ στο πέτρωμα, περίξ αυτών. Τα στοιχεία αυτά είναι ευέλικτα και προσαρμόζονται σε κάθε γεωμετρία, τοποθετούνται εύκολα, το κόστος τους είναι σχετικά μικρό, επιδέχονται εκμηχανισμένη εγκατάσταση, επιτρέπουν έγκαιρη τοποθέτηση, δίνουν τη δυνατότητα αυξομείωσης της πυκνότητάς τους, και συνδυάζονται με άλλα μέτρα.

Η πρώτη εφαρμογή ηλώσεων στις υπόγειες εξορύξεις πραγματοποιήθηκε το 1913 στη Γερμανία, αλλά η εκτεταμένη εφαρμογή άρχισε από το 1940 στα αμερικανικά ορυχεία. Σε σήραγγα εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1950 στο φράγμα Keyhole των ΗΠΑ. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν εκτεταμένα σε συνδυασμό με χαλύβδινα πλαίσια και εκτοξευμένο σκυρόδεμα, και από το 1963 και μετά κατά την εφαρμογή της Νέας Αυστριακής Μεθόδου Διάνοιξης Σηράγγων (NATM). Σήμερα χρησιμοποιούνται κατά κόρον κατά την κατασκευή των υπογείων έργων και έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων που ανταποκρίνονται στις διαφορετικές απαιτήσεις μεταλλευτικών και τεχνικών έργων.

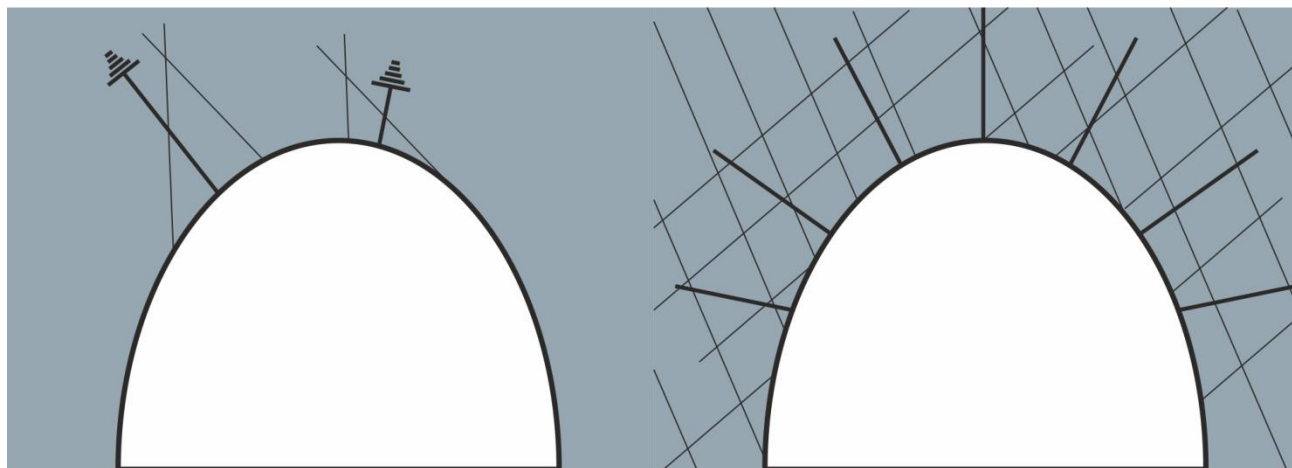
¹ Στην αγγλοσαξονική βιβλιογραφία χρησιμοποιείται αντίστοιχα ο γενικός όρος rockbolt (π.χ. Stillborg, 1994)

Πίνακας 1-1. Ενίσχυση υπόγειου ανοίγματος με ηλώσεις (Douglas & Arthur, 1983). Courtesy Ciria: <http://www.ciria.org/>

Μεμονωμένα τεμάχια		
	Ανάρτηση τεμαχίων	Αύξηση της αντίστασης σε ολίσθηση τεμαχίων
Στρωσιγενές πέτρωμα		
	Δημιουργία ενιαίας δοκού	Αποτροπή λυγισμού πλακών
Κερματισμένο πέτρωμα		
	Δημιουργία φέρουσας ανίδας	Αποτροπή προοδευτικών αποκολλήσεων
Ασθενές πέτρωμα		
	Ακτινική στήριξη για περιορισμό ζώνης αστοχίας	Ελεγχόμενη διαρροή συνθλιβόντος πετρώματος

Το υλικό των ήλων γενικά είναι χάλυβας, συνήθως B500C ή μεγαλύτερης αντοχής (πχ. $f_y \sim 900 \text{ MPa}$). Δύναται επίσης να είναι από υλικά σύνθετα, ενισχυμένα με υαλονήματα ([σύνδεσμος](#)), ανθρακονήματα ή οργανικές ίνες aramid, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, και εξαιρετική ανθεκτικότητα στη διάβρωση σε διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος. Οι μηχανισμοί ενίσχυσης του πετρώματος είναι σύνθετοι και κανένα απλό πρότυπο δεν μπορεί από μόνο του να εξηγήσει πλήρως τη δράση οποιουδήποτε συστήματος ενίσχυσης (Stephansson, 1984; Martens, 2004, Pells, 2008). Ο Πίνακας 1-1 δίνει βασικούς θεωρητικούς μηχανισμούς, οι οποίοι δύνανται να δρουν σε συνδυασμό σε οποιαδήποτε θέση.

Οι ήλοι τοποθετούνται είτε σποραδικά στις θέσεις που απαιτούνται είτε συστηματικά σε τετραγωνικό ή ρομβικό κάναβο, όταν η απαίτηση είναι γενική (Σχήμα 1-1). Η πρώτη περίπτωση αφορά ογκοτεμαχισμένα πετρώματα τα οποία απαιτούν τη στήριξη μεμονωμένων όγκων. Η δεύτερη αντιθέτως αφορά τεκτονισμένα πετρώματα τα οποία απαιτούν γενικευμένη στήριξη. Το μήκος των ακτινικά διαταγμένων ήλων είναι μεταξύ του τρίτου και του μισού του μέγιστου πλάτους του ανοίγματος, που για τα συνήθη πλάτη των 12m δίνει ένα μέγιστο μήκος 6m (AFTES, 2014).



Σχήμα 1-1. Ήλωση του πετρώματος περίξ της διατομής. Αριστερά: Σποραδική ήλωση. Δεξιά: Συστηματική ήλωση.

Οι ήλοι διακρίνονται είτε με βάση την εσωτερική σύζευξη σε σημειακής (DMFC) και σε ολόσωμης σύζευξης (CMC ή CFC) είτε με βάση την αρχική τάνυση (Σοφιανός, 1996) σε ενεργητικούς που ονομάζονται αγκύριο-anchor ή κοχλίας-bolt (Οικονομόπουλος, 1989) ή μπουλόνι-boulon (Παπασπύρου, 1985), και σε παθητικούς που ονομάζονται βλήτρα²-dowel.

Οι ενεργητικοί ήλοι εφαρμόζονται εκεί όπου απαιτείται άμεση δράση των ήλων χωρίς περαιτέρω παραμόρφωση του πετρώματος. Στους ήλους αυτούς η τάνυση εφαρμόζεται αμέσως μετά την τοποθέτησή τους, με σκοπό την αποκατάσταση της ακεραιότητας της βραχομάζας, η οποία υπέστη βλάβη κατά την εκσκαφή, ώστε να αυξηθεί η διατμητική της αντοχή και η φέρουσα ικανότητά της. Ο Lang (1961) μάλιστα για να δείξει παραστατικά την ενισχυτική δράση τους, γέμισε ένα οριζόντιο πλαίσιο με χαλίκια τα οποία στη συνέχεια συμπίεσε κατακόρυφα μεταξύ τους με κοχλίες, και έδειξε ότι εκτός του ίδιου βάρους τους δύνανται να παραλάβουν και πρόσθετα φορτία. Εντούτοις, τα περιορισμένα οφέλη από την τάνυση γενικά δεν δικαιολογούν το επιπλέον κόστος και την πιο σύνθετη διαδικασία εγκατάστασης και ποιοτικού ελέγχου.

Η πάκτωση (σύζευξη) των ήλων στο πέτρωμα αρχικά είναι σημειακή, είτε με τριβή είτε με ένεμα (DMFC). Μετά την ενεργοποίηση της σημειακής πάκτωσης, οι ήλοι τανύονται. Το στέλεχος των ήλων γενικά είναι ραβδοχάλυβας, είτε με νευρώσεις (Rebar) είτε συνεχούς σπειρώματος (Threadbar), με τον τελευταίο να αποτελεί εξέλιξη του πρώτου και να πλεονεκτεί ως προς την αντοχή του σπειρώματος, την ολκιμότητα, την πρόσφυση, την ανάμειξη με τη ρητίνη, τη δυνατότητα επανέντασης, την κοπή σε επιθυμητό μήκος, το μειωμένο κίνδυνο τραυματισμού του σπειρώματος, κ.ά. Δύναται επίσης να είναι από άλλο υλικό, όπως υαλόνημα, σκληρό πλαστικό ή ανθρακόνημα ([σύνδεσμος](#)). Η εξωτερική σύζευξη επιτυγχάνεται με μετωπικές πλάκες. Η επιμήκυνση που δύνανται να δεχτούν αυτοί οι ήλοι είναι της τάξης του 2% (Παπασπύρου, 1985).

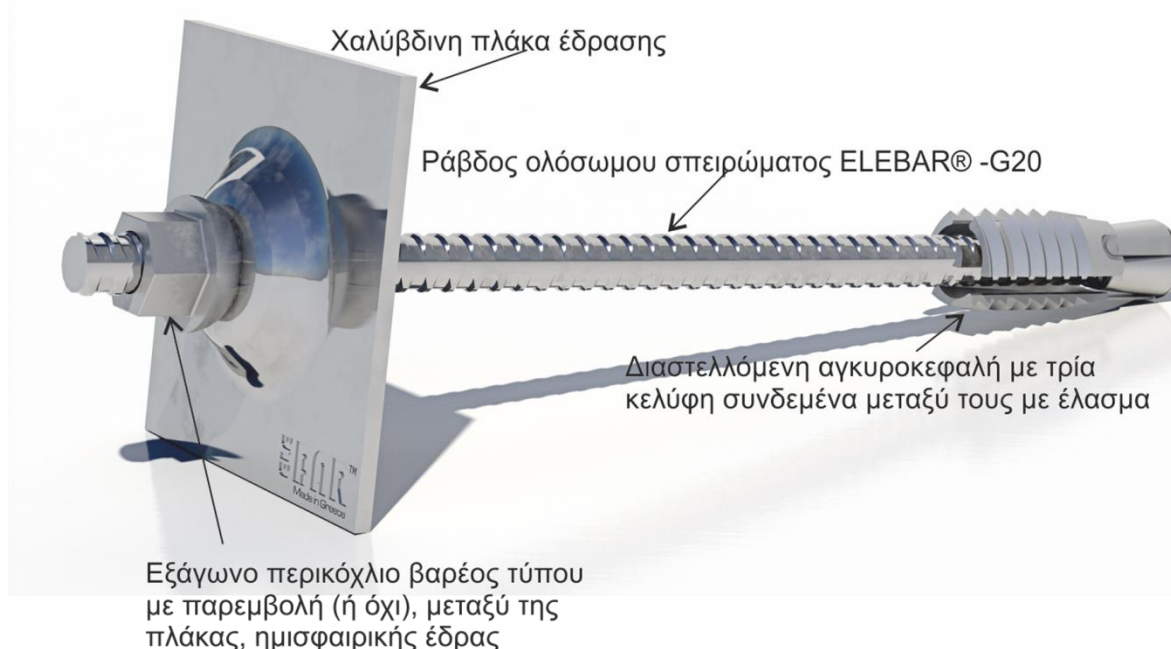
² Από το ρήμα βλητρώ = συναρμόζω (Δημητράκος, 1964)

1.2 Διάκριση με βάση την εσωτερική σύζευξη

Σύμφωνα με τον τρόπο εσωτερικής σύζευξής τους με το πέτρωμα, διακρίνονται σε σημειακής σύζευξης διά τριβής (DFC) και σε σημειακής σύζευξης διά συγκόλλησης με ένεμα (DMC).

1.2.1 Πάκτωση με μηχανισμό διαστελλόμενου άκρου (EB= mechanically anchored Expansion Bolt)

Πρόκειται για ήλο σημειακής σύζευξης διά τριβής (DFC), που περιγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-01. Στο Σχήμα 1-2 φαίνεται ήλος, ο οποίος αποτελείται από ράβδο συνεχούς σπειρώματος, διαστελλόμενη αγκυροκεφαλή και χαλύβδινη πλάκα έδρασης συγκρατούμενη από εξάγωνο περικόχλιο. Η λειτουργία του έγκειται στη δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικής δύναμης στο ελεύθερο άκρο, με τη μεσολάβηση πλάκας διανομής και περικοχλίου, που μεταφέρεται σε απομακρυσμένη σταθερή μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος. Ιστορικά, ο πρώτος ήλος αυτού του τύπου στο εσωτερικό άκρο του έφερε εγκοπή. Με την είσοδο σφήνας στην εγκοπή, ο ήλος τοπικά διαστέλλονταν, και πακτώνονταν στο πέτρωμα. Ο σύγχρονος ήλος αυτού του τύπου, αντί του άκρου με εγκοπή φέρει μηχανισμό διαστολής. Το στελέχος του είναι ράβδος από χάλυβα έλασης, συνήθως κυκλικής ή άλλης διατομής διαμέτρου 16÷25mm, τάσης διαρροής f_y : ~360÷700MPa, είτε με νευρώσεις ([σύνδεσμος](#)) είτε με συνεχές σπείρωμα (ελικώσεις) ([σύνδεσμος](#)) ή ενδεχομένως από άλλο υλικό. Στο εσωτερικό άκρο του, για την εσωτερική σύζευξή του με το πέτρωμα, έχει μηχανισμό αποτελούμενο από κέλυφος συγκροτούμενο από σφήνες που συγκρατούνται στη θέση τους με έλασμα και κόλυρο κώνο με εσωτερικό σπείρωμα που βιδώνεται στο σπείρωμα του στελέχους. Το βάθος του διατρήματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 100mm μεγαλύτερο από το μήκος του στελέχους σε αυτό, διαφορετικά το έλασμα της αγκυροκεφαλής θα εκτοπιστεί με την ώθησή του στο άκρο της οπής.



Σχήμα 1-2. Ράβδος ολόσωμου σπειρώματος. (Χορηγήθηκε από την ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).

Με την περιστροφή της ράβδου ο κώνος ωθείται από το σπείρωμα εντός του κελύφους το οποίο διαστέλλεται και πακτώνεται στο διάτρημα ([σύνδεσμος εγκατάστασης](#)). Η αντίσταση της πάκτωσης οφείλεται στην τριβή και στη σύμπλεξη, με τη δεύτερη να είναι πολύ σημαντικότερη. Η δυνατότητα σύμπλεξης στα πολύ σκληρά πετρώματα είναι κατά πολύ μειωμένη λόγω της αδυναμίας διεύθυνσης των νευρώσεων του κελύφους στο πέτρωμα, ενώ στα μαλακά περιορίζεται από την αδυναμία διατμητικής αντίστασης της βραχομάζας. Η σφήνωση γίνεται στο βάθος διατρήματος, διαμέτρου ελαφρώς μεγαλύτερης εκείνης του μηχανισμού σε συστολή, και η στερέωση βελτιώνεται όσο πιο μεγάλη είναι η αντοχή του πετρώματος και το μέγεθος της παραμόρφωσης του διατρήματος που επιτυγχάνεται από τη διαστολή του κελύφους. Η καλή πάκτωση προϋποθέτει τοποθέτηση του μηχανισμού σε κατάλληλη θέση, και αυτή ενδεχομένως συνεπάγεται τη

μετατόπιση της θέσης του διαστελλόμενου άκρου. Ο τυπικός χρόνος εγκατάστασης του ήλου (Stillborg, 1994), εξαιρουμένης της ανόρυξης του διατρήματος, είναι 75s.

Η δυνατότητα ανάληψης δύναμης P_b από την αγκυροκεφαλή είναι ανάλογη του αριθμού των σφηνών n , του εμβαδού F_t της επαφής κάθε σφήνας του κελύφους με το πέτρωμα, της πίεσης q που ασκεί το κέλυφος στο πέτρωμα, που δύναται να φθάσει τη μονοαξονική αντοχή του, και του συντελεστή τριβής-σύμπλεξης $\tan(\varphi_b + i_b)$.

$$P_b = n \cdot \tan(\varphi_b + i_b) \cdot q \cdot F_t; \tan(\varphi_b + i_b) \leq \tan(\varphi_{rock}) \quad (1-1)$$

Για παράδειγμα, η δύναμη εξόλκευσης αγκυρίου Ø16, φορτίου διαρροής 100kN και θραύσης 110kN, με διαστελλόμενο κέλυφος αποτελούμενο από 3 σφήνες με εμβαδόν κάθε μίας 500mm², σε διάτρημα Ø35 πετρώματος θλιπτικής αντοχής 30MPa, και γωνίας τριβής κελύφους-πετρώματος $\varphi_b \approx 16^\circ$ και σύμπλεξης $i_b \approx 29^\circ$, υπολογίζεται ότι είναι:

$$P_b = 3 \cdot 1 \cdot 30 \cdot 500 \cdot 10^{-3} = 45kN < 100kN$$

Η παραπάνω θεωρητική εκτίμηση απεικονίζει έναν μηχανισμό αντίστασης του ήλου. Η φέρουσα ικανότητα του ήλου πρέπει να προσδιορίζεται από δοκιμές εξόλκευσης.

Μία από τις κύριες αιτίες της αστοχίας των αγκυρίων είναι η διάβρωση, που μπορεί να αντιμετωπιστεί με την ολική πλήρωση, μετά την τάνυση, του διακένου μεταξύ του αγκυρίου και των τοιχωμάτων του διατρήματος, με κονίαμα. Μολονότι σε πολλές συνθήκες εξόρυξης δεν απαιτείται η πλήρωση, θα πρέπει να εξετάζεται όπου τα υπόγεια νερά είναι διαβρωτικά ή όπου τα αγκύρια απαιτείται να έχουν μόνιμη λειτουργία. Στο εμπόριο προσφέρονται και ανοξειδωτοί ήλοι ([σύνδεσμος](#)).

Η παραδοσιακή μέθοδος ανωφερούς πλήρωσης με κονίαμα επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός βραχύ σωληνίσκου για την παροχή ρευστοκονιάματος στο διάτρημα και ενός μικρότερης διαμέτρου σωληνίσκου, που εκτείνεται μέχρι το βάθος του διατρήματος, για να απάγει τον αέρα από αυτό. Ο σωληνίσκος εξαερισμού σταθεροποιείται γενικά με ταινία στο στέλεχος του αγκυρίου, και γι' αυτό μπορεί να καταστραφεί κατά τη μεταφορά ή την εισαγωγή στο διάτρημα. Επιπλέον, το στόμιο του διατρήματος πρέπει να μονωθεί και η μετωπική πλάκα να διατηρηθεί για να διέλθουν οι δύο σωληνίσκοι. Πολλές από αυτές τις δυσκολίες ξεπερνιούνται με τη χρήση σωληνωτού αγκυρίου. Μολονότι πιο ακριβά από τα συμβατικά, τα σωληνωτά αγκύρια κάνουν τη διαδικασία πλήρωσης πολύ πιο αξιόπιστη και πρέπει να εξετάζονται όπου απαιτούνται μόνιμες ηλώσεις. Σε αυτά, το κονίαμα ενίεται με χρήση βραχύ σωληνίσκου, ως σωλήνα εισόδου του κονιάματος, εισαγμένου στο κολάρο του διατρήματος. Η κεντρική οπή στο στέλεχος λειτουργεί ως σωλήνα εξαερισμού. Σε κατωφερή διατρήματα ο ρόλος των σωληνίσκων αντιστρέφεται. Το ένεμα τροφοδοτείται, μέσω του μακρού σωληνίσκου ή της οπής του στελέχους, στο βάθος του διατρήματος και ο βραχύς σωληνίσκος χρησιμοποιείται για τον εξαερισμό.

Δεδομένου ότι πρωταρχικός σκοπός της πλήρωσης είναι η αποτροπή της διάβρωσης και η στερέωση του αγκυρίου, ώστε να μη διαταράσσεται από τις δονήσεις των ανατινάξεων και τις παραμορφώσεις της βραχομάζας, δεν υπάρχει ιδιαίτερη απαίτηση για την αντοχή του κονιάματος. Αυτό θα πρέπει να αντλείται εύκολα, χωρίς να είναι υπερβολικά ρευστό, και μια συνήθης αναλογία νερού προς τσιμέντο είναι $0.4 \div 0.5$. Η άντληση θα πρέπει να συνεχίζεται έως ότου υπάρξει μία σαφής ένδειξη ότι είτε ο αέρας έχει σταματήσει να εξέρχεται είτε το κονίαμα επιστρέφει από τον σωληνίσκο.

Περαιτέρω αύξηση της διάρκειας ζωής του ήλου επιτυγχάνεται με την εξαρχής επικάλυψή του με χιτώνιο από πολυαιθυλένιο (Σχήμα 1-3). Μετά την τοποθέτηση του ήλου και την τάνυσή του, εισάγεται κονίαμα που περιβάλλει πλήρως τον ήλο.

Στα γενικά πλεονεκτήματά του ήλου διαστελλόμενου άκρου (Stillborg, 1994) περιλαμβάνονται το σχετικά μικρό του κόστος, η άμεση ενέργειά του, και η δυνατότητα ανάληψης υψηλού φορτίου σε σκληρά πετρώματα. Όμως, η εφαρμογή του περιορίζεται σε μέτρια σκληρά έως σκληρά πετρώματα, η αξιόπιστη εγκατάστασή του είναι δύσκολη, η ορθή τάνυσή του πρέπει να ελέγχεται, χάνει την τάνυσή του λόγω των δονήσεων από τις ανατινάξεις ή του θρυμματισμού του πετρώματος κάτω από την πλάκα εξαιτίας των υψηλών τοπικών τάσεων, και για να λειτουργεί ως μόνιμο μέτρο πρέπει μετά την τάνυση του να ενεματώνεται ολόσωμα.



1η φάση-Διάτρηση:	2η φάση-Τοποθέτηση	3η φάση-Ενεμάτωση
Διάμετρος ράβδου: 20÷21.7mm	Εισαγωγή στο διάτρημα	Κατάλληλο κονίαμα
Οπή: 44÷51mm	Πίεση της πλάκας στο πέτρωμα	Σύνδεση με αντλία ενεμάτωσης
Διάτρημα: 100mm μακρύτερο από τον ήλο	Διαστολή κεφαλής	Ροή εντός χιτωνίου
	Τάνυση ήλου με 200÷300Nm	Ροή εκτός χιτωνίου

Σχήμα 1-3. Ήλος [CT](#) -© DYWIDAG-Systems International (DSI).

1.2.2 Πάκτωση με ρητινική κόλλα (RB=Resin rock Bolt)

Πρόκειται για ήλο σημειακής σύζευξης διά συγκόλλησης με ρητινική κόλλα (DMC), που περιγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-02. Το στέλεχος είναι ράβδος, συνήθως κυκλικής ή άλλης διατομής, από χάλυβα ή άλλο υλικό (π.χ. υαλόνημα, σκληρό πλαστικό, κλπ.) που πακτώνεται με την κόλλα στο άκρο του, στο βάθος διατρήματος, στο πέτρωμα. Το ελεύθερο άκρο της ράβδου στερεώνεται με περικόχλιο με τη μεσολάβηση πλάκας διανομής. Στον ήλο επιβάλλεται τάνυση, ώστε να υφίσταται αρχική δύναμη σύσφιξης. Οι φάσεις εγκατάστασής του φαίνονται στο Σχήμα 1-4 α. Η ικανότητα του αγκυρίου ελέγχεται από την αντοχή της ράβδου και τη συνάφεια μεταξύ ράβδου-ρητινικής κόλλας – περιβάλλοντος πετρώματος. Η λειτουργία των ήλων αυτού του τύπου έγκειται στη δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικής δύναμης στο ελεύθερο άκρο που μεταφέρεται σε απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος που δεν έχει αποσταθεροποιηθεί από τη διάνοιξη της σήραγγας.

Βασικά συστατικά μιας τυπικής ρητινικής κόλλας είναι: (α) πολυεστερική ρητίνη ~30%, (β) φύλλα (κονιορτοποιημένος ασβεστόλιθος-πούδρα) ~65%, (γ) επιταχυντής ~0.5%, και (δ) καταλύτης. Προκειμένου να μην έρθουν σε επαφή τα τρία πρώτα συστατικά με τον καταλύτη, συσκευάζονται σε δύο ξεχωριστά διαμερίσματα, πακεταρισμένα και σφραγισμένα σε πλαστικά φυσιγγία αεροστεγώς. Τα φυσιγγία διατίθενται σε μήκη από 300 έως 750 mm και διαμέτρους από 23 έως 38 mm. Διακρίνονται σε ταχείας και βραδείας πήξης. Κατάλληλες προεξοχές στο ένα άκρο του φυσιγγίου αποτρέπουν την ελεύθερη ολίσθησή τους στο διάτρημα. Η επιλογή του κατάλληλου φυσιγγίου εξαρτάται από τις διαμέτρους της ράβδου της ήλωσης και του διατρήματος. Ένα διάκενο ~3mm θεωρείται ιδανικό ώστε να επιτρέπει τη διάρρηξη της μεμβράνης των φυσιγγίων και την ανάμειξη των δύο συστατικών. Τα φυσιγγία ωθούνται προς το βάθος του διατρήματος μπροστά από το στέλεχος του αγκυρίου, κομμένου κατάλληλα ώστε να σχηματίζει αιχμηρή ακμή, το οποίο κατόπιν περιστρέφεται, από το διατρητικό, μέσα στα φυσιγγία ρητίνης. Το πλαστικό περίβλημα των φυσιγγίων θραύεται, και η ρητίνη με τον καταλύτη αναμιγνύονται με την περιστροφή. Με την πήξη της ρητίνης δημιουργείται ισχυρή πάκτωση. Ο χρόνος έναρξης πήξης της ρητίνης εξαρτάται από τον τύπο της και τη θερμοκρασία. Οι ρητίνες ταχείας πήξης έχουν χρόνο έναρξης πήξης 15÷25 s, και οι βραδείας πήξης 2.5÷5 min. Τυπικά, ήλος πετρώματος πακτωμένος με ρητινικό ένεμα δύναται να τανυθεί μέσα σε 1 έως 5 λεπτά από την τοποθέτησή του (Stillborg, 1994). Το συγκεκριμένο είδος πάκτωσης είναι αποτελεσματικό στα περισσότερα πετρώματα, συμπεριλαμβανομένων των πηλινών και ασθενών σχιστόλιθων. Διαφορετικές αναλογίες των συστατικών έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές αντοχές, χρόνους πήξης, αντίστασης στο περιβάλλον κλπ. Μετά την πλήρη ωρίμανσή της, μία τυπική ρητίνη έχει: μονοαξονική θλιπτική αντοχή 110MPa, εφελκυστική αντοχή 60MPa και διατμητική αντοχή 50MPa.

να φτάνει τους έξι μήνες. Σε κρίσιμες εφαρμογές, συνιστάται ο έλεγχος της δραστηριότητας της ρητίνης, θυσιάζοντας ένα φυσίγγιο από κάθε κουτί, προτού χρησιμοποιηθεί το περιεχόμενό του.

Η θραύση του πλαστικού περιβλήματος των φυσιγγίων και η αποτελεσματική ανάμειξη των ρητινών μπορεί επίσης να παρουσιάσει πρακτικά προβλήματα. Η λοξή κοπή του άκρου του στελέχους, για να σχηματιστεί αιχμηρό κωνικό άκρο, βοηθά τη διαδικασία αυτή, που όμως απαιτεί και πειραματισμό για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος. Ο αριθμός των περιστροφών και η διάρκεια του χρόνου για την ανάμειξη των ρητινών είναι περιορισμένοι. Μετά την έναρξη της διαδικασίας της πήξης, η πρόσθετη περιστροφή μπορεί να καταστρέψει τη δομή της ρητίνης και να αποδυναμώσει την πάκτωση. Γι' αυτό, οι περισσότεροι παρασκευαστές παρέχουν οδηγίες σχετικά με τον αριθμό των περιστροφών και τη διάρκειά τους. Το μήκος των ήλων αυτών δεν ξεπερνά τα 4m (GT6R4A1, 2014).

Επίσης, σε ορισμένα ασθενή αργιλικά πετρώματα, τα τοιχώματα του διατρήματος επικαλύπτονται με άργιλο κατά τη διάτρηση. Αυτή η επικάλυψη προκαλεί, κατά την περιστροφή, ολίσθηση των φυσιγγίων ρητίνης, με αποτέλεσμα την ατελή ανάμειξη και την ανεπαρκή συγκόλληση. Σε κατακερματισμένα πετρώματα η ρητίνη μπορεί να διηθείται πριν από την πήξη, αφήνοντας κενά στη στήλη γύρω από το αγκύριο. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, η χρήση τσιμεντοκονιάματος, (Σχήμα 1-4β) αντί κονιάματος ρητίνης, μπορεί να παρέχει μια πιο αποτελεσματική και οικονομική λύση. Στην περίπτωση αυτή όμως απαιτούνται τουλάχιστον δύο ώρες για την τάνυση του ήλου, χρόνος που εξαρτάται από τα πρόσμικτα και τη θερμοκρασία (Stillborg, 1994). Τέλος, η προστασία και η αντίδραση ορισμένων από τις ρητίνες με διαβρωτικά υπόγεια ύδατα, ενέχει αβεβαιότητα. Στις τυπικές μεταλλευτικές εφαρμογές, λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής σχεδιασμού για τις περισσότερες εγκαταστάσεις ήλων, οι ανησυχίες αυτές πιθανόν να μην συνιστούν πρόβλημα. Ωστόσο, καλύτερη προστασία παρέχεται από το τσιμεντοκονίαμα εκεί όπου η μακρά διάρκεια ζωής είναι απαραίτητη.

1.3 Πάκτωση, τάνυση, λειτουργία ήλων

1.3.1 Εξωτερική σύζευξη

Στο εξωτερικό άκρο του στελέχους του ήλου υπάρχει σπείρωμα στο οποίο βιδώνεται εξάγωνο περικόχλιο. Το περικόχλιο δύναται να είναι επίπεδο, ή να έχει διαμορφωμένη ημισφαιρική την πλευρά που εδράζεται στην πλάκα ή να είναι επίπεδο εδραζόμενο σε ημισφαιρική έδρα. Η εξωτερική σύζευξη επιτυγχάνεται από πλάκα η οποία μέσω του περικοχλίου αναλαμβάνει το φορτίο του στελέχους και το διανέμει στην παρειά της εκσκαφής. Οι πλάκες είναι συνήθως τετραγωνικές επίπεδες, όταν η παρειά της εκσκαφής είναι ομαλή και ο ήλος τοποθετείται κάθετα στην παρειά της εκσκαφής. Ωστόσο, η συνήθως ακανόνιστη παρειά της εκσκαφής και η λοξότητα του ήλου ως προς την παρειά εισάγουν δυσμενή φόρτιση στην κεφαλή του ήλου. Μια ημισφαιρική ροδέλα αντισταθμίζει τη μη καθετότητα του διατρήματος στην παρειά της εκσκαφής. Οι πλάκες έχουν πλευρές 150÷250mm και πάχος 7.5÷12mm, και εκτός από επίπεδες δύνανται να είναι θολωτές.

Οι προμηθευτές αγκυρίων προσφέρουν μια ευρεία ποικιλία μετωπικών πλακών και κωνικών ή ημισφαιρικών ροδετών. Σε γενικές γραμμές, τα σπειρώματα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χονδρότερα και να προέρχονται από έλαση παρά κοπή, καθόσον τα λεπτά καταστρέφονται εύκολα και η κοπή μειώνει την αντοχή. Όμως, τα αγκύρια με σπειρώματα έλασης είναι ακριβότερα στην παρασκευή και γι' αυτό περιορίζονται σε καταστάσεις όπου απαιτείται υψηλή αντοχή.

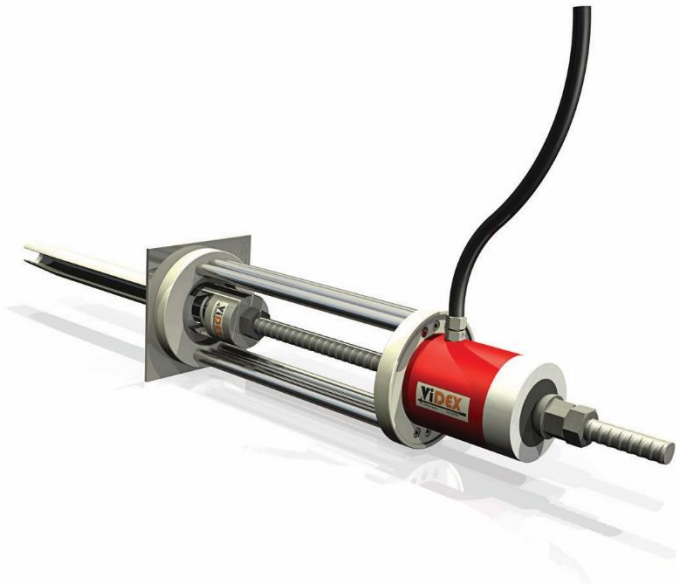
1.3.2 Τάνυση και ροπή στρέψης

Η τάνυση του αγκυρίου διασφαλίζει την καλή επαφή της πλάκας με το πέτρωμα και τη θλιπτική προέντασή του. Όπου απαιτείται να αναλαμβάνουν σημαντικό φορτίο, συνιστάται γενικά η προένταση με δύναμη κατά μέγιστο τα 2/3 (ΕΛΟΤ, ΤΠ 1501-12-03-03-01:2009) του ορίου διαρροής του στελέχους του αγκυρίου. Η προένταση αυτή, παρέχει ένα δεδομένο φορτίο και μια δυνατότητα παραλαβής πρόσθετου παθητικού φορτίου που προκαλείται από παραμορφώσεις της βραχομάζας.

Όλοι οι ήλοι μηχανικής πάκτωσης, σύμφωνα με την ASTM F432, πρέπει να τανύονται με ροπή στρέψης τουλάχιστον 150 ft-lbs (200 N·m). Οι ήλοι, σύμφωνα με τους Douglas & Arthur (1983), δύνανται να τανύονται με δύναμη που δεν ξεπερνά (α) το 50% της αντοχής θραύσης, (β) το 60% της τάσης διαρροής, δύνανται δε να ελέγχονται με φορτίο 40% επιπλέον του φορτίου λειτουργίας τους. Η τάνυση του ήλου επιτυγχάνεται (Schach et al., 1979) είτε με την περιστροφή του περικοχλίου με χρήση (α) απλού κλειδιού, (β) ροπόκλειδου (Σχήμα 1-5α) ([σύνδεσμος](#)), (γ) αερόκλειδου είτε με άμεση τάνυση από υδραυλικό εντατήρα ([σύνδεσμος](#)) (Σχήμα 1-5β), ειδικά αν η τάνυση είναι μεγαλύτερη από 100kN (Stillborg, 1994).



(α) Τάνυση με ροπόκλειδο
Σχήμα 1-5. Τάνυση ήλων.



(β) Υδραυλικός εντατήρας για τάνυση ή εξόλκευση (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).

Για χαμηλότερες τιμές της τάνυσης, αν αυτή πραγματοποιείται με την περιστροφή του περικοχλίου, λόγω της κλίσης i του σπειρώματος το περικόχλιο ωθείται προς την πλάκα έδρασης και επιμηκύνει το στέλεχος. Η ενέργεια η οποία παρέχεται εξωτερικά για την περιστροφή του περικοχλίου αποθηκεύεται ως ελαστική ενέργεια στο στέλεχος διαμέτρου d , και αναλώνεται σε τριβή μεταξύ περικοχλίου και στελέχους στο σπείρωμα και μεταξύ περικοχλίου και πλάκας στη διεπαφή τους. Για γωνία στροφής του περικοχλίου 1 rad , το προσφερόμενο και τα αναλυνόμενα έργα εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$W_M = M_b \cdot 1; W_{el} = N_b \cdot \frac{d}{2} \cdot \tan i; W_{ft} = N_b \cdot \frac{d}{2} \cdot \tan \varphi_s; W_{fp} = N_b \cdot \frac{d}{2} \cdot \tan \varphi_s \quad (1-5)$$

όπου, W_M , W_{el} , W_{ft} , W_{fp} , τα έργα λόγω της ροπής στρέψης, λόγω ελαστικής τάνυσης του αγκυρίου, λόγω τριβής του περικοχλίου στο σπείρωμα, και λόγω τριβής του περικοχλίου στην πλάκα, αντίστοιχα, $\tan \varphi_s$ ο συντελεστής τριβής μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών, και N_b η τάνυση του ήλου. Χάριν απλότητας οι διάμετροι περιστροφής, τόσο στο σπείρωμα όσο και στην πλάκα θεωρήθηκαν ίσες με τη διάμετρο d του στελέχους. Από την εξίσωση εξωτερικών και εσωτερικών έργων:

$$W_M = W_{el} + W_{ft} + W_{fp} \quad (1-6)$$

προκύπτει η απαιτούμενη ροπή στρέψης:

$$M_b = \frac{N_b \cdot d}{2} \cdot (\tan i + 2 \tan \varphi) \Rightarrow C_b = \frac{N_b}{M_b} = \frac{2}{d \cdot (\tan i + 2 \tan \varphi_s)} \quad (1-7)$$

Ως γενικός κανόνας, ο συντελεστής C_b [ft^{-1}] ισούται³ με 50 για διαμέτρους αγκυρίων 5/8 in και 40 για διαμέτρους 3/4 in (Peng, 1978, section 6.2.2), εκ του οποίου προκύπτει ότι:

$$C_b \cdot d = \frac{2}{\tan i + 2 \tan \varphi_s} \approx \frac{50}{12} \cdot \frac{5}{8} \approx \frac{40}{12} \cdot \frac{3}{4} \approx 2.5 \quad (1-8)$$

³ Ο Sinha (1989) δίνει γενικές τιμές από 50÷60.

Για τους παραπάνω ήλους η εφαρμοζόμενη ροπή κυμαίνεται μεταξύ 135 και 340 N·m. Σύμφωνα με τον Stillborg (1994, p.20), η μέγιστη τάνυση ήλου δίνεται σύμφωνα με την:

$$\max N_b = \min \left\{ \frac{N_{by}}{2} + 4.5kN; \frac{N_{ay}}{2} - 4.5kN \right\} \quad (1-9)$$

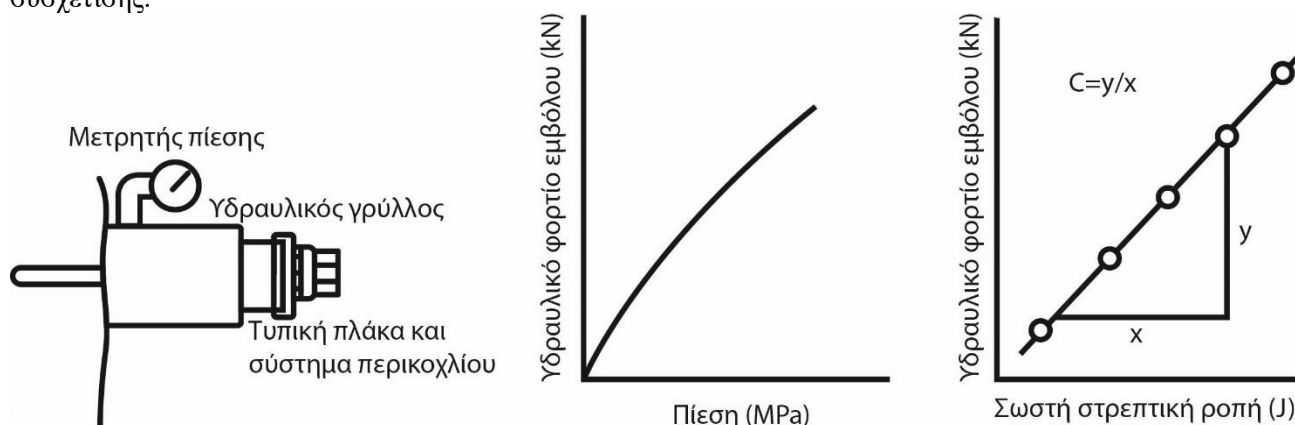
όπου, N_{by} : φορτίο διαρροής του χάλυβα του αγκυρίου, N_{ay} : φορτίο διαρροής της σημειακής πάκτωσης.

Για παράδειγμα, ζητείται η στρεπτική ροπή που απαιτείται για την τάνυση ήλου με δύναμη 40kN. Η διάμετρος του στελέχους είναι 20mm και η γωνία τριβής φ_s μεταξύ των μεταλλικών μερών είναι ίση με 20°. Αντικαθιστώντας στην (1-7) και στην (1-8):

$$M_b = \frac{N_b \cdot d}{2} \cdot (\tan i + 2 \tan \varphi_s) = \frac{40000 \cdot 0.020}{2} \cdot (\tan 2.5 + 2 \tan 20^\circ) = 309Nm$$

$$M_b = \frac{N_b \cdot d}{C_b \cdot d} = \frac{40000 \cdot 0.020}{2.5} = 320Nm$$

Οι κατασκευαστές των ήλων δύνανται να προσφέρουν καμπύλες συσχέτισης ροπής και τάνυσης αγκυρίου ([σύνδεσμος](#), [σύνδεσμος](#)). Ο πειραματικός προσδιορισμός του C_b επιτυγχάνεται με τη μέτρηση της εφαρμοζόμενης ροπής και της σύγχρονης ένδειξης της δύναμης σε κελί φορτίου, όπως πχ προδιαγράφεται από την USBR 6584 και την ISRM (1974), και απεικονίζεται στο Σχήμα 1-6. Αριστερά φαίνεται το σύστημα τάνυσης με την κυψέλη μέτρησης της δύναμης που ασκεί ο ήλος στο πέτρωμα. Στο μέσο δίνεται η αντιστοίχιση της μετρούμενης πίεσης ελαίου στην κυψέλη με τη δύναμη που ασκείται στο πέτρωμα. Στο δεξιό διάγραμμα συσχετίζεται, σε τακτά βήματα μέσω της μετρούμενης υδραυλικής πίεσης, η ασκούμενη δύναμη στο πέτρωμα με την αντίστοιχη μετρημένη και βαθμονομημένη ροπή. Ο λόγος C_b προκύπτει ως η κλίση της καμπύλης συσχέτισης.



Σχήμα 1-6. Πειραματικός προσδιορισμός του C_b σύμφωνα με το USBR 6584.

1.4 Ενδοτικότητα ήλωσης

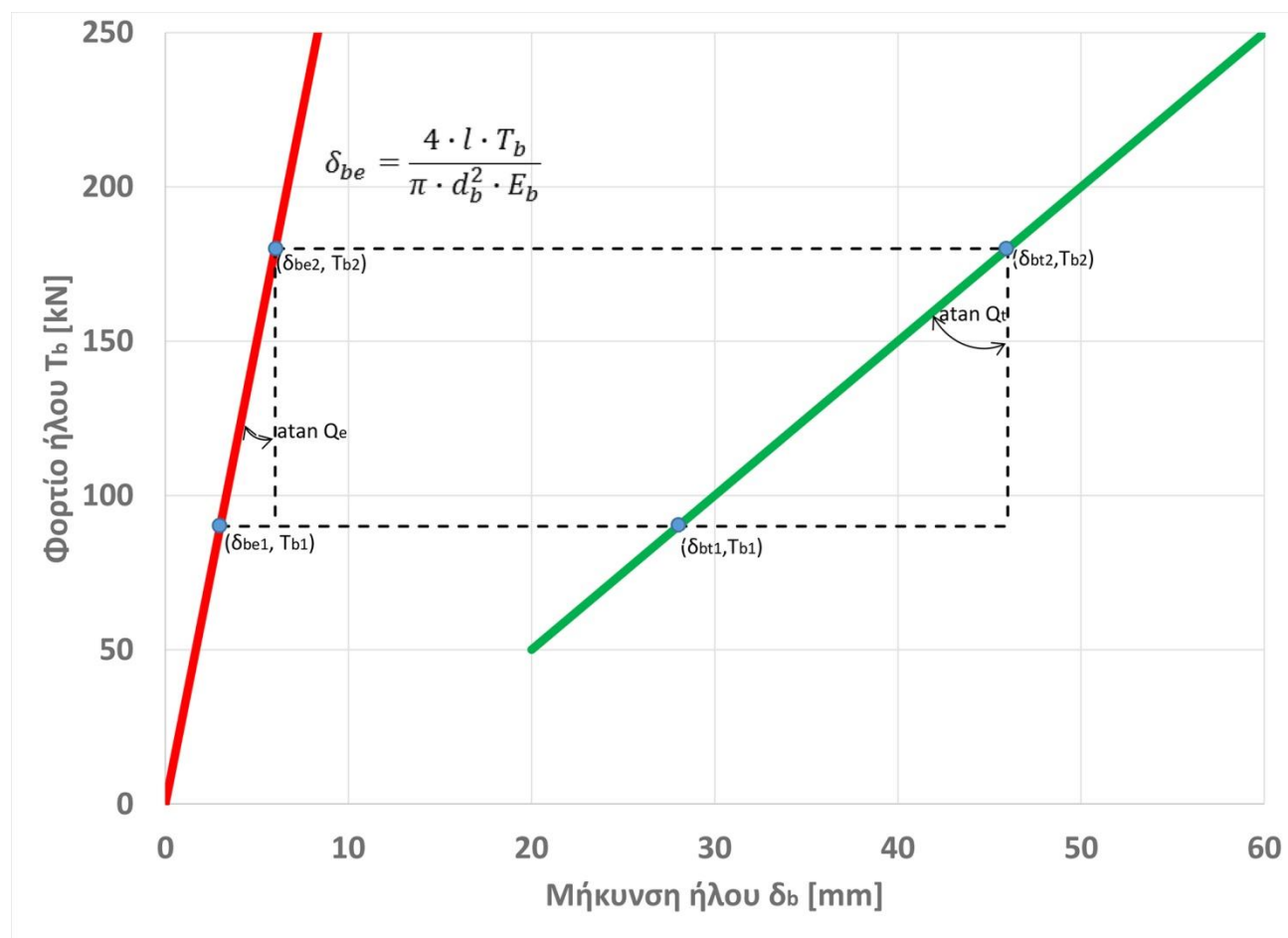
Την ενδοτικότητα των ήλων δυνάμεθα να παρατηρήσουμε στο διάγραμμα φόρτισης-μήκυνσης της δοκιμής εξόλκευσης (Hoek & Bray, 1980; Brady & Brown, 2006), όπως αυτό απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1-7. Το οριακό φορτίο T_{by} και η κλίση Q_t ως προς τον (κατακόρυφο) άξονα των τεταγμένων δίνουν τη φέρουσα ικανότητα και τη συνολική ενδοτικότητα του ήλου. Στο διάγραμμα απεικονίζεται η σχέση φόρτισης-μήκυνσης για το στέλεχος, μήκους l_b , διαμέτρου d_b , και μέτρου ελαστικότητας E_b (~207GPa). Η κλίση Q_e ως προς τον άξονα των τεταγμένων δίνει την ενδοτικότητα του στελέχους. Σε κάθε στάθμη φόρτισης T_{bi} , η διαφορά των μηκών, $\delta_{bti} - \delta_{bei}$, είναι η μήκυνση λόγω της παραμόρφωσης των λοιπών συστατικών της ήλωσης. Οι ενδοτικότητες Q_i , Q_e και Q_r με βάση το διάγραμμα ορίζονται από τις σχέσεις:

$$Q_t = \frac{d\delta_b}{dT_b} = \frac{\delta_{bt2} - \delta_{bt1}}{T_{b2} - T_{b1}} = Q_e + Q_r$$

$$Q_e = \frac{d\delta_{eb}}{dT_b} = \frac{\delta_{be2} - \delta_{be1}}{T_{b2} - T_{b1}} = \frac{4 \cdot l_b}{\pi \cdot d_b^2 \cdot E_b}$$

$$Q_r = \frac{(\delta_{bt2} - \delta_{be2}) - (\delta_{bt1} - \delta_{be1})}{T_{b2} - T_{b1}}$$

(1-10)



Σχήμα 1-7. Μήκυνση του ήλου κατά τη δοκιμή εξόλκευσης.

Ο Πίνακας 1-2 δίνει δεδομένα από την πράξη, της φέρουσας ικανότητας του ήλου και της ενδοτικότητας των λοιπών συστατικών του.

Πίνακας 1-2. Οριακό φορτίο και ενδοτικότητα λοιπών συστατικών τοποθετημένων ήλων (επιλεγμένα από Hoek & Brown, 1980).

Διάμετρος ήλου d_b [mm]	Ελεύθερο μήκος ήλου l_b [m]	Τύπος ήλου	Είδος πετρώματος	Μετρημένο T_{by} [kN]	Μετρημένο Q_r [mm/kN]
16.0	1.22	Διαστ/νο κέλυφος	Καλό πέτρωμα	49	0.160
16.0	1.83	Διαστ/νο κέλυφος	Αργιλικός σχιστόλιθος	58	0.241
19.0	1.22	Διαστ/νο κέλυφος	Καλό πέτρωμα	51	0.126
22.0	3.00	Διαστ/νο κέλυφος	Γνεύσιος	214	0.032
22.0	3.00	Διαστ/νο κέλυφος	Αργιλικός σχιστόλιθος	58	0.126
25.4	1.83	Διαστ/νο κέλυφος	Γρανίτης	254	0.143
25.4	1.93	Αγκύριο ρητίνης	Γρανίτης	285	0.018

Για συστηματική τοποθέτηση των παραπάνω ήλων στα τοιχώματα υπόγειου ανοίγματος σε κάρναβο $s_c \times s_l$ και δύναμη τάνυσης T_b , η μέση προσφερόμενη πίεση p_{sb} του συστήματος των ήλων και η μέση μέγιστη δυνατή πίεση p_{sby} που μπορεί να προσφέρει η ήλωση, δίνονται από τις σχέσεις:

$$p_{sb} = \frac{T_b}{s_c \cdot s_l}; p_{sby} = \frac{T_{by}}{s_c \cdot s_l} \quad (1-11)$$

Παρατηρούμε ότι η p_{sb} είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του ανοίγματος. Ο Πίνακας 1-3 δίνει τιμές, σύμφωνα με την (1-11), για τη μέγιστη προσφερόμενη πίεση p_{sby} από ηλώσεις, περίξ υπόγειου ανοίγματος εκσκαφής, τοποθετημένων σε σταθερό κάρναβο και πακτωμένων σημειακά εκτός της ζώνης διαρροής του πετρώματος. Οι ήλοι είναι από χάλυβα ποιότητας B500C, με ελάχιστο εγγυημένο όριο διαρροής 500MPa.

Πίνακας 1-3. Μέγιστη πίεση p_{sby} προσφερόμενη από ήλους σημειακής πάκτωσης

d_b [mm]	16 Πολύ ελαφριοί με διαστελλόμενο άκρο	20 Ελαφριοί με διαστελλόμενο άκρο	25 Μέτριοι με διαστελλόμενο άκρο	32 Βαριοί με σημειακή πάκτωση ρητίνης
Ελάχιστο εγγυημένο φορτίο διαρροής στελέχους T_{by} [kN]	100	157	246	403
Κάρναβος $s_c \times s_l$ [m]	2.5×2.5	2.0×2.0	1.5×1.5	1.0×1.0
Μέγιστη πίεση p_{sby} [MPa]	0.016	0.039	0.109	0.403

Το θεωρητικό αυτό όριο της προσφερόμενης πίεσης επιτυγχάνεται εφόσον η εσωτερική ή η εξωτερική σύζευξη το επιτρέπουν. Αντίθετα, εφόσον αυτές ενδίδουν σε μικρότερες τιμές τάνυσης από αυτές που αντέχει το στέλεχος, η μέγιστη δυνατή προσφερόμενη πίεση υποστήριξης θα είναι μικρότερη. Συσχετίζοντας τα μετρημένα φορτία T_{by} (Πίνακας 1-2) με τα θεωρητικά (Πίνακας 1-3), παρατηρούμε ότι τα θεωρητικά αποτελούν γενικά άνω όρια, που όμως συχνά επιτυγχάνονται, ειδικά σε ισχυρά πετρώματα. Αντίστοιχα ο Πίνακας 1-4 δίνει τιμές της δυστροπίας ενίσχυσης από ένα σύστημα ήλωσης.

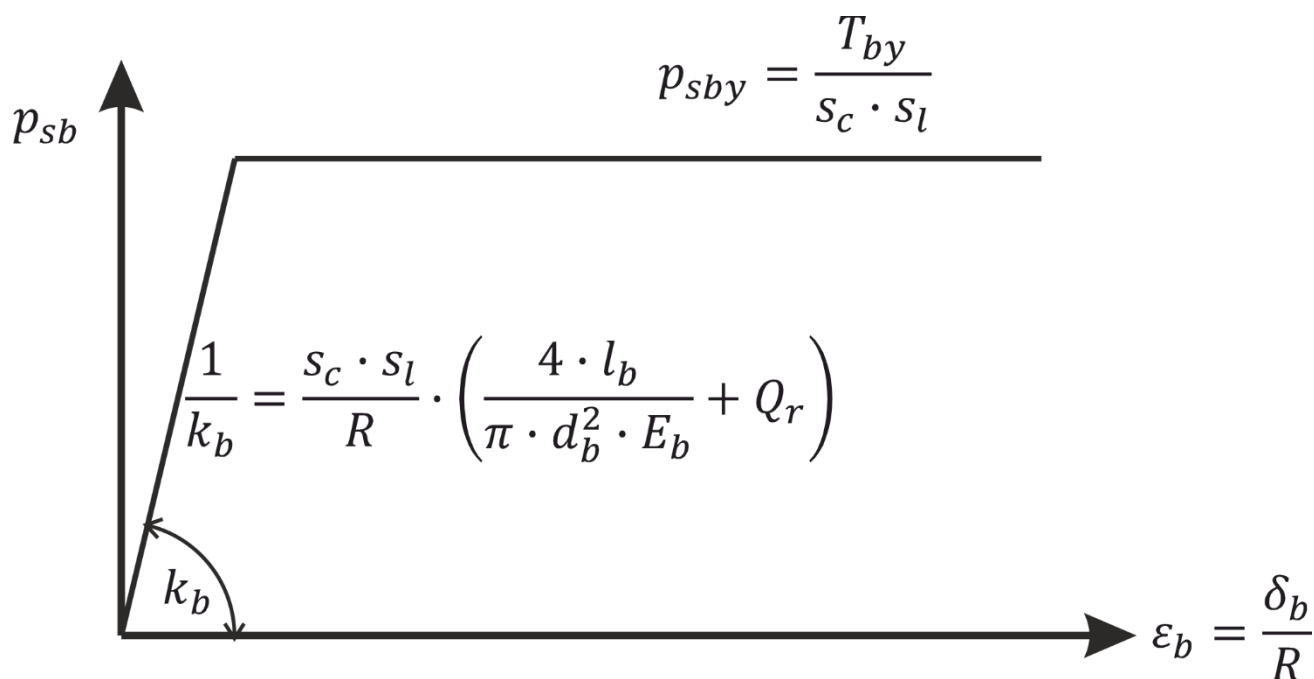
Πίνακας 1-4. Ορθή k_{bn} και εφαπτομενική k_{bf} δυστροπία ενίσχυσης από σύστημα ήλωσης (Panet, 1995)

a/a	Περιγραφή υποστήριξης	k_{sn} [MPa]	k_{sf} [MPa]
1	Ήλοι σημειακής πάκτωσης μήκους 4m, διαμέτρου 18mm, τοποθετημένοι 1/m ²	22.5	0

Σε κυκλικό άνοιγμα ακτίνας R , για γραμμική ελαστική συμπεριφορά της ήλωσης, σύμφωνα με το νόμο του Hooke, η μεταβολή της μέσης πίεσης p_{sb} που προσφέρουν ελαστικοί ήλοι συνδέεται με τη μεταβολή της μετατόπισης δ_b (θεωρώντας ότι είναι ομοιόμορφη) της παρειάς του ανοίγματος, γραμμικά με τη σχέση:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{d(\varepsilon_b)}{dp_{sb}} = \frac{d\left(\frac{\delta_b}{R}\right)}{d\frac{T_b}{s_c \cdot s_l}} = \frac{s_c \cdot s_l}{R} \cdot Q_t = \frac{s_c \cdot s_l}{R} \cdot \left(\frac{4 \cdot l_b}{\pi \cdot d_b^2 \cdot E_b} + Q_r \right) \quad (1-12)$$

όπου $1/k_b$ η ενδοτικότητα του συστήματος των ομοιόμορφα κατανεμημένων ήλων στην παρειά του ανοίγματος, και k_b η δυστροπία του. Στο Σχήμα 1-8 δίνονται γραφικά οι παραπάνω σχέσεις.



Σχήμα 1-8. Καταστατικός νόμος συστήματος ήλωσης σε αξονοσυμμετρική σήραγγα

1.5 Βελτίωση της βραχομάζας λόγω της αντίστασης στη διάτμηση ασυνεχειών

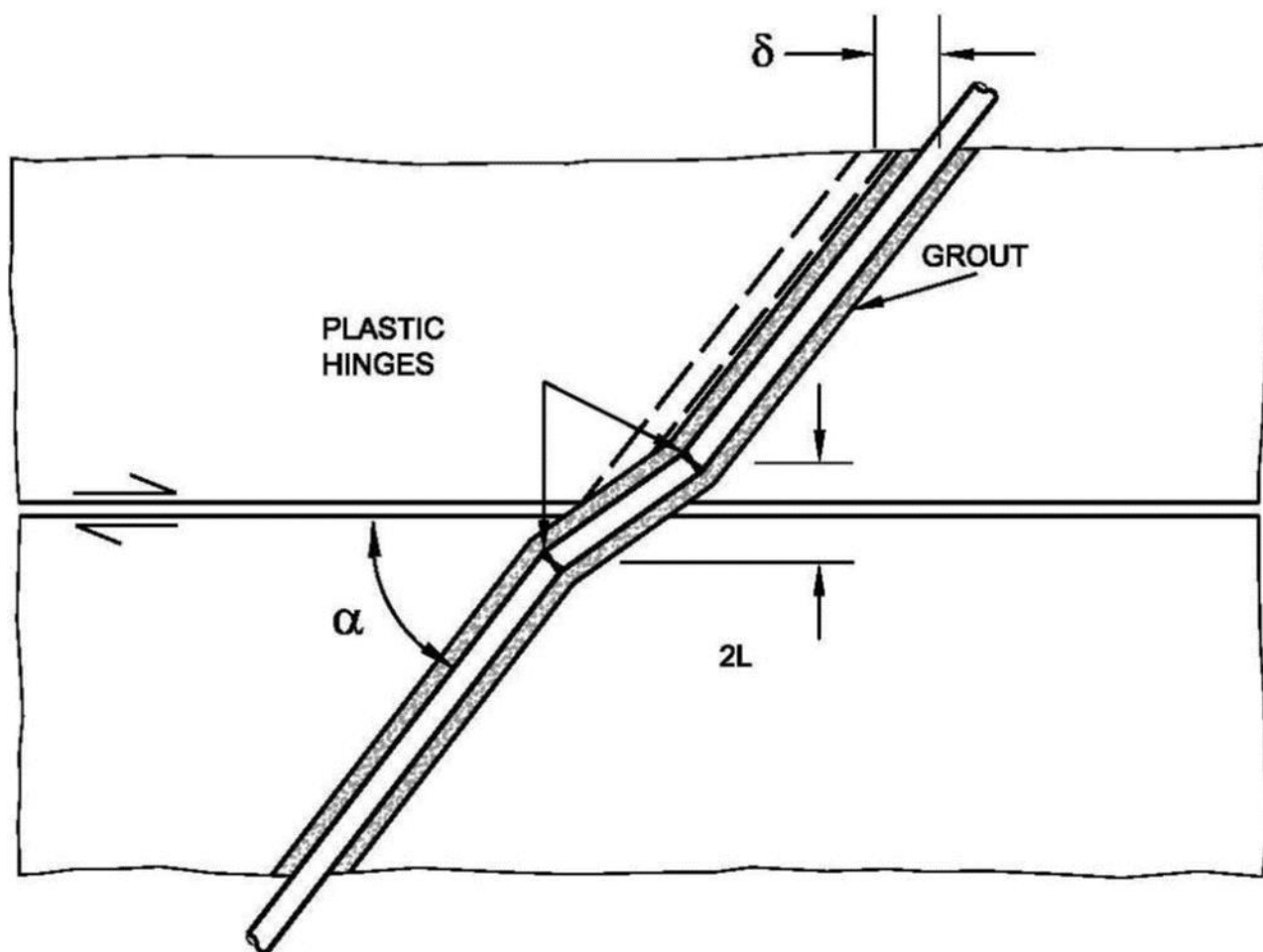
Η δράση των ήλων δεν περιορίζεται στην ανάρτηση ή στον διαμήκη οπλισμό του πετρώματος. Εφόσον υπάρχουν στη βραχομάζα ασυνέχειες, οι ήλοι ολόσωμης πάκτωσης προσφέρουν διατμητική αντίσταση στην ολίσθηση των ασυνεχειών ή και στην περιστροφή τεμαχίων. Ο ήλος αυξάνει τη διατμητική αντίσταση της ασυνέχειας με τους παρακάτω μηχανισμούς (Pells, 2008):

- δράση βλήτρου – Δύναμη R_1 ,
- αύξηση της ορθής δύναμης ως αποτέλεσμα της προέντασης – Δύναμη R_2 ,
- αύξηση της ορθής τάσης ως αποτέλεσμα της διαστολής της ασυνέχειας – Δύναμη R_3 ,
- αύξηση της ορθής δύναμης ως αποτέλεσμα τοπικής μήκυνσης του ήλου – Δύναμη R_4 ,
- αύξηση της διατμητικής αντίστασης λόγω της συνιστώσας δύναμης του ήλου στη διεύθυνση κίνησης – Δύναμη R_5 .

1.5.1 Δράση βλήτρου

Ο υπολογισμός της δράσης βλήτρου βασίζεται σε δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών (Dight, 1982; Pellet, 1994; Pellet & Egger, 1996) και θεωρητικές αναλύσεις (Σχήμα 1-9). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στους πλήρως τσιμενταρισμένους ήλους για μικρές διατμητικές μετατοπίσεις (τυπικά $< 1.5\text{mm}$)· αυτές βρίσκονται σε μικρή απόσταση εκατέρωθεν της ασυνέχειας.
- Σύνθλιψη του κονιάματος ή πετρώματος (όποιο από τα δύο είναι το πιο αδύναμο) συμβαίνει σε παρόμοιες μικρές μετατοπίσεις.



Σχήμα 1-9. Τσιμενταρισμένος ήλος σε διάτμηση

Με βάση τα πειράματά του, την πλαστική θεωρία κάμψης και τη θεωρία διευρυνόμενου κυλίνδρου του Ladanyi (1976), ο Dight (1982) ανέπτυξε εξισώσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης βλήτρου R_1 . Για την απλουστευμένη παραδοχή της αντοχής ενέματος ίσης ή μικρότερης από του πετρώματος, και για ασυνέχεια δίχως πλήρωση, η αντίδραση του βλήτρου, με διορθώσεις από τον Carter (2003), είναι:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{D^2}{4} \cdot \sqrt{1.7 \cdot f_{ys} \cdot P_u \cdot \pi \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_y} \right)^2 \right]} \\
 P_u &= f_{Rc} \cdot \left[\frac{\delta}{K \cdot (\pi \cdot D + 2\delta)} \right]^{A/2}; \quad A = \frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}; \\
 K &= f_{Rc} \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \cdot \ln \left(\frac{f_{Rc}}{2p_0 - f_{Rt}} \right) + \frac{f_{Rc}}{2p_0 - f_{Rt}} \left[\frac{2\nu(P_0 - f_{Rt}) - f_{Rt}}{E} \right]
 \end{aligned}
 \tag{1-13}$$

f_{ys}, T_y : τάση και δύναμη διαρροής στον ήλο,
 f_{Rc} : μονοαξονική αντοχή του πετρώματος,
 f_{Rt} : εφελκυστική αντοχή του πετρώματος,
 φ : γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος,
 ν, E : ελαστικές σταθερές του πετρώματος,
 P_0 : αρχική τάση στο πέτρωμα στο επίπεδο,
 δ : διατμητική μετατόπιση στην ασυνέχεια,
 T : αρχική τάνυση του ήλου.

Ο όρος στις αγκύλες, στη σχέση για την R_1 , λαμβάνει υπόψη την επίδραση της δύναμης τάνυσης του ήλου, στην πλαστική ροπή.

1.5.2 Αύξηση ορθής τάσης λόγω προέντασης

Εφόσον ο ήλος προενταθεί με μία δύναμη P_{st} , πριν από την ενεμάτωση, τότε η ορθή δύναμη στην ασυνέχεια είναι:

$$R_2 = P_{st} \cdot \sin \left[\alpha - \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{2L} \right) \right] \quad (1-14)$$

Η R_2 τροποποιείται από τις R_3 και R_4 , αλλά η επίδρασή τους είναι δευτέρας τάξης.

1.5.3 Διαστολή της ασυνέχειας

Αν υποθεθεί ότι σε έναν πλήρως τσιμενταρισμένο ήλο η μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης στον ήλο πραγματοποιείται μεταξύ δύο πλαστικών αρθρώσεων (Dight, 1982), τότε η ορθή δύναμη που παράγεται από τη διαστολή είναι:

$$R_3 = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot E_s}{4} \left(\frac{\delta \cdot \tan i}{2L} \right) \sin^3 \alpha \quad (1-15)$$

α : γωνία μεταξύ ήλου και ασυνέχειας

i : γωνία διαστολής

1.5.4 Μήκυνση του ήλου

Η ορθή δύναμη που οφείλεται στην επιμήκυνση είναι:

$$R_4 = \frac{\left(\frac{2L}{\tan \alpha} + \delta \right) \cdot \sin \alpha}{2L \cdot \cos \gamma} - 1$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{2L \cdot \tan \alpha}{2L + \delta \cdot \tan \alpha} \right) \quad (1-16)$$

1.5.5 Συνιστώσα προέντασης στη διεύθυνση διάτμησης

Η προένταση προσφέρει συνιστώσα δύναμη κατά μήκος της ασυνέχειας:

$$R_5 = P_{st} \cdot \cos \left[\alpha - \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{2L} \right) \right] \quad (1-17)$$

1.5.6 Συνολική δράση

Οι δυνάμεις R_1 και R_5 δύνανται να θεωρηθούν ότι αυξάνουν τη συνιστώσα της συνοχής κατά μήκος της ασυνέχειας. Οι άλλες τρεις συνιστώσες αυξάνουν τη συνιστώσα της τριβής της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών, αυξάνοντας την ενεργή ορθή τάση στη διεπιφάνεια. Αν οι ήλοι βρίσκονται σε αποστάσεις S , έτσι ώστε κάθε ένας να επηρεάζει μια ζώνη S^2 , οι αντίστοιχες αυξήσεις της συνοχής Δc και της ενεργής ορθής τάσης $\Delta \sigma_n$, είναι:

$$\Delta c = \frac{R_1 + R_5}{S^2}; \quad \Delta \sigma_n = \frac{R_2 + R_3 + R_4}{S^2} \quad (1-18)$$

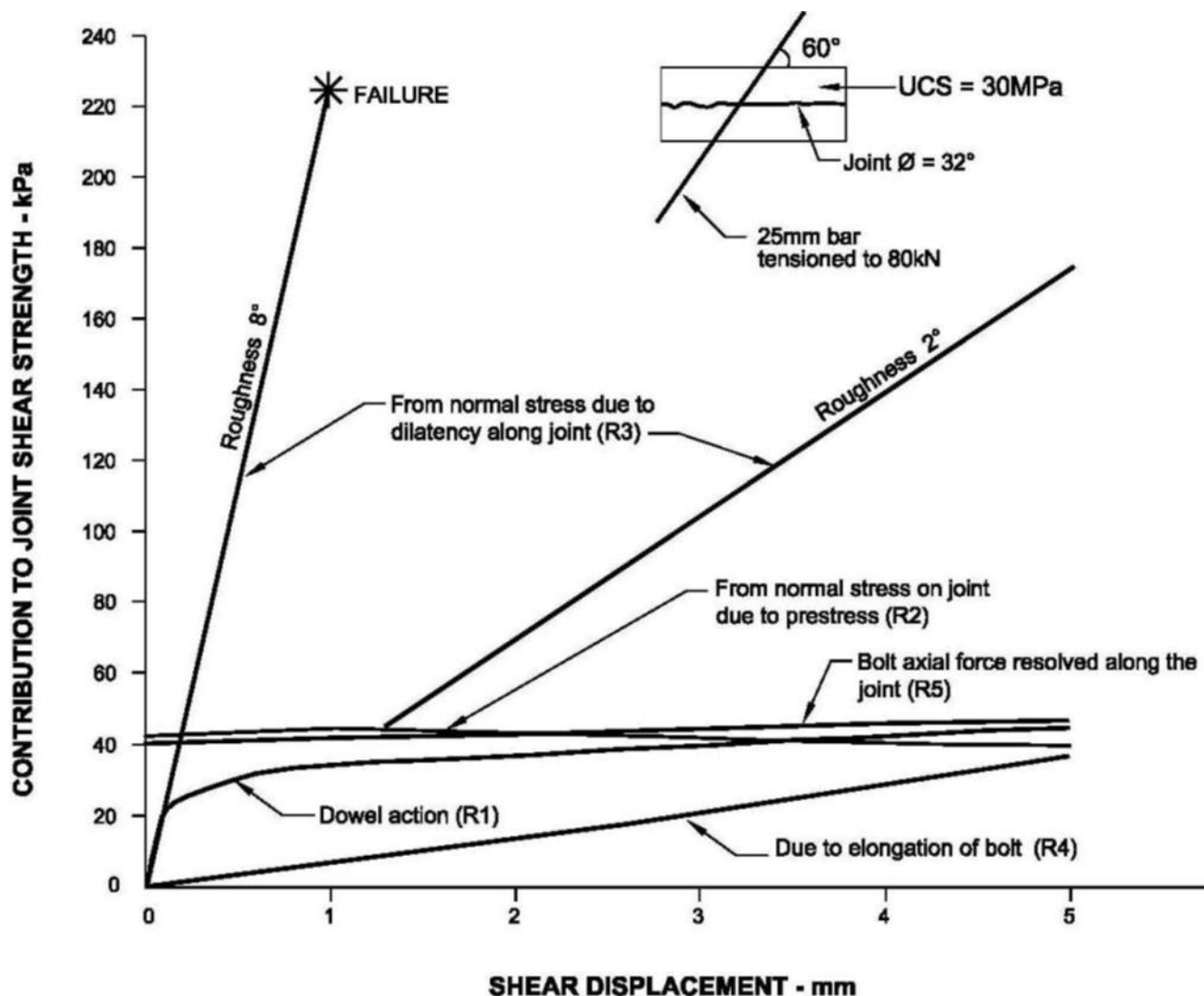
Ως εκ τούτου, η ισοδύναμη διατμητική αντοχή της ασυνέχειας s_j θα είναι:

$$s_j = (c_j + \Delta c) + (\sigma_{n0} + \Delta \sigma_n) \cdot \tan \varphi_j \quad (1-19)$$

Όπου, c_j είναι η ενεργή συνοχή της ασυνέχειας, φ_j η ενεργή γωνία τριβής της ασυνέχειας, σ_{n0} η αρχική ενεργή ορθή τάση στην ασυνέχεια, Δc η ισοδύναμη αύξηση της ενεργής συνοχής, $\Delta \sigma_n$ η ισοδύναμη αύξηση της

ενεργής ορθής τάσης. Η δύναμη R_2 και το μέγιστο μέρος της δύναμης R_5 έχουν δημιουργηθεί από την αρχική τάνυση του ήλου. Οι σχέσεις (1-16) για την R_4 και (1-17) για την R_5 προϋποθέτουν ότι οι ήλοι είναι κεκλιμένοι ως προς τις ασυνέχειες, έτσι ώστε οι μετακινήσεις στις διεπιφάνειες να τους εφελκύουν. Η κλίση αυτή των ήλων είναι επωφελής, όταν είναι στη φορά της διάτμησης. Όμως, ήλοι με κλίση αντίθετη είναι αναποτελεσματικοί. Ως εκ τούτου, δεδομένης της αβεβαιότητας, σκόπιμο είναι να τοποθετούνται γενικά κάθετα στις ασυνέχειες, και μόνο κοντά σε στηρίξεις να αποκλίνουν από την κάθετο.

Ο Pells (2008) μελέτησε σε ασυνέχειες πετρώματος που διαπερνώνται από ήλους $\varnothing 25$, τη συνεισφορά των συνιστωσών της διατμητικής αντοχής. Η γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών ήταν 32° , το πέτρωμα είχε μονοαξονική αντοχή 30MPa, η τάνυση ήταν 80kN, και η κλίση του ήλου ως προς τις ασυνέχειες 60° . Στο Σχήμα 1-10, απεικονίζεται η συνεισφορά των συνιστωσών της διατμητικής αντοχής ως συναρτήσεων της διατμητικής μετατόπισης. Παρατηρούμε ότι για μετατόπιση μεγαλύτερη από 2mm η δράση βλήτρου R1 και η προένταση R2 είχαν παρόμοια μέτρια συνεισφορά, ενώ η συνεισφορά λόγω μήκυνσης R4 ήταν μικρή. Αντίθετα, πολύ μεγαλύτερη ήταν η συνεισφορά λόγω διαστολής R3, και τούτο ήταν ιδιαίτερα εμφανές όταν οι ασυνέχειες ήταν τραχείες και το πέτρωμα ισχυρό. Συνολικά, στα 2mm μετατόπιση η συνεισφορά στη διατμητική αντοχή των R1 (δράση βλήτρου) και R3 (τραχύτητα), κυμαινόταν περί τα 150kPa (για ενδιάμεση τιμή της R3), που ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από τη συνεισφορά R2 ≈ 40 kPa που οφειλότανε στην τάνυση του ήλου.



Σχήμα 1-10. Συνεισφορά διαφόρων αντιδράσεων, λόγω του τανυμένου ήλου, στη διατμητική αντοχή ασυνέχειας (Pells, 2008)

Συνάγεται επομένως ότι η συμβολή των ηλώσεων στην αύξηση της διατμητικής αντίστασης των ασυνεχειών είναι μεγάλη, και έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της βραχομάζας. Τη συρραφή

αυτή και την ως εκ τούτου βελτίωση της βραχομάζας από τους ήλους ολόσωμης πάκτωσης, οι Hoek & Brown (1980) τη λαμβάνουν υπόψη με τη βαθμονόμησή της σε μία κατηγορία ανώτερης ποιότητας.

1.6 Έλεγχοι

Οι έλεγχοι που εφαρμόζονται για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας (πάκτωσης) και της τάνυσης των ενεργητικών ήλων, είναι:

(α) Εξόλκευση (ISRM, 1974 & ASTM D 4435-84 (reapproved 1998)). (1) Μέχρι το φορτίο αστοχίας. Κατά τη δοκιμή καταγράφονται η εφαρμοζόμενη δύναμη και η μετατόπιση. Στοχεύει στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας. (2) 5% των ήλων τανύεται μέχρι το 80% του φορτίου διαρροής (Sinha, 1989). Η παραμόρφωση του ήλου δεν θα πρέπει να ξεπερνά την ελαστική παραμόρφωση. Στοχεύει στον συνεχή μη καταστροφικό έλεγχο.

(β) Περιστροφή περικοχλίου με ροπόκλειδο για την τάνυση του αγκυρίου. Μετρείται η ροπή που απαιτείται για την εκκίνηση και τη συνέχιση της περιστροφής του περικοχλίου. Η ροπή δύναται να συσχετιστεί με την τάνυση.

(γ) Πίεση σε κελί φορτίου. Το κελί τοποθετείται μεταξύ της πλάκας του αγκυρίου και του πετρώματος. Μετρείται με μεγάλη ακρίβεια η δύναμη στο αγκύριο ως συνάρτηση του χρόνου.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- AFTES (2014). “Rock Bolting Technology”, Recommendation GT6R4A1, TUNNELS ET ESPACE SOUTERRAIN - n°241 - Janvier/Février.
- ASTM D 4435-84 (reapproved 1998). Standard Test Method for Rock Anchor Pull Test.
- Δημητράκος Δ (1964). Μέγα λεξικόν όλης της Ελληνικής γλώσσης, Εκδ. Οίκος Ν Ασημακόπουλος & Σια, Αθήνα.
- Dight PM (1982). Improvements in the stability of rock walls in open pit mines, PhD Thesis, Monash University, Melbourne, Australia, 1982.
- Douglas TH and Arthur, LJ (1983) A guide to the use of rock reinforcement in underground excavations, R101, CIRIA, London (ISBN: 978-0-86017-212-3). Go to: www.ciria.org
- DSI (-). “Technical Brochures”, DYWIDAG-Systems International.
- Hoek E and Brown ET (1980). “Underground Excavations in Rock”, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek E, Kaiser PK, & Bawden WF (1995). “Support of underground excavations in hard rock”, Balkema, ch. 12.
- ISRM (1974). “Suggested methods for rock bolt testing”, in: Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, ed. ET Brown, Pergamon, 1981.
- Παπασπύρου Σ (1985). Αγκυρώσεις.
- Pellet F and Egger P (1996). “Analytical Model for the Mechanical Behaviour of Bolted Rock Joints Subjected to Shearing”, Rock Mech. Rock Engng, 29 (2), 73-97.
- Peng Syd S (1978). Coal Mine Ground Control, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Sinha RS (1989). “Underground Structures – Design and Instrumentation, Ch. 4. Rock Reinforcement”, Developments in Geotechnical Engineering-59A, Elsevier.

Σοφιανός ΑΙ (1996). «Για κάποιους πιο αντιπροσωπευτικούς βασικούς όρους των μέτρων υποστήριξης υπογείων εκσκαφών», Πρακτικά 3^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τόμος 2, σελ. 417-23.

Stephansson O ed. (1984). “Rock Bolting – Theory and Application in Mining and Underground Construction”, Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, Abisco, 28 Aug – 2 Sep 1983, Bakema, p. 630.

Stillborg B (1994). Professional users handbook for rock bolting, Trans Tech Publications.

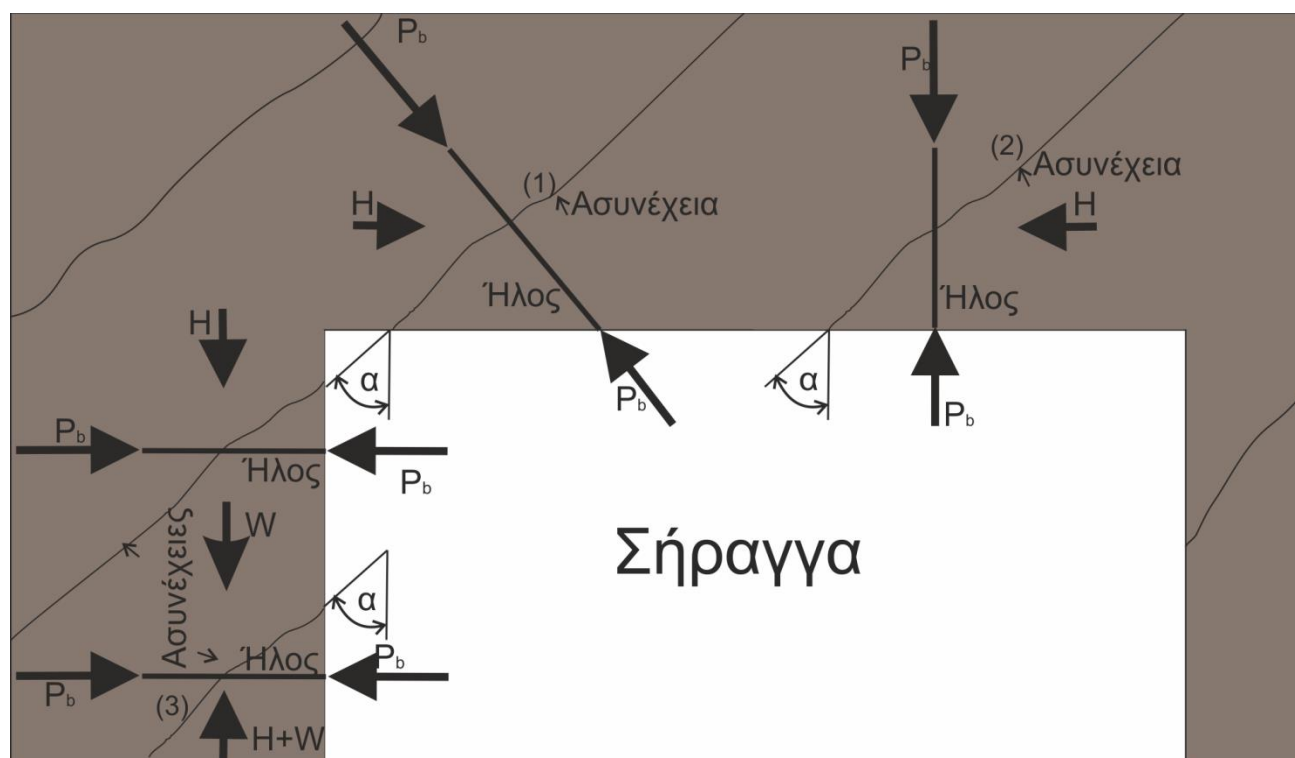
USCE (1980). “Engineering and design: rock reinforcement; Engineer Manual”, EM 1110-1-2907. Available from the Office of the Chief of Engineers, Washington DC, 20314.

Windsor CR (1997). “Rock reinforcement systems”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34: 919-951.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Στο Σχήμα 1-12 φαίνονται τρεις περιπτώσεις ασυνεχειών πετρώματος που πιέζονται από την περιβάλλουσα βραχομάζα με δύναμη H , των οποίων η ευστάθεια εξαρτάται από την τάνση των ήλων P_b που το συγκρατούν σε επαφή με την περιβάλλουσα βραχομάζα. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις (1 & 2) οι ασυνέχειες βρίσκονται στην οροφή υπόγειου ανοίγματος, ενώ στην τρίτη (3) βρίσκονται στο τοίχωμα. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις το τέμαχος είναι αβαρές, ενώ στην τρίτη έχει βάρος και ως εκ τούτου φορτίζεται με πρόσθετη δύναμη W . Στην πρώτη περίπτωση η διεύθυνση των ήλων είναι κάθετη στις ασυνέχειες, ενώ στις επόμενες είναι κάθετη στην παρειά της εκσκαφής (και ως εκ τούτου και στην H). Η αντοχή της ασυνέχειας οφείλεται στην τριβή ϕ μόνο (δηλ. δεν υπάρχει συνοχή).



Σχήμα 1-11. Ήλωση τεμαχών.

Δώστε ανισώσεις συσχετισμού των παραμέτρων H , P_b , α , ϕ , και W , που θα αποτρέπουν τη χαλάρωση της βραχομάζας.

Απάντηση/Λύση

Ασυνέχεια (1). Η ασυνέχεια βρίσκεται στην οροφή, το πέτρωμα είναι αβαρές και ο ήλος τοποθετείται κάθετα στην ασυνέχεια. Αν γ η γωνία που σχηματίζει η συνισταμένη R των δυνάμεων H και P_b με την κάθετο στην ασυνέχεια (Σχήμα 1-12α), τότε η γωνία μεταξύ της H και της συνισταμένης R ισούται με $\alpha - \gamma$. Εφαρμόζοντας τον νόμο των ημιτόνων στο τρίγωνο που σχηματίζουν οι H , P_b με τη συνισταμένη τους R , προκύπτει:

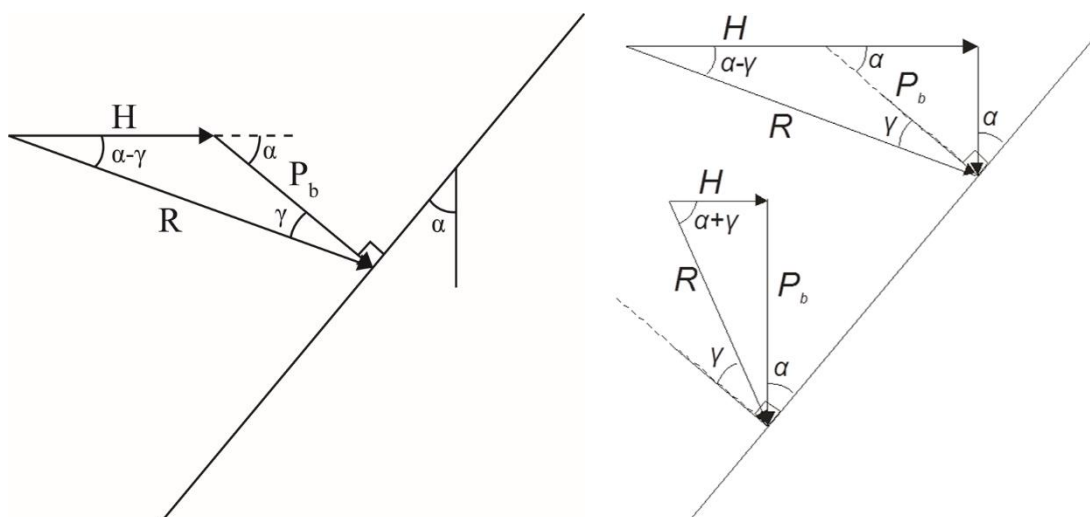
$$\frac{H}{\sin \gamma} = \frac{P_b}{\sin(\alpha - \gamma)}$$

Η ευστάθεια απαιτεί:

$$\gamma < \phi$$

Εκ των δύο παραπάνω σχέσεων προκύπτει ότι:

$$\frac{P_b}{H} = \frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\sin \gamma} > \frac{\sin(\alpha - \phi)}{\sin \phi} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \phi - \sin \phi \cdot \cos \alpha}{\sin \phi} = \sin \alpha \cdot (\cot \phi - \cot \alpha)$$



α. Ήλωση κάθετη στην ασυνέχεια.

β. Κατακόρυφη ήλωση.

Σχήμα 1-12. Ήλωση ασυνεχειών σε οροφή υπογείου ανοίγματος.

Ασυνέχεια (2). Η ασυνέχεια βρίσκεται στην οροφή, το πέτρωμα είναι αβαρές και ο ήλος τοποθετείται κατακόρυφα. Έστω γ και πάλι η γωνία μεταξύ της συνισταμένης R των δυνάμεων H και P_b και της καθέτου στην ασυνέχεια (Σχήμα 1-12β). Τότε η γωνία μεταξύ της πιο πάνω συνισταμένης και της H θα είναι $\alpha \pm \gamma$. Το τρίγωνο που προκύπτει από τα διανύσματα H , P_b και τη συνισταμένη τους R είναι ορθογώνιο. Λαμβάνοντας και πάλι υπόψη ότι $\gamma < \phi$ θα πρέπει για:

$$\tan \alpha < \frac{P_b}{H} \Rightarrow \frac{P_b}{H} = \tan(\alpha + \gamma) < \tan(\alpha + \phi)$$

$$\tan \alpha > \frac{P_b}{H} \Rightarrow \frac{P_b}{H} = \tan(\alpha - \gamma) > \tan(\alpha - \phi)$$

Ο τύπος ισχύος των παραπάνω σχέσεων είναι επομένως:

$$\tan(\alpha - \phi) < \frac{P_b}{H} < \tan(\alpha + \phi)$$

Αν το συγκρατούμενο τέμαχος έχει βάρος W , μειώνεται αντίστοιχα η τιμή της πίεσης P_b από τους ήλους στη διάκλαση, λόγω του αναρτημένου βάρους, οπότε:

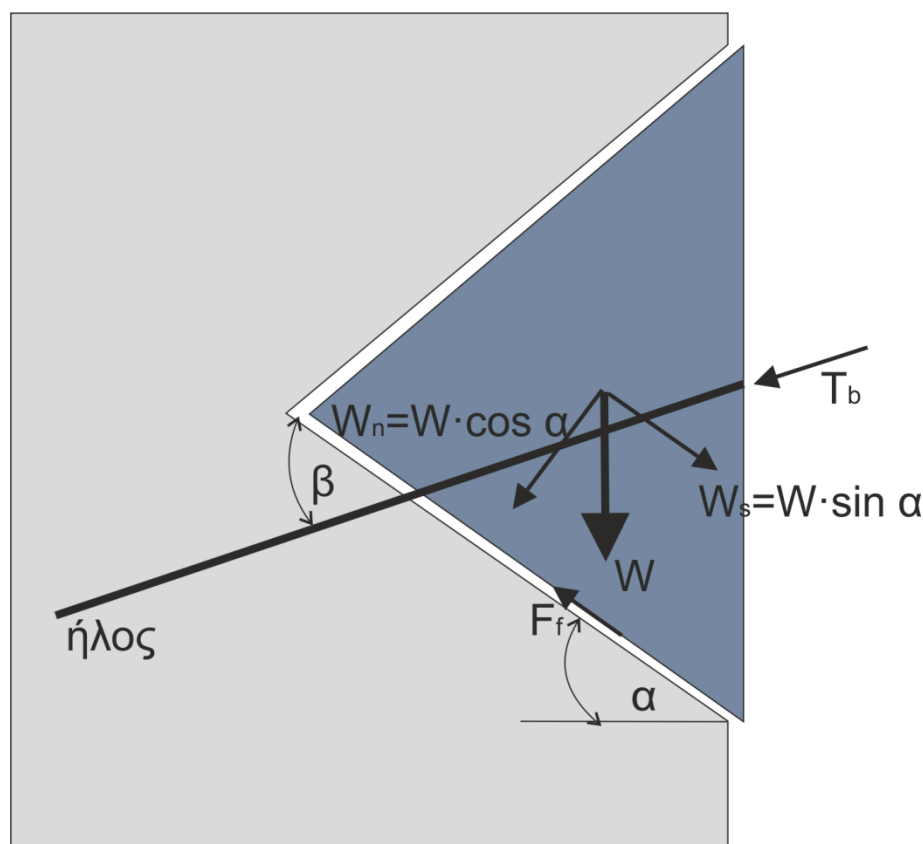
$$\tan(\alpha - \phi) < \frac{P_b - W}{H} < \tan(\alpha + \phi)$$

Ασυνέχεια (3). Η ασυνέχεια βρίσκεται στα κατακόρυφα τοιχώματα, το πέτρωμα έχει βάρος και ήλοι τοποθετούνται οριζόντιοι. Στην ασυνέχεια αυτή, το βάρος αυξάνει τη δύναμη πίεσης του πετρώματος στην ασυνέχεια κατά W , οπότε:

$$\tan(\alpha - \phi) < \frac{P_b}{H + W} < \tan(\alpha + \phi)$$

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Ένα τέμαχος πετρώματος, στις παρειές υπόγειου θαλάμου, βάρους W δύναται να ολισθήσει σε ασυνέχεια που κλίνει υπό γωνία α ως προς την οριζόντια. Το τέμαχος συγκρατείται από ήλο που έχει κλίση β ως προς το επίπεδο της ασυνέχειας. Παράγετε μία σχέση για την τάνυση του ήλου T_b με όρους τη γωνία β , την κλίση της ασυνέχειας α , και τις παραμέτρους αντοχής c και ϕ , της διεπιφάνειας τεμάχους-επιπέδου. Υπολογίστε τη γωνία β για την οποία ελαχιστοποιείται η απαίτηση τάνυσης του ήλου.



Σχήμα 1-13. Τάνυση ήλου.

Απάντηση/Λύση

Η δύναμη, N , που ασκείται κάθετα στο επίπεδο και η δύναμη S που ασκείται κατά μήκος του επιπέδου α , δίνονται από τις σχέσεις:

$$N = W \cdot \cos \alpha + T_b \cdot \sin \beta ; S = W \cdot \sin \alpha - T_b \cdot \cos \beta$$

Η οριακή κατάσταση κατά την οποία η διεπιφάνεια βραχομάζας / επιπέδου α έχει φτάσει την μέγιστη αντοχή της δίνεται από την σχέση:

$$W \cdot \sin \alpha - T_b \cdot \cos \beta = c \cdot A + (W \cdot \cos \alpha + T_b \cdot \sin \beta) \cdot \tan \varphi$$

όπου c η συνοχή και A η επιφάνεια επαφής του τεμάχους. Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς T_b :

$$T_b = \frac{W \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \varphi) - c \cdot A}{\cos \beta + \sin \beta \cdot \tan \varphi}$$

Για να βρούμε την ελάχιστη ένταση των αγκυρίων, θέτουμε την παράγωγο της T ως προς β ίση με μηδέν και λύνουμε ως προς β . Γνωρίζοντας ότι η T_b θα ελαχιστοποιηθεί όταν μεγιστοποιηθεί ο παρονομαστής, έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} (\cos \beta + \sin \beta \cdot \tan \varphi) = -\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \varphi = 0 \Rightarrow \tan \beta = \tan \varphi \Rightarrow \beta = \varphi$$

Κατά συνέπεια, η απαίτηση έντασης του ήλου ελαχιστοποιείται όταν τοποθετείται με γωνία β , ως προς το επίπεδο, ίση με τη γωνία τριβής φ μεταξύ του τεμάχους και του επιπέδου. Σε ένα επίπεδο με πολύ μικρή γωνία τριβής, π.χ $\varphi \approx 0^\circ$, το τέμαχος του βράχου θα πρέπει να κρεμαστεί από τους ήλους, οι οποίοι θα πρέπει να τοποθετηθούν υπο-παράλληλα προς την ασυνέχεια. Σε ένα πολύ τραχύ επίπεδο π.χ $\varphi \approx 90^\circ$, το τέμαχος θεωρητικά θα αγκυρωθεί κυρίως στο επίπεδο, με τους ήλους τοποθετημένους κάθετα στην ασυνέχεια.

Κριτήριο αξιολόγησης 3

Ήλος Ø16, φορτίου διαρροής 100kN και θραύσης 110kN, με διαστελλόμενο κέλυφος αποτελούμενο από 3 σφήνες με εμβαδόν κάθε μίας 500mm², βρίσκεται πακτωμένος σε διάτρημα Ø35 πετρώματος θλιπτικής αντοχής 30MPa, και γωνίας τριβής μετάλλου κελύφους-πετρώματος $\varphi_b \approx 16^\circ$. Αν η δύναμη εξόλκευσης είναι 60kN, εκτιμήστε τη γωνία σύμπτωσης i_b .

Απάντηση/Λύση

Η απάντηση στην αντίστοιχη ερώτηση, δίνεται με την αντικατάσταση των παραπάνω δεδομένων στη σχέση (1-1).

Κριτήριο αξιολόγησης 4

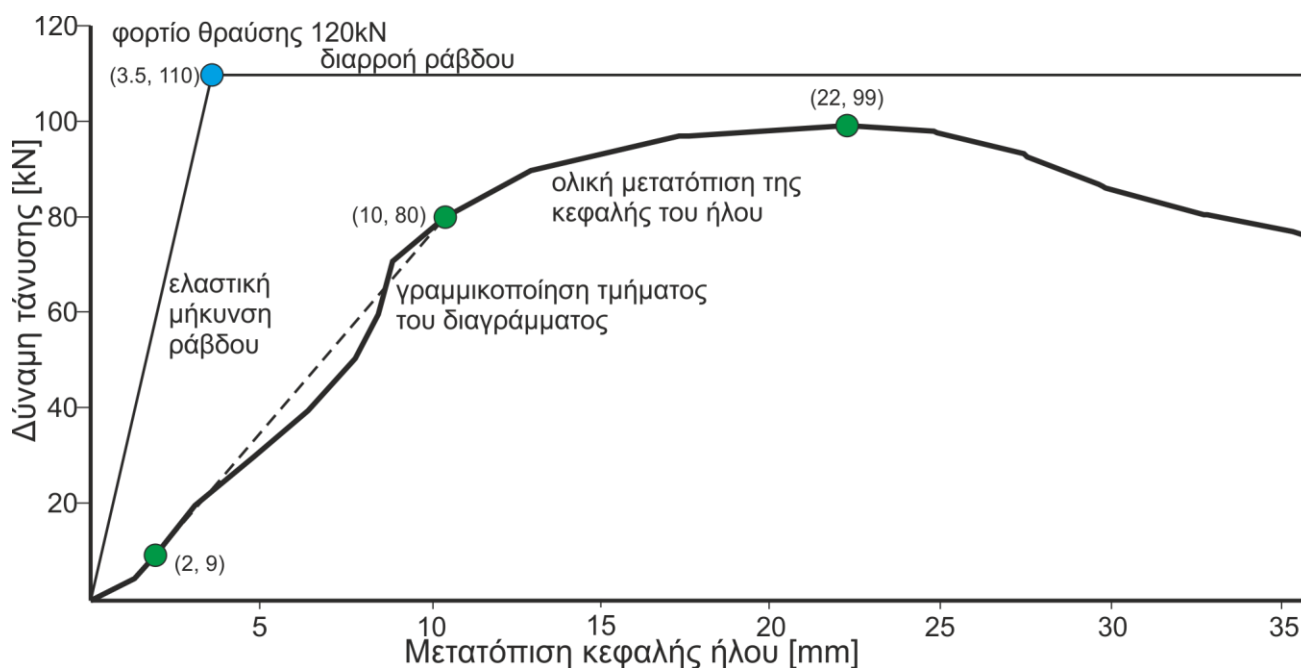
Ροπόκλειδο έχει μέγιστη δυνατότητα τάνυσης 400Nm. Αν η διάμετρος του στελέχους ήλου είναι 20mm και η γωνία τριβής φ μεταξύ των μεταλλικών μερών είναι ίση με 20° , και η κλίση του σπειρώματος 2° , εκτιμήστε τη μέγιστη τάνυση που μπορείτε να μετρήσετε στον ήλο. Αν αγνοήσετε την κλίση του σπειρώματος, ως πολύ μικρή, πόσο θα αλλάξει η εκτίμησή σας για τη μέγιστη δύναμη;

Απάντηση/Λύση

Η απάντηση στην αντίστοιχη ερώτηση δίνεται με την αντικατάσταση των παραπάνω δεδομένων στη σχέση (1-7).

Κριτήριο αξιολόγησης 5

Στο σχήμα δίνεται το διάγραμμα δοκιμής εξόλκευσης ήλου σημειακής πάκτωσης. Η διάμετρος του στελέχους του ήλου είναι 16mm. Συμπληρώστε με βάση το διάγραμμα το φύλλο αποτελεσμάτων της δοκιμής, και στη συνέχεια υπολογίστε για τον ήλο: (α) το μήκος του, (β) τις τάσεις θραύσης, διαρροής, και μέγιστης ανάληψης φορτίου, (γ) την ενδοτικότητα Q_r .



Σχήμα 1-14. Ανάλυση φορτίου κατά την εξόλκευση.

Απάντηση/Λύση

(α) Για το στέλεχος του ήλου ισχύει η σχέση:

$$P_b = \frac{A_b \cdot E_b}{L_b} \cdot \Delta L_b$$

L_b : Μήκος ήλου

A_b : Εμβαδόν διατομής ήλου

d_b : Διάμετρος ήλου

E_b : Μέτρο Young του ήλου = 210 GPa

d_b = 16 mm

A_b = $\pi \cdot d_b^2 / 4$ = 201.06 mm²

Για μήκυνση του ήλου $\Delta L_b = 3.5$ mm η δύναμη που αναλαμβάνει ο ήλος είναι $P_b = 110$ kN. Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση υπολογίζουμε το μήκος του ήλου:

$$L_b = A_b \cdot \frac{\Delta L_b}{P_b} \cdot E_b = \frac{\pi \cdot 0.016^2}{4} \cdot \frac{0.0035}{110} \cdot 210000000 \approx 1.35 \text{ m}$$

(β) Για τον χάλυβα του ήλου,

Το φορτίο θραύσης είναι 120 kN. Άρα, η τάση θραύσης είναι:

$$f_u = 120 \text{ kN} / A_b = 597 \text{ MPa}$$

Το φορτίο διαρροής είναι 110 kN. Άρα, η τάση διαρροής είναι:

$$f_y = 110 \text{ kN} / A_b = 547 \text{ MPa}$$

Η μέγιστη ανάλυση φορτίου είναι 120 kN. Άρα, η αντίστοιχη τάση είναι:

$$f_{\max} = 99 \text{ kN} / A_b = 492 \text{ MPa}$$

(γ) Η σταθερά Q_t υπολογίζεται με βάση το διάγραμμα δύναμης-μήκυνσης της δοκιμής εξόλκευσης από τις σχέσεις:

$$Q_e = \frac{d\delta_{be}}{dT_b} = \frac{4 \cdot L_b}{\pi \cdot d_b^2 \cdot E_b} = \frac{4 \cdot 1.35}{\pi \cdot 0.016^2 \cdot 210000} = 0.032 \text{ mm/kN}$$

$$Q_t = \frac{d\delta_{bt}}{dT_b} = \frac{\delta_{bt2} - \delta_{bt1}}{T_{b2} - T_{b1}} = \frac{10 - 2}{80 - 9} = 0.113 \text{ mm/kN}$$

$$Q_r = \frac{(\delta_{bt2} - \delta_{be2}) - (\delta_{bt1} - \delta_{be1})}{T_{b2} - T_{b1}} = Q_t - Q_e = 0.113 - 0.032 = 0.081 \text{ mm/kN}$$

όπου (δ_{bt1}, T_{b1}) , (δ_{bt2}, T_{b2}) είναι δύο σημεία του γραμμικού τμήματος του διαγράμματος δύναμης-μήκυνσης της δοκιμής εξόλκευσης.

Ασκήσεις

Άσκηση 1

Σχεδιάστε τη μέγιστη πίεση υποστήριξης που δύνανται να προσφέρουν αγκύρια σημειακής πάκτωσης, σε κυκλικό άνοιγμα συναρτήσει της διαμέτρου του, που κυμαίνεται από 4 έως 12m. Τα αγκύρια είναι: α. Πολύ ελαφρά db=16mm, sc=sl=2.5m, Tbf=110kN, β. Ελαφρά, db=19mm, sc=sl=2.0m, Tbf=180kN, γ. Μέτρια, db=25mm, sc=sl=1.5m, Tbf=267kN, δ. Βαριά, db=34mm, sc=sl=1.0m, Tbf=345kN.

Άσκηση 2

Κεφάλαιο 2

Σύνοψη

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

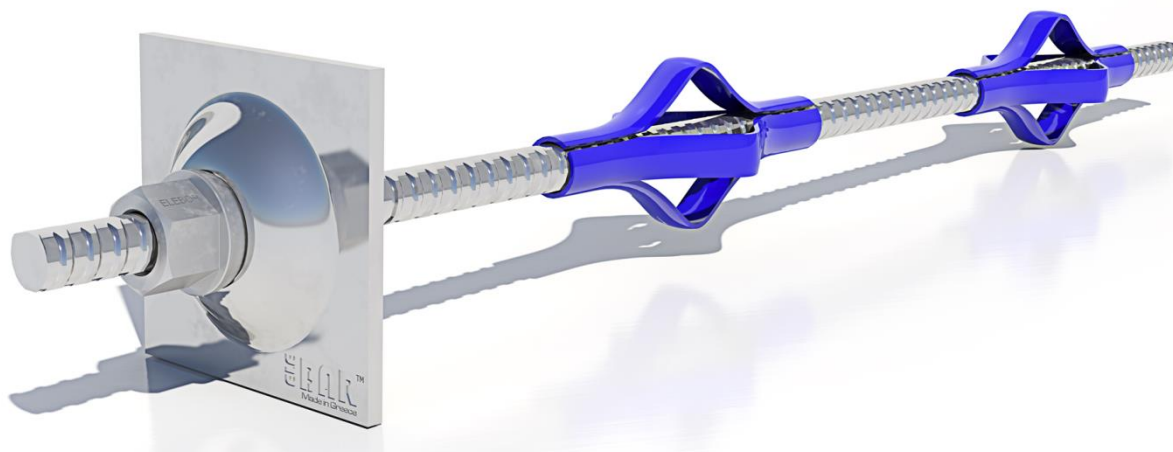
Προαπαιτούμενη γνώση

Μαθήματα: Μηχανική των πετρωμάτων, Τεχνική Γεωλογία. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Hoek et al. (1995), Stillborg (1994), GT6R4A1 (2014).

2. Παθητικοί ήλοι

2.1 Ακτινικά τοποθετούμενοι ήλοι

Το πέτρωμα γύρω από το άνοιγμά του δεν έχει γενικά τη δυνατότητα να παραλαμβάνει σημαντικές εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις. Η αδυναμία αυτή, όπως και στο σκυρόδεμα, δύναται να αντιμετωπίζεται με τη χρήση παθητικών ήλων (διαμηκών ράβδων), σε ολόσωμη επαφή με το πέτρωμα, που λειτουργούν ως οπλισμός. Ειδικά, όταν οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε, είτε η εγκατάσταση της στήριξης να μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ κοντά σε προχωρούν μέτωπο είτε να αναμένονται μεταβολές της τάσης σε μεταγενέστερο στάδιο εξόρυξης, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι παθητικοί ήλοι (Σχήμα 2-1) στη θέση των ενεργητικών. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ αυτών είναι ότι οι ενεργητικοί εφαρμόζουν μια προένταση στο πέτρωμα, ενώ η ενεργοποίηση της έντασης στους παθητικούς ήλους εξαρτάται από την παραμόρφωση του πετρώματος. Οι Hoek & Brown (1980, p.281) ορθά θεωρούν ότι τα στοιχεία αυτά σκοπό έχουν τη συρραφή του πετρώματος. Στα παραδείγματα μάλιστα αλληλεπίδρασης πετρώματος - υποστήριξης τα λαμβάνουν έμμεσα μόνο υπόψη με την αύξηση της τιμής των παραμέτρων αντοχής του πετρώματος. Θεωρητική ανάλυση της συμπεριφοράς τους γύρω από κυκλικό άνοιγμα δίνουν οι Oreste (2008) και Bobet & Einstein (2011), ενώ οι Pellet & Egger (1996) εξετάζουν την αντίσταση των ήλων στη διάτμηση των ασυνεχειών. Η επιμήκυνση (Παπασπύρου, 1985) που παρουσιάζουν οι ήλοι αυτοί είναι πολύ μικρότερη από εκείνη των ενεργητικών ήλων. Η διάμετρός τους είναι από 20 έως 32 mm και εισέρχονται σε διατρήματα 38 έως 64mm.



Σχήμα 2-1. Παθητικός ήλος συνεχούς σπειρώματος (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).

2.1.1 Διάκριση με βάση την εσωτερική σύζευξη

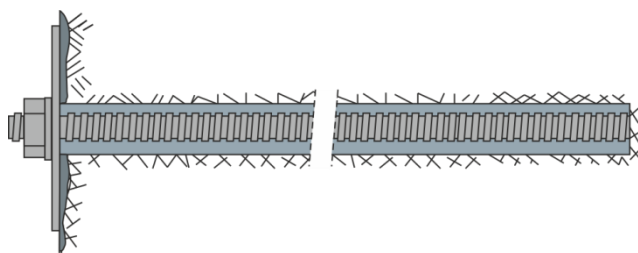
Η εσωτερική σύζευξη των ήλων με το πέτρωμα επιτυγχάνεται είτε διά συγκόλλησης με τσιμεντένεμα ή τσιμεντοκονίαμα είτε διά τριβής.

2.1.1.1 Σύζευξη με τσιμεντοκονίαμα

Πρόκειται για ήλους ολόσωμης σύζευξης δια συγκόλλησης (CMC) με τσιμεντοκονίαμα ή τσιμεντένεμα. Το στέλεχος είναι ράβδος, συνήθως κυκλική διαμέτρου $20 \div 28 \text{ mm}$ ή άλλης διατομής, γενικά από χάλυβα αλλά και από σύνθετα υλικά όπως υαλονήματα ή ανθρακονήματα ή νήματα αραμιδίου, με κοινές ή σπειροειδείς νευρώσεις, που πακτώνεται μέσω τσιμεντενέματος σε όλο το μήκος μέσα σε διάτρημα ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου. Τυπικά, για τις σήραγγες ανοιγμάτων μέχρι περίπου 12m, γίνεται χρήση πρότυπου χάλυβα οπλισμού B500C. Για μεγαλύτερα ανοίγματα μερικοί ή όλοι οι ήλοι δύνανται να είναι υψηλότερης ποιότητας $< 1000 \text{ MPa}$. Ήλοι από σύνθετα υλικά δύνανται να προσφέρουν υψηλή αντοχή ($> 2000 \text{ MPa}$) και δυστροπία (έως και 200 GPa), μικρό ειδικό βάρος ($1.5 \div 2.5$), ηλεκτρομαγνητική ουδετερότητα, εξαιρετική ανθεκτικότητα στη διάβρωση σε όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα σε διάφορες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Το τσιμεντοκονίαμα, όπως και το τσιμεντένεμα, συνίσταται από τσιμέντο, λεπτή άμμο και νερό, ενώ για ταχύτερη ανάπτυξη της αντοχής δύνανται να περιέχει πρόσμικτα. Η εσωτερική σύζευξη επιτυγχάνεται με χημική πρόσφυση, τριβή και σύμπλεξη. Η εξωτερική σύζευξη στο ελεύθερο άκρο της ράβδου επιτυγχάνεται με ελαφρά τάνυση/σύσφιγξη περικοχλίου για ενεργοποίηση της στερέωσης και πραγματοποιείται με αερόκλειδο στο προεξέχον μήκος του ήλου με τη μεσολάβηση ροδέλας και πλάκας διανομής, έτσι ώστε η πλάκα να είναι σε καλή επαφή με το πέτρωμα. Η πλάκα είναι αντίστοιχη με αυτήν της παραγράφου 1.3.1, και δύνανται να παραγγελθεί συνήθως σε τοπικά μηχανουργία ή αν χρειαστεί να κατασκευαστεί στο εργοτάξιο. Πέραν ενός μικρού μήκους πλησίον της πλάκας, ο ήλος παραμένει αρχικά αφόρτιστος. Η ήλωση αυτή προσφέρει ένα ισχυρό και ανθεκτικό σύστημα ενίσχυσης, όμως έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί αρκετές μέρες ωρίμανσης μέχρι να μπορέσει ο ήλος να αναλάβει πλήρες φορτίο. Η ποιότητα του τσιμεντενέματος και η ενεμάτωση δύσκολα ελέγχονται, και η χρησιμοποίηση σε διατρήματα με νερό γενικά δεν είναι δυνατή. Διακρίνονται σε τέσσερεις συμβατικούς τύπους, ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης του τσιμεντενέματος και της διάνοιξης του διατρήματος.

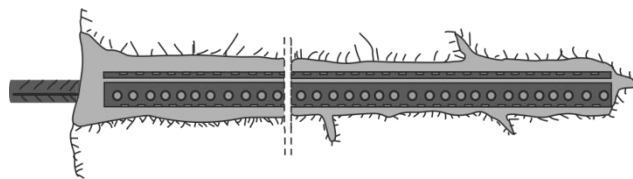
2.1.1.1.1 Συνήθης ήλος (SN=Standard bolt)

Περιγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-04. Η τοποθέτηση (Σχήμα 2-2 α) του τσιμεντενέματος πραγματοποιείται με τη βοήθεια σωλήνα που εισάγεται στο βάθος διατρήματος, όπου αντλείται πηχτή τσιμεντοκονία, με λόγο $N/T \ 0.30 \div 0.35$, και στη συνέχεια, αργά αφαιρείται ο σωλήνας καθώς αντλείται στο διάτρημα το κονίαμα. Ο ήλος ωθείται εντός του διατρήματος στο μισό περίπου βάθος, και στη συνέχεια του δίνεται μια μικρή κάμψη πριν από την ώθησή του πλήρως εντός αυτού. Η κάμψη χρησιμεύει για τη συγκράτησή του εντός του διατρήματος, έως ότου πήξει το κονίαμα. Το μήκος των ήλων, που εισέρχονται σε διατρήματα πληρωμένα με πυκνό κονίαμα, δεν μπορεί γενικά να ξεπερνά τα 5m, ενώ για μήκη μεγαλύτερα από 5m, το ένεμα πάκτωσης εισέρχεται στο διάτρημα μετά την τοποθέτηση του ήλου (AFTES, 2014). Όταν πήξει το κονίαμα, περνιέται μετωπική πλάκα στο εξωτερικό άκρο του ήλου, η οποία συσφίγγεται με περικόχλιο στο πέτρωμα. Η τοποθέτηση αυτής της μετωπικής πλάκας στοχεύει στην παρεμπόδιση της απόξευξης του ήλου από το πέτρωμα, κοντά στο εξωτερικό άκρο του, όπου οι παραμορφώσεις της βραχομάζας είναι μεγάλες.



(α) Ήλος SN τοποθετημένος στο διάτρημα

Σχήμα 2-2. Ήλοι ολόσωμης πάκτωσης με τσιμεντένεμα.



(β) Ήλος SN Perfo τοποθετημένος στο διάτρημα

2.1.1.1.2 Ήλος εντός διάτρητου σωλήνα (SN Perfo=SN within PERFORated cylinder)

Προδιαγράφεται (Σχήμα 2-2 β) από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-03. Το τσιμεντοκονίαμα γεμίζει κύλινδρο (συναρμολογημένο από δύο ημικυλίνδρους) από διάτρητη λαμαρίνα, ο οποίος στη συνέχεια εισάγεται σε

διάτρημα ελαφρώς μεγαλύτερης διαμέτρου. Κατόπιν εισάγεται μέσα στον κύλινδρο (με πίεση ή με κρούση) ράβδος οπλισμού που είναι μικρότερης διαμέτρου εκείνης του κυλίνδρου. Κατά την εισαγωγή της ράβδου το τσιμεντένεμα εκτοπίζεται και διαχέεται στο διάκενο μεταξύ διάτρητου σωλήνα και διατρήματος, διεισδύοντας επίσης και σε κενά του περιβάλλοντος πετρώματος σε όποιον βαθμό αυτό είναι εφικτό. Οι ήλοι αυτού του τύπου είναι κατάλληλοι για πετρώματα με ανοικτή δομή (πορώδη ή κερματισμένοι βράχοι με κενά). Κατά τα λοιπά η λειτουργία των ήλων αυτού του τύπου είναι ίδια με εκείνη των απλών ήλων συνεχούς πάκτωσης. Αυτοί οι παλαιότερου τύπου ήλοι ή οι ήλοι στους οποίους το κονίαμα εγχέεται μετά την είσοδό τους στο διάτρημα, τείνουν να μην χρησιμοποιούνται πλέον, καθόσον η εγκατάστασή τους είναι πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα, χωρίς το τελικό προϊόν να έχει καλύτερη συμπεριφορά.

2.1.1.1.3 Απλός διατρητικός ήλος (SDBr=Self-Drilling simple Bolt)

Προδιαγράφεται (Σχήμα 2-3 α) από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-06). Το στέλεχος του είναι ράβδος, συνήθως χαλύβδινη (ή από σκληρό πλαστικό) φορτίου διαρροής $180 \div 1570 \text{ kN}$, κυκλικής διατομής, ([σύνδεσμος](#)) συνήθως με ραβδώσεις ή ελικώσεις ([σύνδεσμος](#)) στην εξωτερική επιφάνεια και κεντρική αξονική οπή σε όλο το μήκος της, που φέρει στο άκρο αναλώσιμη κοπτική κεφαλή. Με αυτήν τη ράβδο, ως διατρητικό στέλεχος, διανοίγεται το διάτρημα, στο οποίο πακτώνεται με τσιμεντένεμα που εισπιέζεται από την κεντρική οπή και εκρέει από το εσωτερικό άκρο της γεμίζοντας το διάκενο περίξ του ήλου, ενώ βελτιώνει και τη βραχομάζα περίξ του διατρήματος. Οι ήλοι αυτοί είναι κατάλληλοι για πετρώματα τα οποία είναι μικρής ευστάθειας και τα διατρήματά τους δεν δύνανται να παραμένουν ανοικτά μετά την αφαίρεση του διατρητικού στελέχους. Ήλοι αυτού του τύπου είναι επίσης οι Minova SDA® ([σύνδεσμος](#)) και "Alwag" type AT Power® ([σύνδεσμος](#)).



(α) Διατρητικός ήλος SDBr (Elebar SD-R32).

Σχήμα 2-3. Διατρητικοί ήλοι.



(β) Διατρητικός ήλος, με ένα ή δύο διαστελλόμενα άκρα. © DYWIDAG-Systems International (DSI).

2.1.1.1.4 Διατρητικός ήλος με διαστελλόμενη κεφαλή

Πρόκειται για συνδυασμό (βλ. §2.1.1.2.2) του διατρητικού ήλου με τον ήλο διαστελλόμενου κελύφους (Σχήμα 2-3 β). Η ανόρυξη του διατρήματος και η τοποθέτηση του ήλου επιτυγχάνονται σε ένα βήμα. Αμέσως μετά ενεργοποιούνται το ή τα στοιχεία διαστολής και ο ήλος αποκτά φέρουσα ικανότητα. Ο ήλος μπορεί προαιρετικά να τανυθεί μετά τη στερέωση της πλάκας και του περικοχλίου. Μεταγενέστερη ενεμάτωση αποσυνδεδεμένη από τη διαδικασία εγκατάστασης, επιτρέπει την περαιτέρω βελτιστοποίηση του κύκλου εργασιών ([σύνδεσμος](#)).

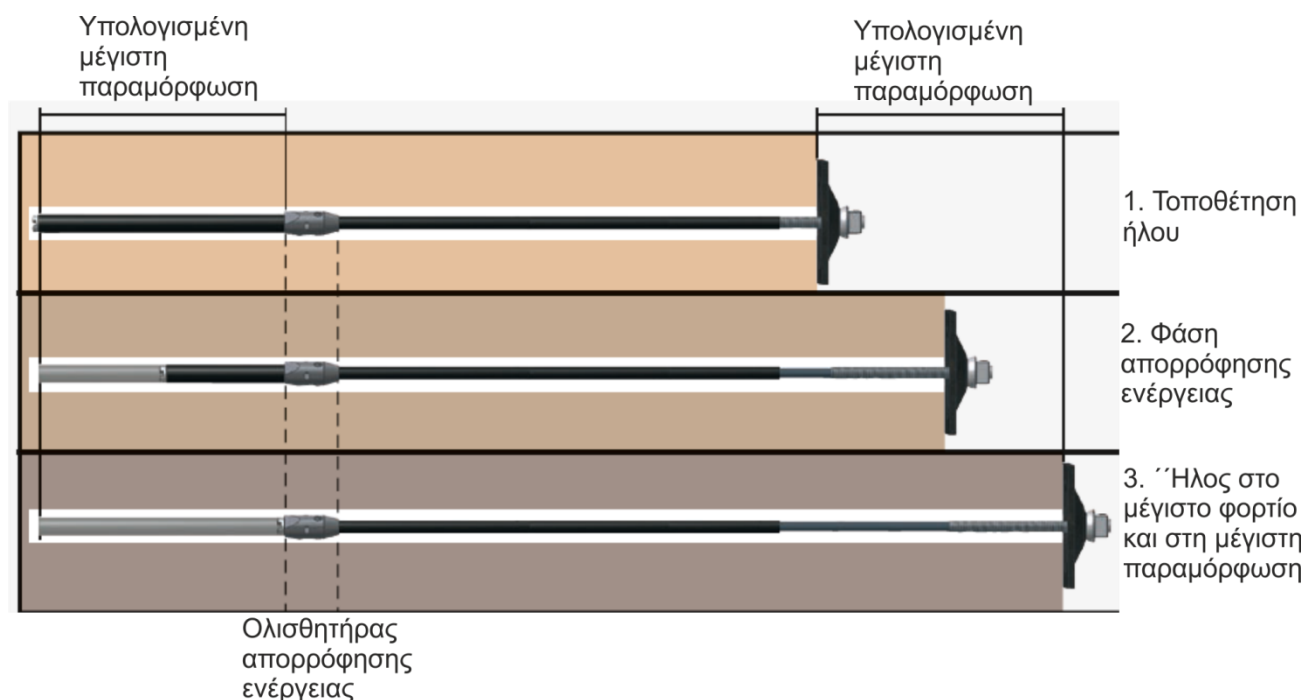
2.1.1.1.5 Ήλος τμηματικής πάκτωσης (PB=Partially fixed Bolt)

Είναι ήλος σημειακής πάκτωσης με τσιμεντένεμα, ο οποίος επιτρέπει ελεύθερη παραμόρφωση του ήλου σε ενδιάμεσο τμήμα του, ώστε να δύναται να μηκύνεται περισσότερο. Είναι ίδιος με τους συνήθεις παθητικούς ήλους, και το τσιμεντένεμα γεμίζει, εξαρχής, το σύνολο του μήκους του διατρήματος. Όμως, η ράβδος είναι πλήρως πακτωμένη σε ένα μόνο τμήμα, προς το τυφλό άκρο του μήκους της διάτρησης, ενώ κατά το υπόλοιπο μήκος της είναι τοποθετημένη μέσα σε πλαστικό χιτώνιο ώστε να μπορεί να παραμορφώνεται ελεύθερα. Σκοπός του ήλου είναι να μεταφέρει εφελκυστικές δυνάμεις σε απομακρυσμένη μάζα του περιβάλλοντος πετρώματος. Λόγω της προστασίας του από το χιτώνιο και το τσιμεντένεμα, υπερτερεί άλλων ήλων ως προς την μακροπρόθεσμη προστασία του από τη διάβρωση. Στο Σχήμα 2-4 φαίνεται ο τροποποιημένος ήλος Kiruna που είναι αυτού του τύπου. Ήλοι αυτού του τύπου είναι επίσης ο Cone BoltR (McKenzie, 2002) και ο DYNAR Tork Bolt, που είναι κατάλληλοι για την απορρόφηση ενέργειας κατά τις εκρήξεις πετρωμάτων (rockbursts).



Σχήμα 2-4. Τροποποιημένος ήλος Kiruna (© <http://www.malmfalten.se/>)

Ο ήλος Roofex (δείτε [βίντεο](#)) της Atlas Copco (Σχήμα 2-5) είναι μία ράβδος από υψηλής ποιότητας χάλυβα μέσα σε ένα λείο πλαστικό περίβλημα, η οποία στερεώνεται στο εσωτερικό γεώτρησης με τσιμέντο ή ένεμα ρητίνης. Ο ήλος διαθέτει έναν απορροφητή ενέργειας ο οποίος λειτουργεί ως ένα ολισθαίνον στοιχείο πάνω στη χάλυβδινη ράβδο. Αυτό επιτρέπει στον ήλο να εκτείνεται προς τα έξω κατά τη διάρκεια απότομης μετατόπισης, όπως έκρηξη πετρώματος ή σεισμικό γεγονός, εξακολουθώντας να παρέχει σταθερό φορτίο. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τον ήλο κατάλληλο για την ανάπτυξη νέων, βαθιών υπόγειων εκσκαφών σε κακής ποιότητας βραχομάζα ή σε περιοχές όπου είναι συχνές εκρήξεις πετρώματος ή σεισμικά γεγονότα.

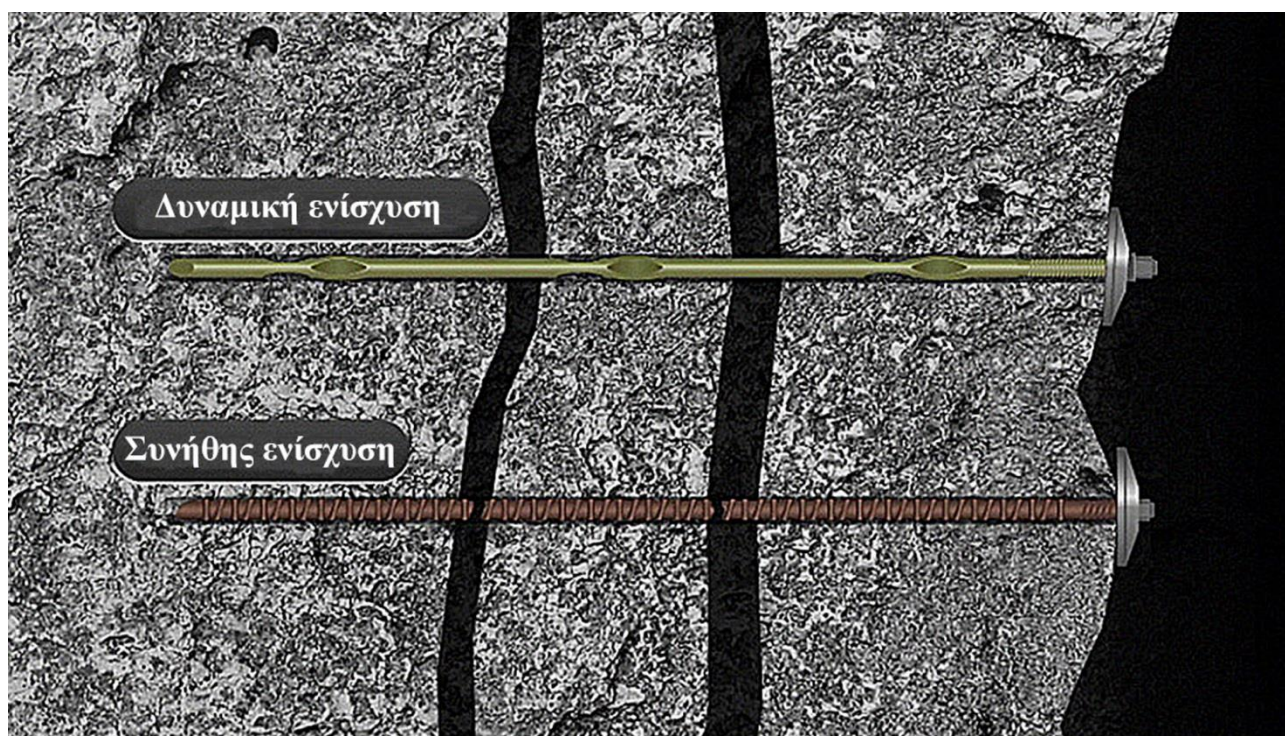


Σχήμα 2-5. Ήλος Roofex (© Atlas Copco, 2007).

Στο Σχήμα 2-6 φαίνεται ο D(ynamic)-Bolt (δείτε [βίντεο](#)). Το στέλεχος του είναι λεία ράβδος χάλυβα με έναν αριθμό θέσεων ειδικής διαμόρφωσης κατά το μήκος του. Τυπικά υπάρχουν 3 ή 4 θέσεις διαμόρφωσης, σε οβάλ ζεύγη. Παρασκευάζεται από ειδικό χάλυβα υψηλής αντοχής και ολκιμότητας, σε διαμέτρους 20.5 και 22.2mm και μήκη από 1.8 έως 3.2m. Το στέλεχος, πακτώνεται με το ένεμα στις θέσεις διαμόρφωσης. Τα λεία τμήματα μεταξύ των θέσεων αυτών δύνανται να παραμορφώνονται ελεύθερα όταν η ράβδος ανθίσταται στη διαστολή του πετρώματος. Επομένως, κατά τη ρωγμάτωση του πετρώματος, η μήκυνση του ήλου (Li, 2010; Li & Doucet, 2012) μοιράζεται στο μεγαλύτερο μήκος μεταξύ των πακτώσεων, αντί στο μήκος εκατέρωθεν της ρωγμής, με αποτέλεσμα να μη θραύεται, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο Σχήμα 2-7. Η χρήση του είναι κατάλληλη (α) για κατακερματισμένα ή συνθλιβόμενα πετρώματα όπου αναμένονται μεγάλες μετατοπίσεις, έως και πάνω από 300mm προσφέροντας αντίσταση έως και 150kN, και (β) για συνθήκες δυναμικές, όπως εκρήξεις πετρώματος (rockbursts) σε συνθήκες υψηλού εντατικού πεδίου και καταπτώσεις σκληρών πετρωμάτων, προσφέροντας αντίσταση έως και 200kN (Charette, 2012).



Σχήμα 2-6. D(ynamic)-Bolt (© NORMET).



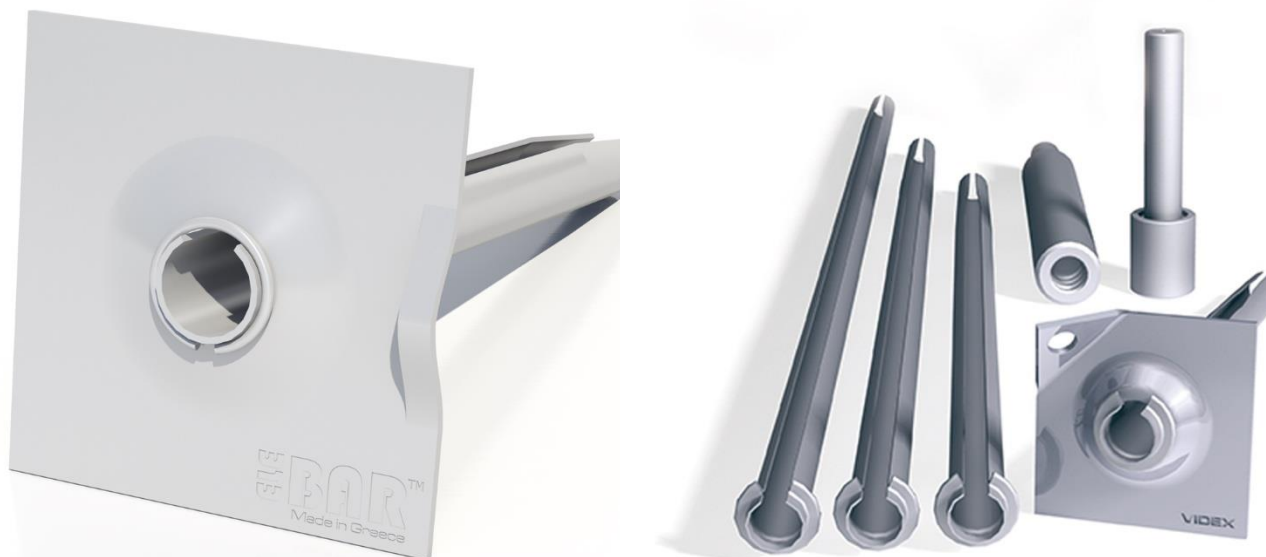
Σχήμα 2-7. Ανάλυση παραμορφώσεων από ήλους κοινούς και DB (© NORMET).

2.1.1.2 Σύζευξη με τριβή

Οι χρονοβόρες διαδικασίες εγκατάστασης ή και λειτουργίας των διαφόρων τύπων ήλων, ώθησαν στην επινόηση των ήλων τριβής. Οι ήλοι αυτοί (CFC) πακτώνονται άμεσα ολόσωμα στο πέτρωμα. Η εξωτερική σύζευξή τους με το πέτρωμα επιτυγχάνεται με πλάκες στο ελεύθερο άκρο τους που έρχονται μαζί με το στέλεχος, δίχως όμως να διαθέτουν περικόχλιο προκειμένου να τανυθούν. Η ταχύτητα της εγκατάστασης και λειτουργίας τους είναι το κύριο πλεονέκτημά τους σε σύγκριση με τους συμβατικούς ήλους τους πακτωμένους με τιμεντοκονίαμα. Ως πολυπλοκότερα βιομηχανικά προϊόντα είναι γενικά ακριβότεροι από τους συμβατικούς, όμως το συνολικό κόστος των ήλων τριβής δύναται να είναι μικρότερο από εκείνο των εναλλακτικών συστημάτων, όταν λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος και το κόστος εγκατάστασης. Δύνανται ολισθαίνοντας να αναλαμβάνουν μεγάλες παραμορφώσεις, και γι' αυτό προτιμώνται εκεί όπου αναμένονται μεγάλες μετατοπίσεις. Διακρίνονται σε συστελλόμενους και σε διαστελλόμενους.

2.1.1.2.1 Συστελλόμενος ήλος (SPL=SPLit pipe rock bolt)

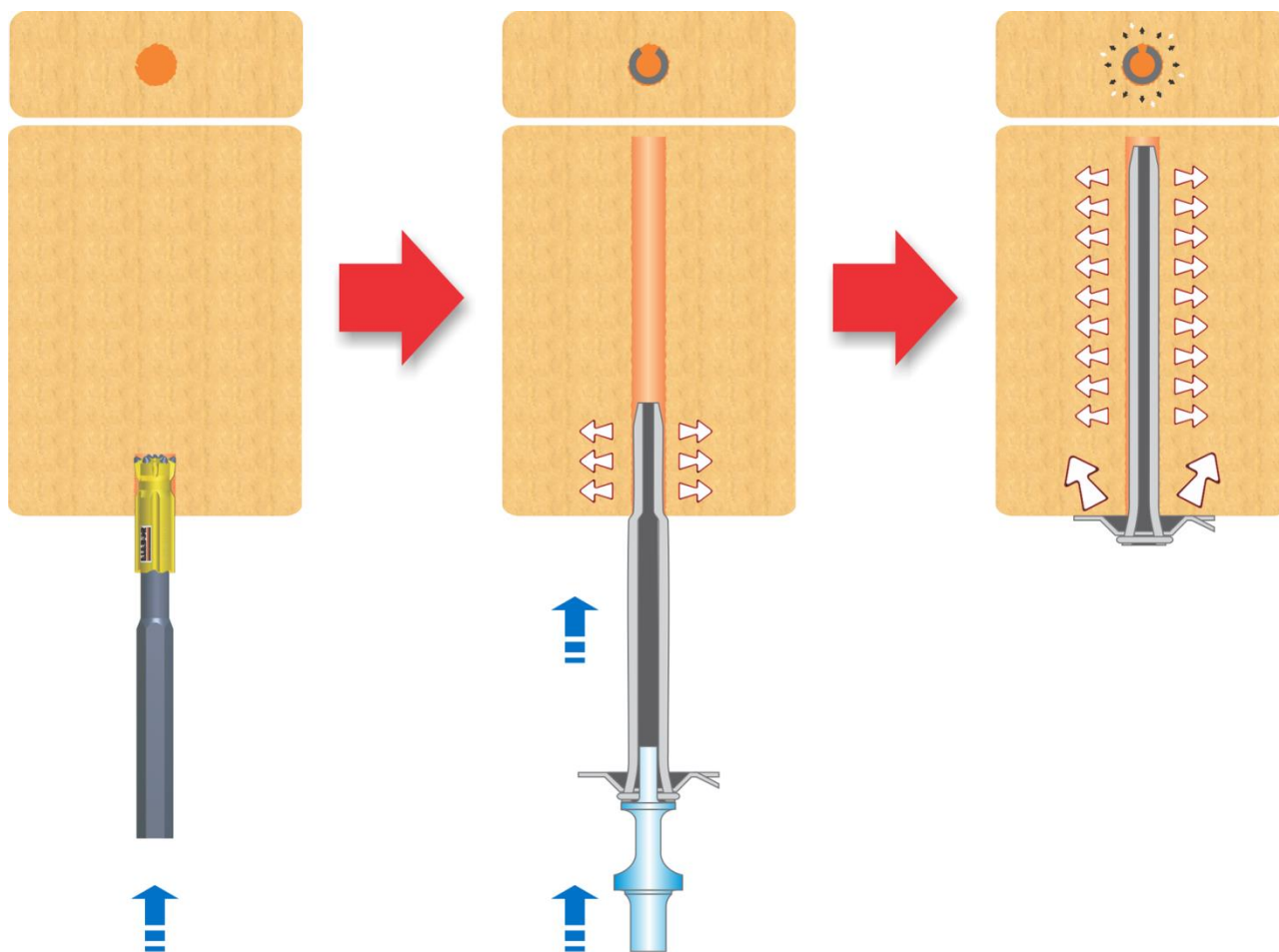
Είναι ήλος (Σχήμα 2-8) ολόσωμης σύζευξης διά τριβής ([δείτε εδώ βίντεο](#)) ([σύνδεσμος](#)) που προδιαγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-07.



Σχήμα 2-8. Ήλος τριβής SPL (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).

Το στέλεχος είναι ράβδος σχιστού κατά γενέτειρα σωλήνα από χάλυβα υψηλής αντοχής και σκληρότητας, που εισάγεται με πίεση ή και κρούσεις σε διάτρημα ελαφρώς μικρότερης διαμέτρου (Σχήμα 2-9). Προς τούτο δύναται να χρησιμοποιείται για την ώθηση αερόσφουρα με πόδι ανύψωσης. Η ακτινική ελαστική πίεση που δημιουργείται από τη συστολή του διαιρεμένου σωλήνα, παρέχει αντίσταση τριβής καθ' όλο το μήκος του. Το ελεύθερο άκρο του, μέσω πλάκας διανομής, στερεώνεται στα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Η ικανότητά του εξαρτάται από την αντοχή του πετρώματος ώστε να συσφίγγεται ο σχισμένος σωλήνας. Προσφέρεται για ανθεκτικά ρωγματωμένα πετρώματα και λειτουργεί αμέσως μετά την έμπηξη, αλλά μειονεκτεί λόγω της χαλάρωσης που μπορεί να επέλθει αργότερα. Στα πλεονεκτήματά του συμπεριλαμβάνονται η εύκολη τοποθέτηση, η άμεση ανάληψη φορτίου και η εγκατάστασή του με χρήση συνήθους εξοπλισμού, όπως αερόσφουρα με πόδι ώθησης ή διατρητικό φορείο. Μειονεκτήματά του είναι το σχετικά μεγάλο κόστος, η απαίτηση για ακρίβεια στη διάμετρο του διατρήματος, το περιορισμένο μήκος, και η λειτουργία του γενικά ως προσωρινού μέτρου.

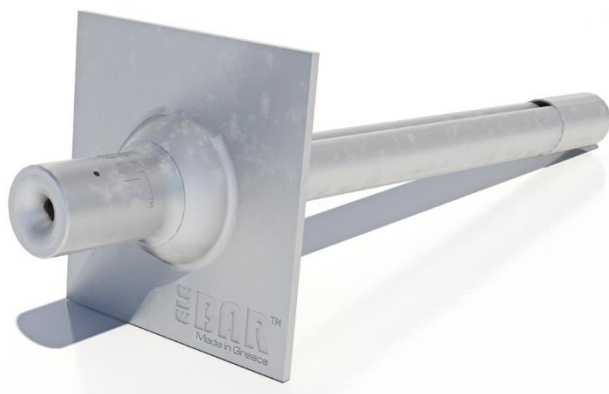
Παρασκευάζονται σε μήκη από 0.9 έως 3.6 m, σε διαμέτρους προ της εισαγωγής 33, 39 και 46 mm, με μέσες αντοχές σε θραύση $105 \div 150$ kN, και εισέρχονται σε διατρήματα διαμέτρου $1 \div 3$ mm μικρότερης από του ήλου. Ο τυπικός χρόνος εγκατάστασης ήλου μήκους 1.8m, εξαιρουμένου του χρόνου διάτρησης, είναι 40s (Stillborg, 1994). Επειδή η εγκατάστασή του είναι πολύ γρήγορη και απλή, έχει γίνει παγκόσμια αποδεκτός στα ορυχεία. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε περιβάλλοντα ήπιων εκρήξεων πετρωμάτων, γιατί ολισθαίνει αντί να θραύεται, και όταν συνδυάζεται με πλέγμα κατακρατεί τα παραγόμενα θραύσματα. Η διάβρωση παραμένει ένα από τα κύρια προβλήματα αυτών των ήλων, καθόσον η προστασία με ένεμα της εξωτερικής επιφάνειάς τους δεν είναι εύκολα εφικτή. Ο γαλβανισμός του σωλήνα βοηθά στη μείωση της διάβρωσης, αλλά δεν αποτελεί πάντα προστατευτικό μέτρο για τη μακροπρόθεσμη εφαρμογή σε επιθετικά περιβάλλοντα. Ο τύπος SS39 (Ingersoll Rand) διατίθεται και από ανοξείδωτο χάλυβα. Παρασκευάζεται επίσης ήλος αυτού του τύπου που τοποθετείται κατά την ανόρυξη του διατρήματος με χρήση αναλώσιμης κοπτικής κεφαλής ([σύνδεσμος](#)).



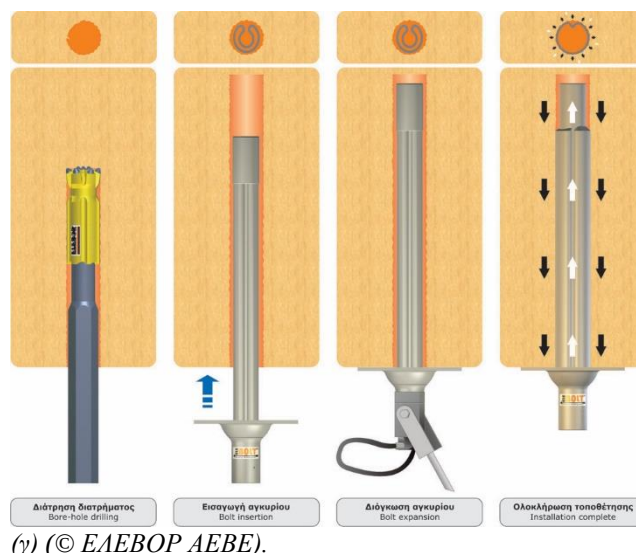
Σχήμα 2-9. Τοποθέτηση ήλου τριβής SPL. Αριστερά: Διάτρηση. Μέσον: Συστολή ήλου μετά την είσοδο του στο διάτρημα. Δεξιά: Ακτινική πίεση στο διάτρημα από το συσταλμένο ήλο. (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).

2.1.1.2.2 Διαστελλόμενος ήλος (SWX=SWelleX rock bolt)

Είναι ήλος (Σχήμα 2-10 α) ολόσωμης σύζευξης δια τριβής που προδιαγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-03-05 ([δείτε βίντεο](#), [δείτε βίντεο](#)). Επινόηθηκε από την Atlas Corpeo που του προσέδωσε την ονομασία SwellexTM. Σήμερα παρασκευάζεται από πληθώρα βιομηχανιών ([σύνδεσμος](#)) ([σύνδεσμος](#)). Αποτελείται από: (1) σωληνωτό στέλεχος όλκιμου χάλυβα υψηλής αντοχής που επιτρέπει σημαντική παραμόρφωση χωρίς απώλεια αντοχής, (2) διαμόρφωση στο εσωτερικό άκρο, και (3) πλάκα και εξωτερική βαλβίδα στο εξωτερικό άκρο. Έχει διάμετρο $41 \div 54\text{mm}$, αλλά διαμορφώνεται διπλωμένος σε μικρότερη διάμετρο $26 \div 36\text{mm}$, ώστε να μπορεί να εισάγεται σε διάτρημα διαμέτρου 35 έως 51mm χωρίς δύναμη ώθησης (Σχήμα 2-10 β & γ). Παρασκευάζεται σε μήκη μέχρι $8 \div 12\text{m}$, δύναται δε να επεκταθεί με σύνδεση επιμέρους στοιχείων ([δείτε βίντεο](#)). Ο ήλος ενεργοποιείται, μετά την είσοδό του στο διάτρημα, με την άντληση εντός αυτού νερού (Σχήμα 2-10 δ) υπό υψηλή πίεση (περίπου 30MPa), η οποία διαστέλλει το διπλωμένο σωλήνα ώστε να έρθει σε στενή επαφή και να ασκήσει πίεση στα τοιχώματα του διατρήματος (Σχήμα 2-11 α). Κατά την ακτινική διαστολή τους συστέλλονται αξονικά με αποτέλεσμα να αναπτύσσουν εφελκυστικό φορτίο που ασκεί μέσω της πλάκας θλίψη στο πέτρωμα της τάξης των 20 kN. Ο τυπικός χρόνος εγκατάστασης ήλου μήκους 2.4m (Stillborg, 1994), εξαιρουμένου του χρόνου διάτρησης, είναι 25s. Δεδομένου ότι η εξωτερική επιφάνεια του ήλου είναι σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα του διατρήματος, υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης. Γι' αυτό παρασκευάζονται και ήλοι με ασφαλική ή πλαστική επίστρωση ανθεκτική στη διάβρωση.



(α) (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).



(γ) (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).



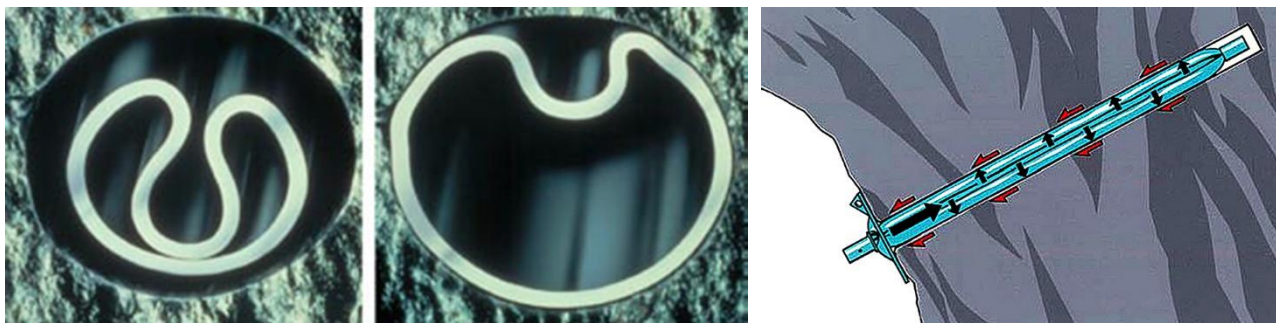
(β) (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ).



(δ) Σήραγγα Ασπρονέρι

Σχήμα 2-10. Διαστελλόμενος ήλος. Αριστερά: (α) Ήλος, (β) Φάσεις τοποθέτησής. Δεξιά: (δ) Τοποθέτηση στο διάτρημα, (δ) Εισπίεση νερού για τη διαστολή του.

Οι ήλοι έχουν όρια διαρροής από 100 έως 200 kN, και η ονομαστική μήκυνση θραύσης τους είναι γενικά 10%, με τη σειρά μαγγανίου να φτάνει το 20%. Η ικανότητα του ήλου καθορίζεται από την εφελκυστική αντοχή του χαλυβδοσωλήνα και την τριβή που αναπτύσσει αυτός με το περιβάλλον πέτρωμα, αλλά και από την ενδεχόμενη μακροπρόθεσμη χαλάρωσή του όταν βρίσκεται σε πηλίτες και ασθενείς σχιστόλιθους ή υποβάλλεται σε δονήσεις. Η λειτουργία του συνίσταται στην ανάληψη εφελκυστικών δυνάμεων στο ελεύθερο άκρο του (Σχήμα 2-11 β) και στην ενίσχυση του πετρώματος με τις τάσεις συμπίεσης και τριβής. Η ικανότητά του ανάληψης διατμητικών τάσεων είναι μειωμένη σε σχέση με τους ολόσωμους ήλους. Είναι κατάλληλος για μέτρια έως ισχυρά πετρώματα, και είναι αποτελεσματικός στην συγκράτηση διαμορφούμενων σφηνών σε σκληρές βραχομάζες λόγω της άμεσης δράσης του. Δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της εγκατάστασης πλεγμάτων πέριξ της διατομής της σήραγγας ([boltecMD](#)). Πλεονεκτήματά του είναι η γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση, η άμεση λειτουργία, και η δυνατότητα λειτουργίας σε πληθώρα γεωλογικών σχηματισμών (Stillborg, 1994). Μειονεκτήματά του είναι το σχετικά μεγάλο κόστος και η γενικά προσωρινή λειτουργία.



(α) Ήλος εντός διατρήματος σε διαστολή και συστολή.
Σχήμα 2-11. Διαστελλόμενος ήλος. © Atlas Copco.

(β) Προσφερόμενη αντίσταση τριβής.

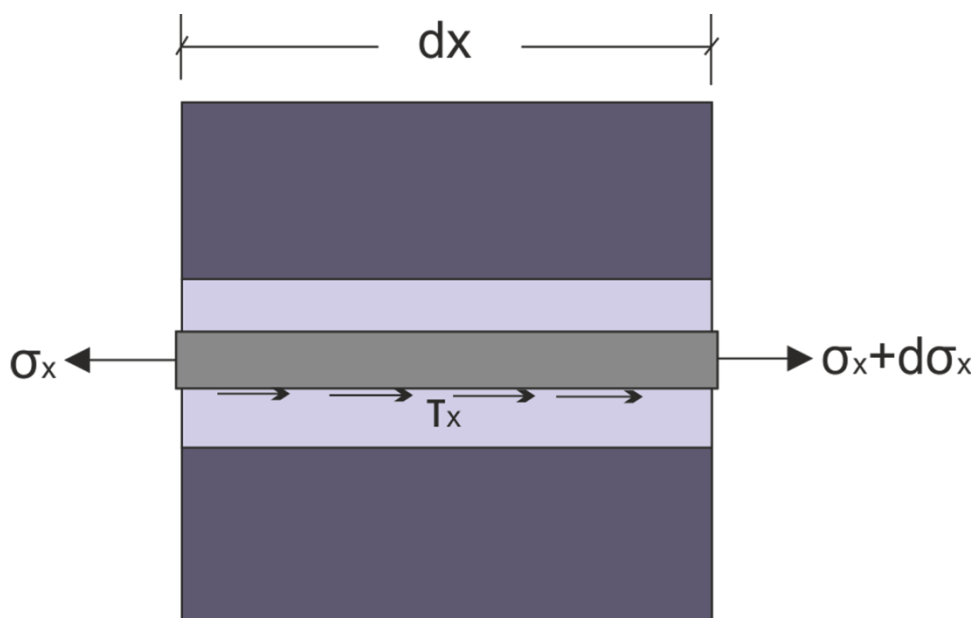
2.1.2 Σύζευξη

2.1.2.1 Διάδραση με το πέτρωμα

Ο ολόσωμης πάκτωσης ήλος βελτιώνει, με τον οπλισμό που προσφέρει, τη δυστροπία και αντοχή της βραχομάζας. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα τη φαινόμενη αύξηση των παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητάς της. Στο απειροστό τμήμα του ήλου, που φαίνεται στο Σχήμα 2-12, δρουν οι αξονικές τάσεις σ_b στον ήλο και οι διατμητικές τάσεις τ_b στην εσωτερική σύζευξη. Από την ισορροπία του ήλου προκύπτει:

$$\tau_b = \frac{A_b}{\pi \cdot d_b} \cdot \frac{d\sigma_b}{dx} \quad (2-1)$$

όπου, d_b η διάμετρος του ήλου, και A_b το εμβαδόν της διατομής του ήλου. Δηλαδή η μεταβολή της τάσης εφελκυσμού ή δύναμης κατά μήκος του ήλου είναι ανάλογη της τάσης συνάφειας στη θέση.



Σχήμα 2-12. Τάσεις σε απειροστό μήκος της ήλωσης.

Κατά μήκος των ήλων ολόσωμης πάκτωσης η ισορροπία απαιτεί την ύπαρξη ουδέτερου σημείου, όπου η διατμητική τάση μηδενίζεται και εκατέρωθεν αυτού αλλάζει πρόσημο. Εφόσον το μήκος τους υπερβαίνει το βάθος της ζώνης διαρροής της βραχομάζας, το μήκος τους εντός της ελαστικής ζώνης δύναται να δρα ως πάκτωση που ανθίσταται στην ισχυρή έλξη που ασκείται από τη ζώνη διαρροής. Στην τελευταία περίπτωση, το ουδέτερο σημείο θα μετατίθεται προς το όριο της ζώνης διαρροής. Η δράση ενός τέτοιου ήλου μπορεί να πλησιάζει τη δράση ενός ήλου σημειακής πάκτωσης.

Κατά τον εφελκυσμό του ήλου επιζητείται η συνάφεια εσωτερικής σύζευξης να επαρκεί για έλξη μέχρι τη διαρροή του χάλυβα. Άρα:

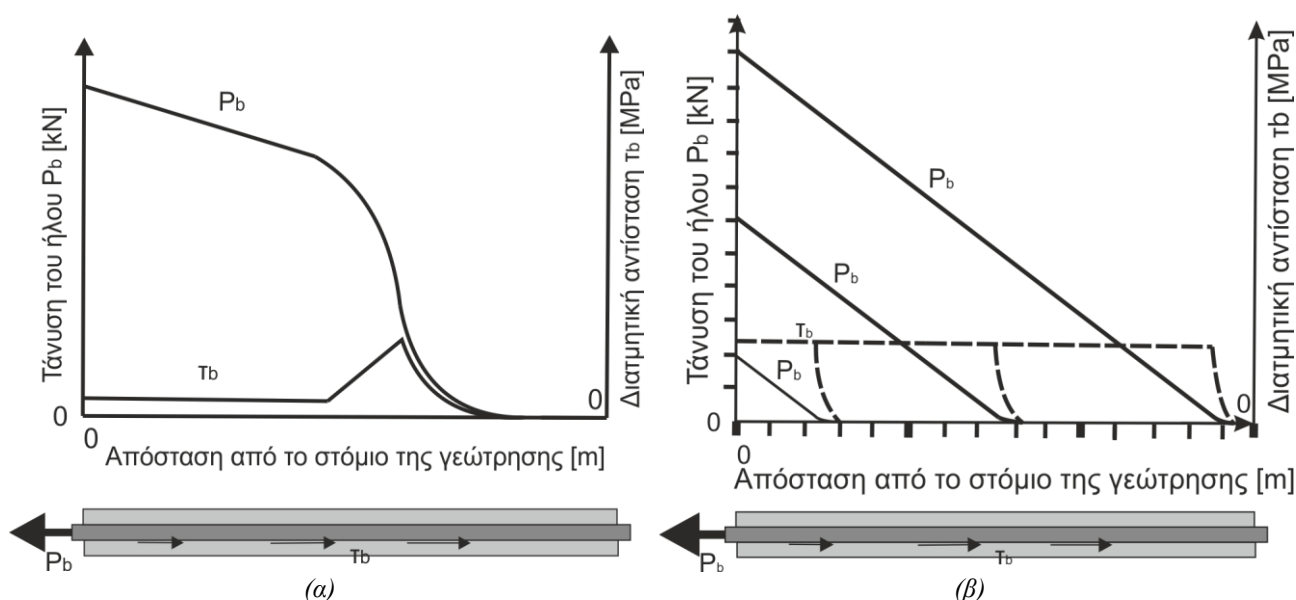
$$P_{max} = \sigma_y \cdot A_b \leq \tau_b \cdot U \cdot l; A_b = \frac{\pi \cdot d_b^2}{4}, U = \pi \cdot d_b \Rightarrow l_b \geq 0.25 \cdot \frac{\sigma_y \cdot d}{\tau_b} \quad (2-2)$$

όπου, σ_y η τάση διαρροής του χάλυβα του ήλου, τ_b η μέση συνάφεια μεταξύ ρητίνης και ήλου, U η περιφέρεια του ήλου, l_b το μήκος πάκτωσης του ήλου. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε όριο διαρροής του χάλυβα 400MPa, διάμετρο 25mm, και μέση συνάφεια μεταξύ ενέματος και χάλυβα 1MPa, το απαιτούμενο μήκος πάκτωσης και η ικανότητα ανάληψης έλξης από τον ήλο υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$l_b \geq 0.25 \times \frac{400000 \times 25}{1000} = 2500mm; P_{max} = 400 \times \frac{\pi \times 25^2}{4} \times 10^{-3} = 196.4kN$$

Η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση μεταξύ ήλου και ενέματος μέχρι την ολίσθηση του ήλου αυξάνεται ταχύτατα με την παραμόρφωση. Στους ήλους τους πακτωμένους με ένεμα, μετά την ολίσθηση η ψαθυρή αστοχία του ενέματος προκαλεί μεγάλη μείωση της τιμής της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια μέχρι και μηδενισμό της. Αντίθετα, για ήλους πακτωμένους με τριβή, η παραμένουσα διατμητική τάση τ_r στη διεπιφάνεια είναι η ίδια περίπου με τη μέγιστη διατμητική αντοχή τ_r , δηλ. $\tau_r = \tau_p$. Επομένως, διακρίνονται δύο περιοχές, μία με μειούμενη διατμητική τάση και μία με σταθερή διατμητική τάση. Από τη δοκιμή εξόλκευσης προκύπτει η διατμητική αντοχή τ_{bf} των ήλων ολόσωμης πάκτωσης με τριβή:

$$\tau_{bf} = \frac{P_{max}}{\pi \cdot d_b \cdot l_b} \quad (2-3)$$



Σχήμα 2-13. Κατανομή της διατμητικής τάσης και της δύναμης, κατά την εξόλκευση, (α) σε ήλο πακτωμένο σε τσιμεντένεμα και (β) σε ήλο Swellex πακτωμένο με τριβή.

Στα διαγράμματα στο Σχήμα 2-13 δίνονται, σύμφωνα με τους Li & Stillborg (1999), η εξιδανικευμένη κατανομή της αξονικής δύναμης και της διατμητικής τάσης κατά μήκος: (α) ήλου πακτωμένου με τσιμεντένεμα, και (β) ήλου πακτωμένου με τριβή. Παρατηρούμε στο αριστερό διάγραμμα ότι μετά τη θραύση του κονιάματος η προσφερόμενη διατμητική τάση στο ολισθαίνον τμήμα ουσιαστικά μηδενίζεται και ελάχιστα προσφέρει στην αντίσταση του ήλου. Αντίθετα, στο δεξιό διάγραμμα η διατμητική τάση παραμένει σταθερή στο ολισθαίνον τμήμα και συνεχίζει να προσφέρει σταθερή διατμητική αντίσταση στον ήλο. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο ήλος τριβής προσφέρει τη μέγιστη αντίστασή του όταν ενεργοποιηθεί σε όλο του το μήκος, και στη συνέχεια

συνεχίζει να παρέχει σταθερή αντίσταση. Αριθμητικές επιλύσεις με εξειδικευμένους κώδικες προσομοιώνουν επιτυχώς τις συμπεριφορές αυτές (Boulamatsi et al., 2011).

2.1.2.2 Έλεγχοι

Οι έλεγχοι που εφαρμόζονται είναι:

- Εξόλκευση κατά την οποία ο ήλος τανύεται μέχρι αστοχίας. Κατά τη δοκιμή καταγράφονται η εφαρμοζόμενη δύναμη και η μετατόπιση. Στοχεύει στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας.
- Υπερδιάτρηση με αδαμαντοκορόνα για την εξέταση της πλήρωσης του διατρήματος με τσιμεντένεμα ή της διάβρωσης του ήλου.
- Ηλεκτρονική μη καταστροφική δοκιμή διάδοσης ελαστικών κυμάτων (Bergman et al., 1983) στον πακτωμένο με ένεμα ήλο για την εξέταση της ποιότητας του ενέματος. Εφόσον το ένεμα περιβάλλει πλήρως τον ήλο και είναι καλής ποιότητας, το πλάτος του ανακλώμενου κύματος αποσβήνεται περισσότερο από ένα που το περιβάλλει λιγότερο και είναι κακής ποιότητας. Επίσης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση και του μήκους του ήλου.
- Έμμεση μη καταστροφική δοκιμή μέτρησης της πίεσης επαναδιαστολής του ήλου με την αντλία, για τους διαστελλόμενους ήλους.

2.1.2.3 Εμπειρικές οδηγίες

Σύμφωνα με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989; Σοφιανός & Μαρίνος, 1990), σε σήραγγες πεταλοειδούς διατομής, πλάτους 10m, σε εντατικό πεδίο <25MPa, που διανοίγονται με διάτρηση – ανατίναξη, για $RMR \leq 80$ προτείνεται η τοποθέτηση ήλων ολόσωμης πάκτωσης διαμέτρου 20mm. Το μήκος των ήλων l_b και η απόσταση μεταξύ τους s_b δίνονται από τις σχέσεις:

$$l_b[m] = 6 - 0.05 \cdot RMR \geq 3, s_b[m] = 0.5 + 0.025 \cdot RMR \geq 1 \quad (2-4)$$

Σύμφωνα με το σύστημα Q (Barton et al., 1974), το μήκος των ήλων, όπου απαιτούνται, εξαρτάται από το πλάτος B ή το ύψος H του ανοίγματος μόνον, και δίνεται από τη σχέση:

$$l_b[m] = 2 + 0.15 \cdot (B[m] \text{ ή } H[m])/ESR \quad (2-5)$$

Όπου ESR ένας διαιρέτης που λαμβάνει υπόψη τη σημαντικότητα του έργου, και για συνήθη έργα έχει την τιμή 1. Η απόσταση μεταξύ των ήλων, όπου απαιτούνται εξαρτάται από την ποιότητα του πετρώματος μόνον.

2.2 Δοκίδες προπορείας

Αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ήτοι: (α) κεκλιμένα απλά βλήτρα, (β) υπο-οριζόντια σωληνωτά διατρητικά βλήτρα (δοκίδες) προπορείας (spiling). Τα στοιχεία αυτά, σε αντίθεση με τα άλλα μέτρα εσωτερικής στήριξης, λόγω της θέσης τοποθέτησής τους αναλαμβάνουν και καμπτικά φορτία.

2.2.1 Ράβδοι προπορείας

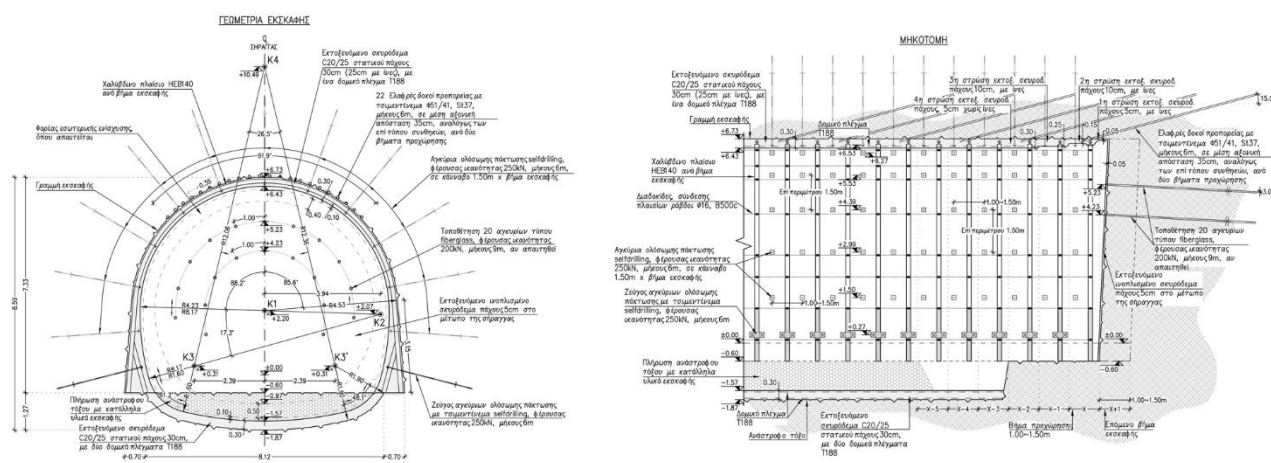
Πρόκειται για μεταλλικές ράβδους B 500 B, λείες ή με νευρώσεις, με αιχμή στο ένα άκρο τους. Εγκαθίστανται κατά τη διάνοιξη σηράγγων, μέσα από τα πλαίσια ή πάνω από αυτά, πέριξ του μετώπου, με χρήση συμβατικού εξοπλισμού, είτε σε προδιατρημένες ευσταθείς γεωτρήσεις, με ή χωρίς ενεμάτωση, σε διακλασμένο πέτρωμα για προστασία από καταπτώσεις είτε με κρούση σε ομοιογενές έδαφος. Διατίθενται σε διαμέτρους 20 έως 36mm και σε μήκη από 3 έως 6 m. Οι εγκατεστημένες ράβδοι (Σχήμα 2-14) μεταφέρουν το φορτίο που δέχονται, στο πέτρωμα μπρος από το μέτωπο και στα πλαίσια πίσω από αυτό.



Σχήμα 2-14. Ράβδοι προπορείας τοποθετημένες στην περιφέρεια σήραγγας. © DYWIDAG-Systems International (DSI).

2.2.2 Δοκίδα προπορείας ελαφρού τύπου (SNp=fully grouted Pipe bolt–spile)

Η δοκίδα εγκαθίσταται σε προηγουμένως ανορυχθέν διάτρημα. Πρόκειται για ήλο ολόσωμης σύζευξης δια συγκόλλησης με τσιμεντένεμα, που προδιαγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-06-00. Το στέλεχος είναι σωλήνας από χάλυβα S235JR, άνευ ραφής ή με ραφή, με βαλβίδες για εισπίεση ενέματος, διαμέτρου μικρότερης των 76mm και όχι μικρότερης των 22mm, και δύναται να φέρει κατά μήκος σπές έγχυσης ενέματος. Διακρίνονται σε (α) κοίλες ράβδους Ø35, Ø50 και Ø60 mm, (β) σωλήνες με ραφή Ø56/50, Ø66/60, Ø76/70mm, (γ) σωλήνες άνευ ραφής Ø56/50, Ø66/60, Ø76/70mm. Τοποθετούνται υπό γωνία ~3° ως προς τον άξονα της σήραγγας. Μέσα από τον σωλήνα εισπίζεται ένεμα που αφενός προστατεύει έναντι οξειδωσης αφετέρου εμποτίζει το πέτρωμα γύρω από το διάτρημα ([σύνδεσμος](#)). Στο Σχήμα 2-15 φαίνονται οι θέσεις τοποθέτησής τους.



Σχήμα 2-15. Τυπική διατομή και μηκοτομή εκσκαφής και υποστήριξης με εφαρμογή δοκών προπορείας ελαφρού τύπου με τσιμεντένεμα (Ø51mm). (Χορηγήθηκε από την OK Μελετητική).

Η λειτουργία των ήλων αυτού του τύπου ασκείται όχι μόνο με την τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος της ράβδου αλλά και με τη δυσκαμψία της ράβδου και της τσιμεντοκονίας που τη συμπληρώνει μέσα και γύρω από αυτήν. Στοχεύουν στην ενίσχυση ασταθούς πετρώματος εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής με τη γεφύρωση του εκάστοτε εκσκαπτόμενου μήκους της σήραγγας μέχρι να ολοκληρωθεί η άμεση προσωρινή υποστήριξη. Στο Σχήμα 2-16 φαίνονται οι τοποθετημένοι ήλοι.



(α) Τοποθετημένες σωληνωτές δοκίδες προπορείας πέριξ της διατομής. © DYWIDAG-Systems International (DSI).



(β) Ελικοειδές κεκλιμένο υπόγειου μεταλλείου Σκουριών, Μεταλλεία χρυσού Χαλκιδικής. (OK Μελετητική ΑΕ).

Σχήμα 2-16. Δοκίδες (σωληνωτές) προπορείας ελαφρού τύπου.

2.2.3 Δοκίδα προπορείας από διατρητικό ήλο (SDBp=Self-Drilling Pipe Bolt - Spile)

Πρόκειται για διατρητικό ήλο ([σύνδεσμος](#)) σωληνωτού τύπου (Σχήμα 2-17β) ολόσωμης σύζευξης διά συγκόλλησης με τσιμεντένεμα, που προδιαγράφεται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-06. Οι ήλοι αυτοί (Σχήμα 2-17α) εγκαθίστανται όπως οι απλοί διατρητικοί ήλοι, τα στελέχη διάτρησης όμως, που παραμένουν στο διάτρημα ως οπλισμός, είναι σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου και επομένως έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία. Κατά τα λοιπά λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως και οι δοκίδες ελαφρού τύπου. Διατίθενται κοίλες ράβδοι Ø30/16, Ø30/14, Ø30/11, Ø40/20, Ø40/16, Ø52/26, Ø73/53. Προσφέρονται για προενίσχυση του πετρώματος εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής με τη γεφύρωση του εκάστοτε εκσκαπτόμενου μήκους της σήραγγας μέχρι να ολοκληρωθεί η άμεση προσωρινή υποστήριξη.



(α) Εγκατάσταση IBO. © DYWIDAG-Systems International (DSI).

Σχήμα 2-17. Διατρητικές δοκίδες προπορείας.



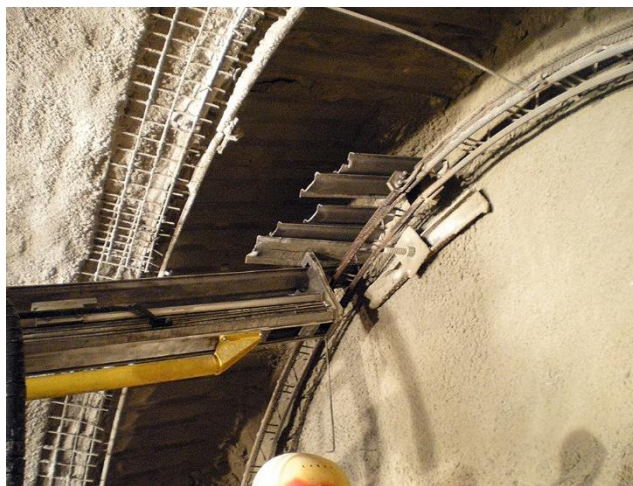
(β) Δοκίδα (© ΕΛΕΒΟΡ ΑΕΒΕ)

2.2.4 Σανίδες προπορείας

Πρόκειται για πασσαλοσανίδες που τοποθετούνται, ώστε να προσφέρουν συνεχή υποστήριξη στην περιφέρεια του ανοίγματος. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για ασταθή μη συνεκτικά εδάφη. Οι σανίδες εμπήγνυνται με κρούση στο έδαφος από συμβατικά υδραυλικά διατρητικά φορεία. Εγκαθίστανται είτε με μεταξύ τους επικάλυψη είτε αφήνοντας μικρό διάκενο όταν το έδαφος το επιτρέπει. Διατίθενται σε πάχη 3-6mm, μήκη 1.25-3.00 m, και πλάτη 220mm.



Σχήμα 2-18. Σανίδες προπορείας. © DYWIDAG-Systems International (DSI).



2.3 Κατασκευαστικά θέματα

2.3.1 Συνήθεις αιτίες αστοχιών

Οι Douglass & Arthur (1983) δίνουν τις παρακάτω αιτίες αστοχίας των ηλώσεων:

- εσφαλμένη διάταξη,
- διάτρημα πολύ μακρύ ή κοντό,
- εσφαλμένη διάμετρος διατρήματος,
- διάτρημα μη ξεπλυμένο ή εμψυσημένο σωστά,
- φθαρμένα κοπτικά,
- ανεπαρκής τοποθέτηση ενέματος,
- ανεπαρκές μήκος συγκόλλησης,
- λερωμένος χάλυβας,
- ληγμένα υλικά, ειδικά οι ρητίνες,
- τραυματισμός των σωλήνων ενεμάτωσης κατά την τοποθέτηση,
- ανεπαρκής λίπανση των περικοχλίων, ροδελών και σπειρωμάτων,
- εσφαλμένη διαδικασία τοποθέτησης.

Ο συνεχής έλεγχος βάσει αυτής της λίστας αιτίων αποτρέπει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις αστοχίες των ηλώσεων.

2.3.2 Γενικές οδηγίες

Ο Lang (1961) με βάση την εμπειρία από την κατασκευή υπόγειων υδροηλεκτρικών συστημάτων στην Αυστραλία, πλάτους ανοίγματος B , δίνει το ελάχιστο μήκος L των συστηματικών ηλώσεων περίξ της διατομής, σαν το μέγιστο από το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ των ήλων, το τριπλάσιο του πλάτους του κρίσιμου και ασταθούς βραχώδους τεμαχίου που καθορίζεται από την μέση απόσταση t_e ή w_e μεταξύ των ασυνεχειών, και $0.5B$ για $B < 6m$, ή $0.25B$ για $18m < B < 30m$ και γραμμική παρεμβολή ενδιάμεσα.

Για ύψη τοιχωμάτων μεγαλύτερα των $18m$, τα μήκη των πλευρικών ήλων δεν θα πρέπει να είναι μικρότερα από το ένα πέμπτο του ύψους του τοιχώματος. Η μέγιστη απόσταση s μεταξύ των ήλων δίνεται από τη σχέση:

$$s = \min(0.5 \cdot L; 1.5 \cdot w_e)$$

(2-6)

Εφόσον η απόσταση μεταξύ των ήλων είναι μεγαλύτερη από $2 m$, δεν είναι δυνατή η στήριξη δομικού πλέγματος ή συρματοπλέγματος. Ο Πίνακας 2-1 δίνει κατασκευαστικές οδηγίες, του USCE, για τα ελάχιστα μέτρα ήλωσης, όσον αφορά την απόσταση s_{max} , και το μήκος L_{min} των ήλων και την προένταση p του πετρώματος, τα οποία βρίσκονται σε συμφωνία με τις παραπάνω προτάσεις του Lang.

Πίνακας 2-1. Κατασκευαστικές οδηγίες σύμφωνα με το USCE (1980).

Μέγεθος	Γενικά	Θόλος	Τοιχώματα
Ελάχιστο μήκος ήλων L_{min}	$>2s; >3t_e$ (s: απόσταση ήλων t_e : πάχος κρίσιμων ασταθών όγκων)	$S < 6m \Rightarrow L_{min} > 0.5S$ $6m < S < 18m \Rightarrow$ $L_{min} > 3m + (S - 6m) \cdot 0.125$ $18m < S < 30m \Rightarrow L_{min} > 0.25S$ S: πλάτος υπόγειου ανοίγματος	$h < 6m \Rightarrow L_{min} > 0.5h;$ $6m < h < 18m \Rightarrow$ $L_{min} = 3m + (h - 6m) \cdot 0.05$ $18m < h \Rightarrow L_{min} > 0.2h$ h: ύψος υπόγειου ανοίγματος
Μέγιστη απόσταση μεταξύ ήλων S_{max}	$s < 0.5L, < 1.5w_e, < 2m,$ $s > 0.9 - 1.2m$ w_e : πλάτος κρίσιμων ασταθών όγκων		
Απαιτούμενη πίεση προέντασης p_i	Διασταυρώσεις $p_{is} = 2p_i$	$p_i > \max \{0.2 \cdot \gamma \cdot S, 40kPa\}$	$p_i > \max \{0.1 \cdot \gamma \cdot h, 40kPa\}$

2.3.3 Εξοπλισμός διάτρησης

Διακρίνεται σε χειρωνακτικό, ημικμηχανισμένο και πλήρως εκμηχανισμένο. Ο χειρωνακτικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται σε μικρές στοές, και σήραγγες, όπου η εξόρυξη πραγματοποιείται με ελαφρύ εξοπλισμό που χειρίζονται οι μεταλλωρύχοι, και η διάτρηση των οπών των ήλων πραγματοποιείται με τον ίδιο εξοπλισμό της εξόρυξης. Σε μεγαλύτερες σήραγγες και υπόγειες εκσκαφές, όπου το βάθος του διατρήματος του χειρωνακτικού εξοπλισμού δεν είναι επαρκές, χρησιμοποιούνται διατρητικά φορεία για τη διάτρηση των οπών των ήλων. Μεγάλα φορεία διαθέτουν καλάθια εργασίας από τα οποία τοποθετούνται οι ήλοι. Σε TBM ή φρέζες, ο διατρητικός εξοπλισμός δύναται να είναι προσαρτημένος στο πλαίσιο της μηχανής. Η εκμηχανισμένη διάτρηση συνδυασμένη με χειρωνακτική τοποθέτηση των ήλων ονομάζεται ημικμηχανισμένη ήλωση (Stillborg, 1994). Σύγχρονος εξοπλισμός, επιτρέπει την πλήρως εκμηχανισμένη διάτρηση του πετρώματος και τοποθέτηση των ήλων. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού εξαρτάται κυρίως από το μήκος των αγκυρίων, το μέγεθος του υπόγειου ανοίγματος, τη σκληρότητα του πετρώματος, και την απαιτούμενη παραγωγή.

Πίνακας 2-2. Καταλληλότητα ήλων

Ήλοι	Σημειο- κής πάκτω- ση	Ολόσω μη	Ολόσω μη	Μικτοί ήλοι	Τριβή & ολόσω μη πά- κτωση	Τύπου Cone bolt ^R	Διατρη τικοί	Διατρη τικοί	Τριβής	Τριβής	Από υαλο- νήματα	Από ανθρα- κονήμα τα
Δεδομένα		Κονία- μα	Ρητίνη				Minova SDA ^R	Alwag AT Power	Διαστο λής	Σύνθλι ψης		
Εφελκυσμός	XXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXX	XX	XXX	XX	XXX	XXX	XX	XX
Διάτμηση	X	XXXX	XXX	XXX	XX	XXXX	XXX	XX	XX	XXX	XX	XX
Κερματισμένο πέτρωμα	XX	XX	X	XX	XXX	XXX	XXXX	XXX	XX	XX	XX	XX
Μέτρια διατρησι- μότητα	-	X	X	-	-	X	XXXX	XXXX	X	-	X	X
Μονιμότητα	X	XXXX	XXX	XXXX	XXX	XXXX	XXX	-	XX	XX	X	XX
Άμεση λειτουργία	XXXX	-	XXX	XXXX	XXXX	XXX	XX	XXXX	XXXX	XXXX	XXX	XXX
Καθυστέρηση	XX	XXX	XXXX	XXX	XXX		XXXX	XX	XXX	XXX	XXX	XXX
Ενόχληση από παρουσία νερού	XXXX	X	XXX R	XX	XX	XX	X	XXXX	XXXX	XXX	XX R	XX R
Στράγγιση	XXXX	XX	X	XX	X	XX	XX	XXX	XX	XXXX	XX	XX
Στεγάνωση	-	XX	XXX R	XX	XX	XX	XX	-	X	X	XX	XX
Χρόνος Εγκατά- στασης	XXXX	XX	XXX	XXX	XX		XXX	XXX	XXXX	XXXX	XXX	XXX

Βαθμοί καταλληλότητας: XXXX: Απόλυτα κατάλληλο, XXX: Κατάλληλο, XX: Μέτρια κατάλληλο, X: Αποδεκτό, -: Μη κατάλληλο, Κενό: Προς έλεγχο. R: Ρητίνη αντιδρώσα στο νερό.

Η βιομηχανία, όπως οι Atlas Copco και Sandvik που είναι δύο από τις σημαντικότερες βιομηχανίες κατασκευής εξοπλισμού διάτρησης και τοποθέτησης ήλων, δίνει τις δυνατότητες των διαφόρων τύπων του εξοπλισμού, για την επιλογή του κατάλληλου.

2.3.4 Καταλληλότητα ήλων

Ο Πίνακας 2-2 δίνει την καταλληλότητα των διαφόρων τύπων ήλων σύμφωνα με την AFTES (2014). Στο συνημμένο βίντεο, boltec_SafeRock, δείτε συνοπτικά την τοποθέτηση των διαφόρων τύπων ήλων που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- AFTES (2014). “Rock Bolting Technology”, *Recommendation GT6R4A1, TUNNELS ET ESPACE SOUTERRAIN* - n°241 - Janvier/Février.
- Bergman SGA, Krauland N, Martna J and Paganus T (1983). “Non-destructive field test of cement-grouted bolts with the Boltometer”, *Proc. 5th Congress ISRM*, Melbourne.
- Boulamatsi SA, Nomikos PP & Sofianos AI (2011). “Numerical evaluation of stress distribution along grouted rockbolts”, *Proc. 12th ISRM Congress on Rock Mechanics: Harmonising Rock Engineering and the Environment*, p. 573, ed. Qihu Qian & Yingxin Zhou.
- Charette F (2012). “Applicability of D-Bolt in high stress conditions”, www.dynamicrocksupport.com.
- Douglas TH and Arthur, LJ (1983) *A guide to the use of rock reinforcement in underground excavations*, R101, CIRIA, London (ISBN: 978-0-86017-212-3). Go to: www.ciria.org
- DSI (-). “Technical Brochures”, DYWIDAG-Systems International.
- Hoek E and Brown ET (1980). “Underground Excavations in Rock”, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek E, Kaiser PK, & Bawden WF (1995). “Support of underground excavations in hard rock”, Balkema, ch. 12.
- Lang TA (1961). “Theory and practice of rockbolting”, *Trans. Soc. Min. Engrs*, AIME 220: 333-348.
- Li C and Stillborg B (1999). “Analytical models for rockbolts”, *Intrn J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36, 1013-1029.
- Li CC (2010). “A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses”, *Intern. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 47, 396-404.
- Li CC and Doucet C (2012) “Performance of D-Bolts Under Dynamic Loading”, *Rock Mech Rock Eng* 45:193–204.
- Malmfalten (2013). <http://www.malmfalten.se/produkter/> Read 2013-10-12
- McKenzie R (2002). “Use of Cone Bolts in Ground Prone to Rockburst”, in Aziz, N (ed), *Coal 2002: Coal Operators' Conference*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2002, 169-175.
- Oreste P (2008). “Distinct analysis of fully grouted bolts around a circular tunnel considering the congruence of displacements between the bar and the rock”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45, 1052–1067.
- Παπασπύρου Σ (1985). *Αγκυρώσεις*.

- Pellet F and Egger P (1996). “Analytical Model for the Mechanical Behaviour of Bolted Rock Joints Subjected to Shearing”, *Rock Mech. Rock Engng*, 29 (2), 73-97.
- Stillborg B (1994). *Professional users handbook for rock bolting*, Trans Tech Publications.
- Thompson AG, Villaescusa E, Windsor CR (2012). “Ground Support Terminology and Classification: An Update”, *Geotech Geol Eng*. DOI 10.1007/s10706-012-9495-4.
- USCE (1980). “Engineering and design: rock reinforcement; Engineer Manual”, *EM 1110-1-2907*. Available from the Office of the Chief of Engineers, Washington DC, 20314.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1

Η μέση συχνότητα ασυνεχειών σε κατακόρυφη διεύθυνση σε ψαμμιτική βραχομάζα είναι $\lambda=1.1\text{m}^{-1}$, και ένα σύνολο $n=600$ κατακόρυφων ήλων μήκους 4m θα τοποθετηθούν, για να σταθεροποιήσουν την οροφή υπόγειας εκσκαφής σε αυτήν τη βραχομάζα. Πόσοι ήλοι εκτιμάτε ότι: (α). δεν θα τέμνουν ασυνέχειες, (β). θα τέμνουν λιγότερες από 5 ασυνέχειες, και (γ). θα τέμνουν περισσότερες από 3 ασυνέχειες. (δ) Ποιο θα πρέπει να είναι το μήκος των ήλων εφόσον απαιτείται το 95% εξ αυτών να τέμνει τουλάχιστον 4 ασυνέχειες, δηλαδή να εκτείνεται στο πέμπτο τέμαχος εντός της βραχομάζας;

Απάντηση/Λύση

Εάν υποθέσουμε ότι η ύπαρξη ασυνεχειών είναι μια πιθανοτική διαδικασία, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη διαδικασία Poisson που δηλώνει ότι η πιθανότητα k γεγονότων να εμφανίζονται σε ένα διάστημα, x , δίνεται από την:

$$P(k, x) = \frac{e^{-\lambda \cdot x} \cdot (\lambda \cdot x)^k}{k!}$$

Σε αυτήν την ερώτηση, $x = 4\text{m}$ (το μήκος του ήλου), $\lambda = 1.1\text{m}^{-1}$, και πρέπει να καθορίσουμε την πιθανότητα για τις διαφορετικές τιμές του k .

α. Δεν τέμνει ασυνέχεια.

Εδώ έχουμε $k = 0$ (δηλ. καμία ασυνέχεια στο μήκος του ήλου), και επομένως:

$$P(0, 4) = \frac{e^{-1.1 \cdot 4} \cdot (1.1 \cdot 4)^0}{0!} = \frac{0.0123 \cdot 1}{1} = 0.0123 \Rightarrow N_0 = n \cdot P(0, 4) = 600 \cdot 0.0123 = 15.44$$

Τον αριθμό N_0 στρογγυλεύουμε προς τα κάτω σε 15 ήλους, επειδή δεν μπορούμε να έχουμε ένα κλασματικό μέρος ενός ήλου.

β. Τέμνει λιγότερες από 5 ασυνέχειες.

Λιγότερες από 5 ασυνέχειες περιλαμβάνουν 0, 1, 2, 3, 4 ασυνέχειες, και έτσι έχουμε:

$$P(< 5, 4) = \sum_{k=0}^4 P(k, 4) = \sum_{k=0}^4 \frac{e^{-1.1 \cdot 4} \cdot (1.1 \cdot 4)^k}{k!} = 0.0123 + 0.0540 + 0.1188 + 0.1743 + 0.1917 = 0.55$$

Ο αριθμός ήλων είναι $600 \times 0.551 = 330.6$, το οποίο στρογγυλεύει προς τα κάτω σε 330 ήλοι.

γ. Τέμνει περισσότερες από 3 ασυνέχειες.

Η πιθανότητα να τέμνει περισσότερες από 3 ασυνέχειες μπορεί να υπολογιστεί από την πιθανότητα να τέμνει 3 ή λιγότερες ασυνέχειες, όπως:

$$\begin{aligned} P(> 3, 4) &= 1 - P(\leq 3, 4) = 1 - \sum_{k=0}^3 \frac{e^{-1.1 \cdot 4} \cdot (1.1 \cdot 4)^k}{k!} = 1 - (0.0123 + 0.0540 + 0.1188 + 0.1743) \\ &= 0.64 \end{aligned}$$

Ο αριθμός των ήλων επομένως είναι $600 \times 0.64 = 384$.

δ. Ποιο μήκος ήλου απαιτείται;

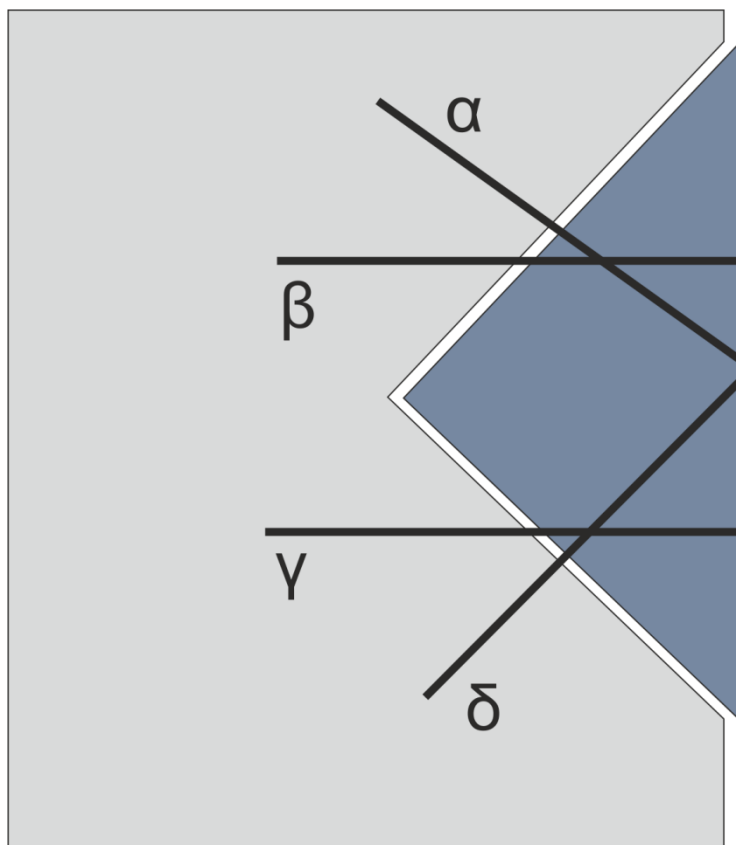
Η απάντηση δίνεται από τη λύση στην εξίσωση:

$$0.95 = P(\geq 4, x) = 1 - P(\leq 3, x) = 1 - e^{-y} \cdot \sum_{k=0}^3 \frac{(y)^k}{k!}; y = \lambda \cdot x = 7.7537 \Rightarrow x = \frac{7.7537}{1.1} = 7.05m$$

Η εξίσωση λύθηκε αριθμητικά. Πρόκειται για πολύ μεγάλη αύξηση στο προηγούμενο μήκος των 4m.

Κριτήριο αξιολόγησης 2

Όταν χρησιμοποιούμε μη τανυμένες ηλώσεις για την ενίσχυση του πετρώματος σε υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές, αυτές υφίστανται εφελκυσμό, διάτμηση ή θλίψη. Στο σχήμα φαίνεται ολισθαίνον τέμαχος στην παρειά σήραγγας που συγκρατείται εναλλακτικά από τους ήλους α, β, γ, δ. Αναγνωρίζοντας ότι οι ηλώσεις σχεδιάζονται να λειτουργούν σε εφελκυσμό με λίγη διάτμηση, βαθμολογήστε τις διατάξεις του σχήματος με βάση μόνο το παραπάνω κριτήριο.



Σχήμα 2-19. Βέλτιστη διεύθυνση ήλωσης.

Απάντηση/Λύση

α. Εφελκυσμός, β. Εφελκυσμός και μέτρια διάτμηση, γ. Εφελκυσμός και μέτρια διάτμηση, δ. Διάτμηση. Εκτιμώντας τους ήλους του σχήματος, έχουμε τη σειρά από το καλύτερο προς το χειρότερο: α, γ και β, δ (πρβ. Thompson et al., 2012).

Ασκήσεις εμπέδωσης της ύλης

Άσκηση 1

Συνήθης ήλος (SN) είναι ολόσωμα πακτωμένος σε διάτρημα κατά μήκος του άξονα κυλινδρικού δοκιμίου πετρώματος.

(α) Εφόσον ασκείται ομοιόμορφη πλευρική πίεση στο δοκίμιο, δώστε σε σκαρίφημα την κατανομή της δύναμης μέσα στο αγκύριο ως συνάρτηση της ακραίας τιμής της.

(β) Επιλύστε το ίδιο πρόβλημα αριθμητικά, για δοκίμιο πετρώματος με $E_r=100\text{GPa}$, $\nu=0.25$, διαμέτρου 1m, και μήκους 2m, πλευρική πίεση 10MPa, διάμετρο ήλου 20mm, ποιότητα χάλυβα B500.

Άσκηση 2

Δώστε στοιχεία διάτρησης απλού διατρητικού ήλου, για τη στήριξη κατακερματισμένου πετρώματος.

Άσκηση 3

Δώστε τα στοιχεία διάτρησης ήλου διαστελλόμενου τύπου για την τοποθέτησή του σε κερματισμένο πέτρωμα.

Δώστε σε σκαρίφημα την κατανομή της δύναμης στον ήλο κατά την εξόλκευσή του.

Άσκηση 4

Δώστε τα στοιχεία διάτρησης και ήλου συστελλόμενου τύπου, για την τοποθέτησή του σε διακλασμένο πέτρωμα. Δώστε σε σκαρίφημα την κατανομή της δύναμης στον ήλο κατά την εξόλκευσή του.

Κεφάλαιο 3

Σύνοψη

Η επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν χρειάζεται καλούπι και ως εκ τούτου δύναται να τοποθετείται γρήγορα και με ασφάλεια. Κατά την τοποθέτησή του λαμβάνει μορφή κελύφους και επομένως δύναται να μεταφέρει φορτία και στις τρεις διαστάσεις. Αναπτύσσονται τα υλικά σύνθεσής του, οι μέθοδοι, και η διαδικασία εκτόξευσης. Παραδείγματα και ασκήσεις συντελούν στην εμπέδωση.

Προαπαιτούμενη γνώση

Μαθήματα: Αντοχή των Υλικών, Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος, Δομικά Υλικά, Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Χρήσιμη βιβλιογραφία: Hoek et al. (1995), Maidl (1992)

3. Επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα⁴

3.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα που διαστρώνεται πάνω σε μία επιφάνεια με εκτόξευσή του από ακροφύσιο, ώστε να σχηματίζει στρώση σκυροδέματος με συνάφεια πάνω στην εν λόγω επιφάνεια ορίζεται ως «εκτοξευόμενο σκυρόδεμα» (shotcrete ή guniting ή sprayed concrete). Ο όρος guniting (King, 1996) δόθηκε το 1910 από την Cement Gun Co, γι' αυτό που σήμερα χαρακτηρίζεται ως λεπτών αδρανών εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ο όρος shotcrete χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1930 από την Αμερικανική Ένωση Σιδηροδρόμων, και στη συνέχεια ορίστηκε από την ACI 506R (1985) ως το σκυρόδεμα (ή κονίαμα) που μεταφέρεται μέσα σε σωλήνες και εκτοξεύεται υπό την πίεση αέρα με μεγάλη ταχύτητα επάνω σε μία επιφάνεια. Ο όρος sprayed concrete (ψεκαζόμενο σκυρόδεμα) καθιερώθηκε στην Ευρώπη από κανονισμούς και προδιαγραφές, όπως της EFNARC (1996), της BTS/ICE (2000), της AFTES (2000), κ.ά. Χρονικοί σταθμοί (ASA, 2015) της ανάπτυξής του είναι:

- 1895 : ανάπτυξη του πρωτότυπου ακροφυσίου τσιμέντου,
- 1910 : κατοχύρωση ευρεσιτεχνίας στις ΗΠΑ & Θέσπιση εμπορικής ονομασίας guniting,
- 1920 : κατοχύρωση ευρεσιτεχνίας στη Γερμανία,
- 1930 : εισαγωγή γενικού όρου shotcrete,
- 1940 : πρώτη χρήση αδρόκοκκων αδρανών,
- 1950 : έναρξη της Επιτροπής ACI 506, και ανάπτυξη μηχανής περιστρεφόμενου τυμπάνου,
- 1955 : εισαγωγή της μεθόδου υγρής μείξης,
- 1970 : εφαρμογή χαλύβδινων ινών για τον οπλισμό του εκτοξευμένου σκυροδέματος,
- 1975 : πρώτη χρήση πυριτιακής παιπάλης στη Νορβηγία.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% για τη στήριξη των πετρωμάτων, σε υπόγεια και επιφανειακά έργα. Με την εκτόξευση σκυροδέματος επάνω στα τοιχώματα των εκσκαφών, και την άμεση πρόσφυσή του σε αυτά, επιτυγχάνεται η άμεση επένδυσή τους χωρίς τη χρήση τύπων (καλουπιών). Το σκυρόδεμα που εκτοξεύεται από το ακροφύσιο σε μία τραχεία επιφάνεια πετρώματος, σχηματίζει αρχικά ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοκονίας με κόκκους άμμου μικρότερους από 0.2 mm. Το λεπτόκοκκο αυτό υλικό εισχωρεί στους πόρους και στις ρωγμές και προσφέρει μία βάση για την εκτόξευση και συμπύκνωση του υπολοίπου πάχους. Κατά τη δημιουργία του αρχικού στρώματος μέρος των χονδρόκοκκων αδρανών αναπηδά και πέφτει στο δάπεδο. Η πρόσφυση είναι προφανώς καλύτερη σε πρόσφατα θραυσμένο, καθαρισμένο, τραχύ πέτρωμα, παρά σε λεία ή εύθρυπτη επιφάνεια μετάλλου ή πετρώματος. Ζημιά στο νωπό

⁴ Το παρόν κεφάλαιο συγγράφηκε σε συνεργασία με τον Μ. Μιχαηλίδη, ΧΜ/ΕΜΠ.

σκυρόδεμα μπορεί να προκληθεί από τη διήθηση νερού, και γι' αυτό η όποια ροή θα πρέπει να παρακάμπτεται, όπως π.χ. με τη διάτρηση οπών και την τοποθέτηση σωλήνων συνδεμένων με το σύστημα στράγγισης.

Οι βασικές δράσεις του εκτοξευμένου σκυροδέματος ως επένδυση είναι: (α) στατική ενίσχυση του πετρώματος σε διάφορες κλίμακες, (β) σφράγιση οξειδούμενου ή χαλαρούμενου πετρώματος για αποφυγή της περαιτέρω χαλάρωσης λόγω έκθεσής του σε νερό ή υγρασία, και (γ) έλεγχος του νερού και της δημιουργίας πάγου, με ανακατεύθυνση, στράγγιση ή σταμάτημα της ροής. Πλεονεκτήματα της εφαρμογής του είναι: η δυνατότητα άμεσης επέμβασης, η τοποθέτησή του χωρίς χρήση καλουπιών, η ανεξαρτησία του από τη μορφή της επιφάνειας διάστρωσης και η συνεργασία του με άλλα μέτρα υποστήριξης. Στα μειονεκτήματα του συγκαταλέγονται οι καταπτώσεις του όταν εφαρμόζεται σε πετρώματα στα οποία έχει μειωμένη πρόσφυση, όπως αυτά που περιέχουν άργιλο. Τα υλικά και η σύνθεση του εκτοξευμένου σκυροδέματος, η εκτέλεση της εργασίας, οι έλεγχοι, οι απαιτήσεις υγείας-ασφάλειας, και ο τρόπος επιμέτρησης εργασιών ορίζονται από την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-02-00.

3.2 Ορισμοί σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-02-00⁵

3.2.1 Γενικοί

- *Αναπήδηση* (rebound) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μέρος των εκτοξευόμενων υλικών αναπηδά – ανακλάται επί της επιφάνειας εφαρμογής και δεν ενσωματώνεται τελικά στην σχηματιζόμενη στρώση σκυροδέματος επί της εν λόγω επιφάνειας.
- *Ινες* ορίζονται τα μικρού διακριτού μήκους στοιχεία από χάλυβα, οργανικά πολυμερή, γυαλί ή πολυκαρβονικά υλικά, επαρκώς μικρού μεγέθους ώστε να κατανέμονται και να διασκορπίζονται ομοιόμορφα στη μάζα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

3.2.2 Παραγόμενο υλικό

- *Βασικό ανάμειγμα* ορίζεται το ανάμειγμα σκυροδέματος που παραλαμβάνεται είτε σαν έτοιμο ανάμειγμα είτε αναμειγνύεται επιτόπου, με σκοπό να τροφοδοτήσει τον εξοπλισμό εκτόξευσης και να οδηγηθεί στο ακροφύσιο εκτόξευσης.
- *Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναφοράς* ορίζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο οποίο χρησιμοποιούνται όλα τα ενσωματούμενα υλικά, χωρίς τον επιταχυντή, για τον καθορισμό των αλλαγών και επιδράσεων στις μηχανικές του ιδιότητες.
- *Εργοστασιακώς αναμειγμένο ξηρό ανάμειγμα* ορίζεται το ξηρό ανάμειγμα που παραλαμβάνεται επί τόπου προς χρήση σε σάκου ή σιλό.
- *Νεαρό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα* ορίζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ηλικία μέχρι 24 ώρες από την κατασκευή του σχετικού στοιχείου.
- *Ξηρό ανάμειγμα* ορίζεται το βασικό ανάμειγμα με μέγιστη περιεχόμενη υγρασία μικρότερη από 0,5%, που προορίζεται για χρήση στην ξηρή μέθοδο.
- *Υγρό ανάμειγμα* ορίζεται το βασικό ανάμειγμα που προορίζεται για χρήση στην υγρή μέθοδο.
- *Ωριμο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα* ορίζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με πλήρη ανάπτυξη των ιδιοτήτων του, που νοείται σε ηλικία τουλάχιστον 28 ημερών.

3.2.3 Μέθοδοι κατασκευής

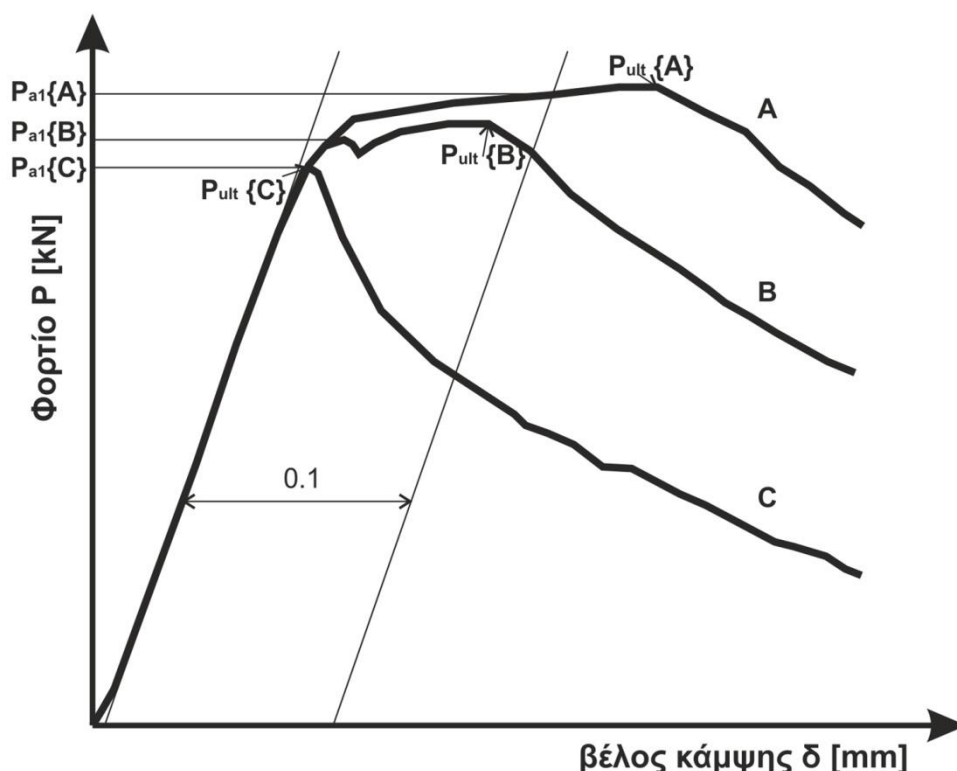
- *Ακροφύσιο* ορίζεται η διάταξη απόληξης της σωλήνας μεταφοράς του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η διάταξη αποτελείται από μονάδα ανάμειξης, στην οποία, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, εισπιέζονται εντός της ροής του βασικού αναμείγματος νερό, πιεσμένος αέρας ή/και πρόσθετα και πρόσμικτα.
- *Μεταφορά αραιής ροής* ορίζεται η μεταφορά του βασικού ξηρού ή υγρού αναμείγματος μέσω σωληνώσεων σε ένα συνεχές ρεύμα υψηλής πίεσης αέρα προς το ακροφύσιο και όπου η δύναμη και η ενέργεια μεταφοράς χρησιμοποιείται για την εκτόξευση και συμπίκνωση του αναμείγματος. Πρακτικά, η τεχνική εφαρμόζεται στην ξηρή μέθοδο μόνο.

⁵ Με μικρές διαφοροποιήσεις από τον συγγραφέα.

- *Μεταφορά πυκνής ροής* ορίζεται η τεχνική μεταφοράς με αντλία σκυροδέματος, χωρίς χρήση πιεσμένου αέρα, του υγρού αναμείγματος στο ακροφύσιο όπου εκτοξεύεται και συμπυκνώνεται πνευματικά με χρήση αέρα κατάλληλα υψηλής πίεσης. Η τεχνική εφαρμόζεται μόνο στην υγρή μέθοδο.
- *Ξηρή μέθοδος* ορίζεται η μέθοδος εκτόξευσης ξηρού αναμείγματος όπου η απαιτούμενη ποσότητα του νερού ή πρόσθετου νερού εισάγεται στο ακροφύσιο.
- *Συντήρηση* ορίζονται τα μέτρα για μείωση των επιβλαβών συνεπειών της εξάτμισης από το σκυρόδεμα.
- *Υγρή μέθοδος* ορίζεται η μέθοδος εκτόξευσης υγρού αναμείγματος με καθορισμένο λόγο νερού/τσιμέντο.

3.2.4 Ιδιότητες

- *Ισοδύναμη διάμετρος* ίνας ορίζεται η διάμετρος ενός κύκλου με επιφάνεια ίση με την επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής μίας μη κυκλικής ίνας.
- *Ακραία καμπτική αντοχή* («Καμπτική αντοχή κατά την αστοχία» σύμφωνα με την ΤΠ) (ultimate flexural strength) νοείται η τάση που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο P_{ult} (Σχήμα 3-1) το οποίο μπορεί να αναλάβει ένα άοπλο ή ινοπλισμένο σκυρόδεμα όταν υπόκειται σε μία καμπτική δοκιμή όπως αυτή ορίζεται στα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 12390-5 ή ΕΛΟΤ EN 14488-3.
- *Κατηγορία πρώιμης ανάπτυξης* (early development class) ορίζεται η κατηγορία πρώιμης πήξης και πρώιμης ανάπτυξης αντοχής μέχρι και τις 24 ώρες.
- *Λόγος μορφής* («λόγος σχήματος ινών» σύμφωνα με την ΤΠ) (aspect ratio of fibres) ορίζεται ο λόγος του μήκους προς την διάμετρο ή την ισοδύναμη διάμετρο της ίνας.
- *Πρώτη κορυφαία καμπτική αντοχή* (first peak flexural strength) («Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής» σύμφωνα με την ΤΠ) ορίζεται η τάση που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο P_{a1} (Σχήμα 3-1) στο οποίο ανθίσταται ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όταν υπόκειται σε δοκιμή κάμψης όπως προδιαγράφεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 14488-3.
- *Νωπό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα* (fresh sprayed concrete) ορίζεται αυτό πριν την πήξη του.



Σχήμα 3-1. Παραδείγματα καμπλών φόρτισης-βύθισης για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών φορτίων.

- *Παραμένουσα αντοχή* (residual strength) ορίζεται η υπολογιζόμενη τάση σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα που αντιστοιχεί σε ένα φορτίο, στην καμπύλη φορτίου – βύθισης (Σχήμα 3-1), όπως καταγράφεται σε μία καμπτική δοκιμή όπως αυτή ορίζεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 14488-3. Το φορτίο αυτό είναι το ελάχιστο στο διάστημα από 0.5 mm έως 1.0mm ή 2mm ή 4mm, ανάλογα με την κατηγορία παραμόρφωσης D₁, D₂, D₃, αντίστοιχα.
- *Προδιαγραφμένη κατηγορία τελικής αντοχής* σκυροδέματος ορίζεται η αντοχή θλίψης κυλινδρικών δοκιμών που προδιαγράφεται για ηλικία 28, 56 ή 90 ημερών και η οποία πρέπει να επιβεβαιώνεται βάσει δοκιμών ποιότητας.
- *Σκίαση* (shadow effect) ορίζεται το φαινόμενο πτώχης συμπύκνωσης του σκυροδέματος ή παρουσίας κενών στην πίσω παρειά στοιχείων, όπως π.χ. μία ράβδος οπλισμού στην οποία η εκτόξευση λαμβάνει χώρα μόνο από τη μία πλευρά.

3.2.5 Δοκιμές

- *Δοκιμές πριν την έναρξη της κατασκευής* (preconstruction test) ορίζονται οι δοκιμές με το προτεινόμενο προσωπικό, υλικά, εξοπλισμό και μέθοδο εκτόξευσης και τις οποίες ο Ανάδοχος πρέπει να εκτελέσει πριν την έναρξη των εργασιών για να εξασφαλίσει την επίτευξη των προδιαγραφμένων ιδιοτήτων.
- *Εκτίμηση συμμόρφωσης* (assessment of conformity) ορίζεται η συστηματική εξέταση του βαθμού στον οποίο μία κατασκευαστική διαδικασία και ένα προϊόν είναι σε θέση να ικανοποιήσουν προδιαγραφμένες απαιτήσεις.
- *Επιθεώρηση* (inspection) ορίζεται το σύνολο των ενεργειών που αναλαμβάνονται για τον έλεγχο και την επιβεβαίωση ότι η εκτέλεση των εργασιών γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου.
- *Κατηγορία επιθεώρησης* (inspection class) ορίζεται το σύνολο των αντικειμένων που θα επιθεωρηθούν και η έκταση της επιθεώρησης, με αναφορά σε τρεις κατηγορίες επιθεώρησης.
- *Προκαταρκτικές δοκιμές* (preliminary test) ορίζονται οι δοκιμές που ελέγχουν την απαιτούμενη σύνθεση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ώστε να ικανοποιούνται όλες οι προδιαγραφμένες απαιτήσεις στη νωπή και σκληρυμένη κατάσταση.

3.3 Υλικά

Ο σχεδιασμός του μίγματος καθοδηγείται από τις ίδιες αρχές που διέπουν το σχεδιασμό του σκυροδέματος, όπως ο χαμηλός λόγος N/T, η ελάχιστη περιεκτικότητα σε αέρα και ο επαρκής βαθμός συμπύκνωσης, καθώς και από πρόσθετους παράγοντες που επιδρούν στη διαβάθμιση των αδρανών και στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Το μίγμα σκυροδέματος προσδιορίζεται από τις απαιτήσεις εφαρμογής και λειτουργίας. Κατά κανόνα, αυτές επιτυγχάνονται με μείωση του μέγιστου κόκκου των αδρανών στα 8mm, αύξηση της περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό, και χρήση προσμίκτων για τον έλεγχο των ιδιοτήτων. Όπως και στο έγχυτο, οι βασικές παράμετροι που ελέγχουν την αντοχή και την ποιότητα είναι ο λόγος N/T, η περιεκτικότητα σε αέρα και ο βαθμός συμπύκνωσης. Εντούτοις, η διαδικασία μίξης των συστατικών του και τοποθέτησής του επί τόπου, διαφέρει από το έγχυτο. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο του διαστρωμένου σκυροδέματος είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή του εκτοξευόμενου μίγματος, λόγω της μεγαλύτερης αναπήδησης των αδρότερων αδρανών από αυτή του τσιμέντου, και επομένως, η επιτόπου σύνθεσή του θα διαφέρει από το αρχικό μίγμα. Η σύνθεσή του στο τοίχωμα εξαρτάται από την αρχική σύνθεση, το σχεδιασμό του ακροφυσίου, την ταχύτητα πρόσκρουσης, την ικανότητα του χειριστή, την επιφάνεια εφαρμογής, την ποσότητα και τον τύπο των προσμίκτων, τον οπλισμό, την απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια και τη γωνία ψεκασμού.

Οι αναλογίες των υλικών επιλέγονται ώστε να ικανοποιείται το σύνολο των κριτηρίων και των απαιτήσεων επιτελεστικότητας τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που περιλαμβάνουν την συνεκτικότητα (για το υγρό ανάμειγμα), αντοχή, αντοχή σε κάμψη, πλαστιμότητα, πυκνότητα, ανθεκτικότητα, στεγανότητα, υδατοπερατότητα, προστασία των ενσωματούμενων μεταλλικών στοιχείων έναντι διάβρωσης και αφού ληφθεί υπόψη η μέθοδος κατασκευής και η ποσότητα της αναπήδησης και σκόνης κατά την εκτέλεση της εργασίας εκτόξευσης. Οι απαιτήσεις για τη σύνθεση και τις ιδιότητες, που σχετίζονται με τις κατηγορίες βλαπτικότητας του περιβάλλοντος, εξαρτώνται από την θεωρούμενη τεχνική διάρκεια ζωής του στοιχείου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και σε συμμόρφωση με τις προβλέψεις του προτύπου EN 206-1. Οι οριακές τιμές για την σύνθεση του σκυροδέματος, που σχετίζονται με τις κατηγορίες έκθεσης και δίνονται στο πρότυπο EN 206-1. Οι τιμές της σύνθεσης του σκυροδέματος αναφέρονται στο

σκυρόδεμα μετά την εκτόξευση και πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την προσθήκη νερού κατά την εκτόξευση και την επίδραση του φαινομένου της αναπήδησης.

3.3.1 Συνήθη υλικά

Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το τσιμέντο, το νερό και τα αδρανή.

3.3.1.1 Τσιμέντο

Τσιμέντα Portland, που συμφωνούν με τις απαιτήσεις του EN 197-1 (Πίνακας 3-1), είναι επιτρεπτά. Καλά αποτελέσματα έχουμε με αμιγή τσιμέντα CEM I 42.5 ή CEM I 52.5 (σπανίως εφαρμόζεται), αλλά και με το CEM II 42.5 που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με λίγο μεγαλύτερη κατανάλωση επιταχυντή. Η επιλογή του τύπου του τσιμέντου εξαρτάται από τη συμβατότητά τους με τους διαθέσιμους επιταχυντές. Λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της επικρατούσας θερμοκρασίας και η έκλυση θερμότητας στον απαιτούμενο χρόνο εργασιμότητας, οι απαιτήσεις ανάπτυξης και τελικής αντοχής, και οι συνθήκες συντήρησης. Καλό είναι το τριασβέστιο του αργιλίου (C₃A) να είναι μεγαλύτερο από 5% και η ειδική επιφάνεια Blaine να είναι μεγαλύτερη από 400m²/kg. Ο βέλτιστος χρόνος πήξης επιτυγχάνεται με τον πιο συμβατό συνδυασμό τσιμέντου και επιταχυντή πράγμα το οποίο απαιτεί εργαστηριακές δοκιμές. Εφόσον υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης από θειικά, τότε απαιτείται τσιμέντο ανθεκτικό σε αυτά σύμφωνα με το EN 197-1. Επειδή όμως ένα τέτοιο τσιμέντο δεν είναι πάντοτε διαθέσιμο, είναι προτιμότερο να προδιαγράφεται εναλλακτικά τσιμέντο CEM II σε περιεκτικότητα 400-450kg/m³, με χαμηλό N/T, που έχει ικανοποιητική ανθεκτικότητα στα θειικά (Μιχαηλίδης, 2015). Σήμερα έχουν αναπτυχθεί τσιμέντα ταχείας πήξης για χρήση στην ξηρή μέθοδο μείξης, που επιτρέπουν την αποφυγή χρήσης επιταχυντών, αλλά απαιτούν τελείως ξηρά αδρανή (ICE, 1996).

Η ποσότητα τσιμέντου εξαρτάται από την απαίτηση αντοχής για το μέγιστο κόκκο αδρανών, και δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη των 300kg/m³ (EFNARC, 1996). Συνήθως η ποσότητά του επιλέγεται να είναι 350÷450kg/m³. Μη αναγκαία μεγάλη απαίτηση αντοχής απαιτεί υπερβολικά μεγάλη αναλογία τσιμέντου που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη συστολή ξήρανσης και ρωγμάτωση. Αν χρησιμοποιούνται μη αλκαλικοί επιταχυντές, που δεν μειώνουν την αντοχή του εκτοξευμένου σκυροδέματος σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς, η ποσότητα του τσιμέντου δύναται να είναι 350-400kg/m³, αρκεί να είναι διαθέσιμη η κατάλληλη άμμος με υψηλή ποσότητα παιπάλης (Μιχαηλίδης, 2015).

Πίνακας 3-1. Βασικοί τύποι τσιμέντου και κατηγορίες αντοχής κατά EN 197-1

Τύπος τσιμέντου	Περιγραφή	Κατηγορία Αντοχής	Όρια Αντοχής MPa
CEM I	Τσιμέντο Portland		
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland	32.5	32.5÷52.5
CEM III	Σκωριοτσιμέντο	42.5	42.5÷62.5
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο	52.5	≥52.5
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο		

3.3.1.2 Συμπληρωματικά του τσιμέντου ορυκτά πρόσθετα

Τα ορυκτά πρόσθετα (EN 206-1) είναι βιομηχανικά παραπροϊόντα, που δύνανται να βελτιώσουν την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στη θερμική ρωγμάτωση, στη διαστολή της αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης, και στην προσβολή από θειικά (Πίνακας 3-2). Διακρίνονται (α) σε υδραυλικά⁶ και ποζολανικά,⁷ όπως η σκωρία υψικαμίνων (GGBS) και η ιπτάμενη τέφρα με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (τύπου W ή C), που επιβραδύνουν την ανάπτυξη της αντοχής και αυξάνουν την ανθεκτικότητα, και (β) σε ποζολανικά, όπως η πυριτιακή παιπάλη και η ιπτάμενη τέφρα με χαμηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (τύπου V ή F) που βελτιώνουν την ανθεκτικότητα, αυξάνουν τη συνάφεια, και τις μηχανικές ιδιότητες, αλλά μειώνουν το pH του νερού των πόρων του σκυροδέματος, και γι' αυτό πρέπει να είναι περιορισμένη η ποσότητά τους.

Η σιδηρούχα σκωρία υψικαμίνων (EN 15167) προκύπτει κατά την τήξη σιδηρομεταλλεύματος. Με κατάλληλη σβέση και άλεση στα 400÷500m²/kg Blaine, αναπτύσσει ικανοποιητικές υδραυλικές ιδιότητες. Είναι φτηνή, και αποτελεί εξαιρετικό πληρωτικό (filler), μειώνει όμως την πολύ πρώιμη αντοχή. Συχνά βελτιώνει την ανθεκτικότητα του εκτοξευμένου σκυροδέματος.

⁶ Συνδετικά (τσιμεντικά) υλικά που πήζουν και σκληρύνονται μέσω χημικής αντίδρασης με το νερό, ακόμη και μέσα σε αυτό.

⁷ Πυριτικά υλικά που δεν έχουν από μόνα τους υδραυλικές ιδιότητες αλλά παρουσία υγρασίας αντιδρούν χημικά με το Ca(OH)₂ για να αναπτυχθούν ενώσεις που έχουν υδραυλικές ιδιότητες.

Η ιπτάμενη τέφρα (EN 450) λαμβάνεται από τα ηλεκτρικά φίλτρα κατά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με κονιοποιημένο άνθρακα. Διακρίνεται σε χαμηλής (<10%) και υψηλής (15÷40%) περιεκτικότητας σε CaO. Οι χαμηλής περιεκτικότητας έχουν μειωμένη ποζολανική δραστηριότητα. Αντίθετα, οι υψηλής περιεκτικότητας είναι περισσότερο δραστικές. Είναι φτηνή και προσφέρει πολύ καλή εργασιμότητα, ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις ανθεκτικότητας, και προσφέρει ομογενοποίηση στο προϊόν.

Πίνακας 3-2. Χαρακτηριστικά τσιμέντου - προσθέτων στο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα (Höfler et al., 2011)

Χαρακτηριστικό	Τσιμέντο	Πυριτιακή παιπάλη	Ιπτάμενη τέφρα	Σκορία	Πληρωτικό filler
Νωπό σκυρόδεμα					
Εργασιμότητα	++	++	+++	+	+++
Κράτηση νερού	++	+++	+	+	++
Ανάπτυξη αντοχής					
Πολύ πρόωμη αντοχή <4h	+++	+	-	-	+ / -
Πρόωμη αντοχή <12h	++	++	-	-	+ / -
Τελική αντοχή	++	+++	++	+++	+ / -
Ανθεκτικότητα					
Αντίσταση στη διείσδυση νερού	++	+++	++	++	+
Αντίσταση στα θειικά	-	++	+ / -	+++	+ / -
Αντίσταση ASR	-	+ / -	+ / -	+++	+ / -

+ βελτίωση, - επιδείνωση

Η πυριτιακή παιπάλη (EN 13263) είναι παραπροϊόν των επαγωγικών τοξωτών κλιβάνων στις βιομηχανίες παραγωγής μετάλλων πυριτίου και σιδηροπυριτικών κραμάτων. Συνίσταται από κόκκους άμορφου διοξειδίου του πυριτίου με πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια, 20-35m²/g. Συγκρίνοντας το κοινό τσιμέντο Portland και τις συνήθεις ιπτάμενες τέφρες με την πυριτιακή παιπάλη, οι τελευταίες εμφανίζουν κατανομές σωματιδίων οι οποίες είναι δύο τάξεις μεγέθους λεπτότερες. Το υλικό είναι ισχυρά αντιδραστικό και ποζολανικό. Χρησιμοποιείται όμως κυρίως ως πρόσθετο που διανέμει τα προϊόντα της ενυδάτωσης ομοιόμορφα, μειώνοντας τη διαπερατότητα, και ως εκ τούτου αυξάνοντας την αντίσταση στα θειικά και την ανθεκτικότητα στην πήξη-τήξη του νερού (Melbye, 2001). Είναι δύσκολα διαχειρίσιμο υλικό και αυξάνει αισθητά την απαίτηση νερού στο σκυρόδεμα αν δεν χρησιμοποιηθούν υπερρευστοποιητές. Είναι επίσης ακριβό υλικό, όμως είναι πρόσθετο που δεν επιδρά δυσμενώς στην πρόωμη αντοχή και τεχνικά κατάλληλο για πληθώρα απαιτήσεων. Όμως, όπως παρατηρεί ο Μιχαηλίδης (2015), στα υπόγεια έργα στην Ελλάδα, η προσθήκη πυριτιακής παιπάλης η οποία κατά κόρον συνιστάται από Ευρωπαίους ερευνητές ως μέσο μείωσης της αναπήδησης, δεν είναι αναγκαία λόγω της καταλληλότητας της ασβεστολιθικής άμμου.

Στην περίπτωση ασβεστολιθικών αδρανών με άμμο πλούσια σε φίλλερ, δεν είναι απαραίτητη γενικά η προσθήκη ορυκτών προσθέτων, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε όλη την Ευρώπη, όπου δεν υπάρχουν άμμοι με υψηλά ποσοστά παιπάλης (15-18%). Η χρήση ιπτάμενης τέφρας, GGBS, ή πυριτιακής παιπάλης δεν δίνει κάποια ιδιαίτερη βελτίωση και επειδή αυτά τα υλικά δεν υπάρχουν τυποποιημένα στην ελληνική αγορά, η χρήση τους δημιουργεί παρά επιλύει προβλήματα. Πιο εύκολη είναι η χρήση πληρωτικού φίλλερ που υπάρχει στην ελληνική αγορά (Μιχαηλίδης, 2015).

3.3.1.3 Νερό

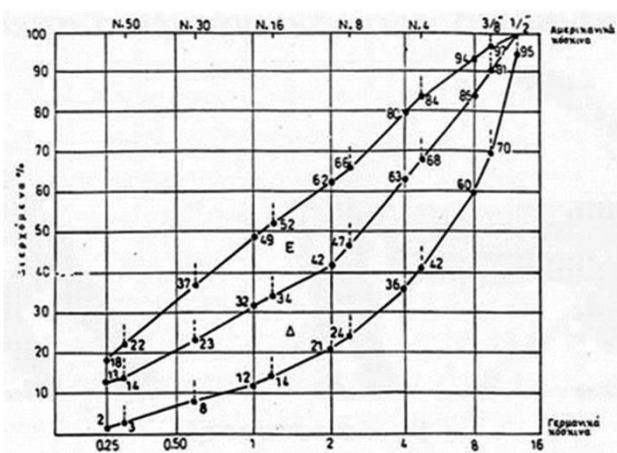
Το νερό του μείγματος πρέπει να είναι καθαρό, και να μην περιέχει συστατικά που επιβραδύνουν ή επιταχύνουν την ενυδάτωση, όπως έλαια, χλωρικά, θειικά, ή άλλα διαλυμένα άλατα, σάκχαρα, αιωρούμενη ιλύ, οργανικά. Θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του EN 1008 για το Νερό Ανάμειξης του σκυροδέματος. Φυσικά νερά, όπως υπόγεια, ποτάμια, λιμναία, βρόχινα, είναι γενικά κατάλληλα.

Ο λόγος N/(T+πρόσθετα) έχει μεγάλη σημασία τόσο στην επίτευξη ικανοποιητικής θλιπτικής αντοχής, όσον και στη μείωση του βαθμού της αναπήδησης. Θα πρέπει να είναι μικρότερος του 0.55 (EFNARC, 1996), και προτιμότερο είναι να κυμαίνεται μεταξύ 0.40 και 0.45.

3.3.1.4 Αδρανή

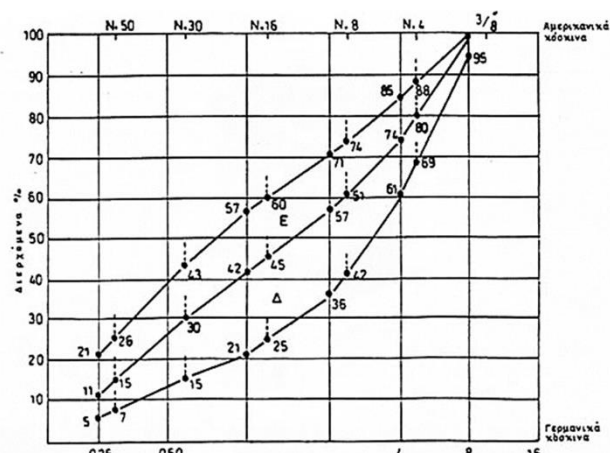
Η καταλληλότητα των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος προδιαγράφεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620. Τα αδρανή σκυροδέματος χωρίζονται συνήθως σε τρεις (3) κατηγορίες

(κλάσματα) ανάλογα με τη διαβάθμιση των κόκκων: άμμος, γαρμπίλι και σκύρα ή χαλίκι. Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λείπει το τελευταίο κλάσμα. Η διαβάθμιση των κόκκων θα πρέπει να έχει μέγιστο κόκκο αδρανών φ15 (1/2") ή φ8 (3/8"), και να είναι συνεχής χωρίς έλλειψη ή υπερβολή σε οποιοδήποτε μέγεθος ώστε να βρίσκεται μέσα στις ζώνες Δ και Ε (Σχήμα 3-2 α, β)· συνιστάται η ζώνη Ε (ΚΕΔΕ, 1999). Στο Σχήμα 3-2γ δίνονται τα όρια της διαβάθμισης που προτείνονται από την EFNARC (1996). Εικόνα της διαβάθμισης των αδρανών φαίνεται στο Σχήμα 3-2δ. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται βέλτιστη συμπύκνωση με αποτέλεσμα πυκνό υλικό, στεγανότητα, υψηλή θλιπτική αντοχή και ελαχιστοποίηση της αναπήδησης. Αδρανή από σχιστώδη υλικά ή που περιλαμβάνουν επιμήκεις κόκκους τείνουν να μειώνουν την συμπύκνωση. Άλλωστε οι επιμήκεις κόκκοι έχουν πολύ μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια από αυτή που έχουν οι στρογγυλεμένοι με αποτέλεσμα τα μίγματα που περιέχουν τους πρώτους να είναι πτωχά σε τσιμέντο. Λόγω της αναπήδησης γίνεται από μόνη της διαβάθμιση του μίγματος με την απώλεια κυρίως των μεγάλων κόκκων και η πράξη έχει δείξει ότι και αδρανή με κακή διαβάθμιση είναι δυνατό να δώσουν ποιοτικά καλό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μολονότι η ποσότητα αναπήδησης είναι μεγαλύτερη από όσο είναι αποδεκτό. Η BTS/ICE (2000) προτείνει να μην υπερβαίνει τα 10mm ο μέγιστος κόκκος. Τα αδρανή πρέπει να είναι ελεγμένα έναντι αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης με τα υδραυλικά συνδετικά και τα πρόσμικτα όπως οι επιταχυντές. Αντιδραστικές μορφές της πυριτίας απαντώνται ως άμορφη στον οπάλιο, ως ινώδης κρυπτοκρυσταλλοφυής στον καλχηδόνιο, και ως κρυσταλλική στον τριδυμίτη. Αυτά τα αντιδραστικά υλικά απαντούν σε οπαλιούχους ή καλχηδονιούχους κερατόλιθους, πυριτικούς ασβεστόλιθους, ρυόλιθους ή ρυολιτικούς τόφφους, δακίτες ή δακιτικούς τόφφους, ανδεσίτες ή ανδεσιτικού τόφφους, και φυλλίτες (Neville, 1994). Οι σημερινές προδιαγραφές τείνουν περισσότερο να είναι απαιτήσεις συμπεριφοράς, δηλαδή να μην απαιτούν συγκεκριμένες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αλλά μόνον ότι το τελικό προϊόν θα πρέπει να έχει μία καθορισμένη αντοχή.



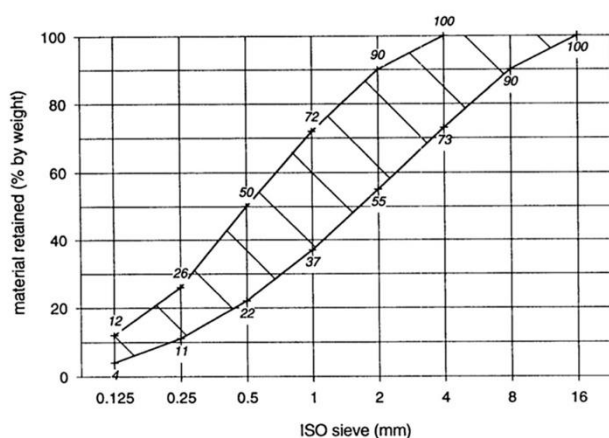
Διάγραμμα III: Ορια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 16 ή 1/2".

(α) ΚΤΣ, 1997 (ΦΕΚ 315)



Διάγραμμα IV: Ορια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 8 ή 3/8".

(β) ΚΤΣ, 1997 (ΦΕΚ 315)



(γ) EFNARC, (1996)

Σχήμα 3-2. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών



(δ) Μέγ. κόκκος 8mm (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

3.3.1.5 Λεπτά αδρανή (filler)

Τα λεπτά υλικά ακολουθούν την προδιαγραφή ΕΛΟΤ ΕΝ 206-1. Λειτουργούν ως λιπαντικά στο νωπό σκυρόδεμα, και γι' αυτό προστίθενται στο μίγμα, στο κλάσμα -0.125mm , που μαζί με το τσιμέντο και τα πρόσθετα επιτελούν το σκοπό αυτό. Μειώνουν επίσης τον κίνδυνο διαχωρισμού του μίγματος κατά την τοποθέτηση και η συμπίκνωση γίνεται ευκολότερη. Ωστόσο, εφόσον το περιεχόμενο των λεπτών είναι πολύ υψηλό, παράγεται κολλώδες νωπό σκυρόδεμα. Επίσης λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε νερό υπάρχει τάση για μεγαλύτερη συρρίκνωση και ερπυσμό.

3.3.2 Πρόσμικτα (admixtures)

Τα πρόσμικτα ακολουθούν την προδιαγραφή ΕΛΟΤ ΕΝ 934-2, -5, -6. Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν ή να μεταβάλλουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, που δεν μπορούν να ελεγχθούν από τα συνήθη συστατικά του. Διακρίνονται σε ρυθμιστές της πήξης, και σε τασιενεργές ενώσεις (Mehta & Monteiro, 2009). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι επιταχυντές και οι επιβραδυντές, ενώ στη δεύτερη τα αερακτικά, οι μειωτές νερού και οι υπερρευστοποιητές. Προστίθενται ως ποσοστό 0.5% έως 7.0% του βάρους του τσιμέντου ή συνδετικού υλικού, που δίνει ποσότητες 2 έως 32 kg/m^3 .

3.3.2.1 Επιταχυντές

Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω της εφαρμογής του με ψεκασμό, υπάρχουν δύο απαιτήσεις. Ως νωπό σκυρόδεμα απαιτείται να έχει πολύ καλή εργασιμότητα, και αντλησιμότητα. Αντίθετα, μετά τον ψεκασμό απαιτείται άμεση ανάπτυξη της αντοχής που να δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής ακόμη και στην οροφή στρώματος σκυροδέματος επαρκούς πάχους που να φέρει το ίδιο του βάρος. Στις σήραγγες συχνά οι απαιτούμενοι χρόνοι αρχικής πήξης είναι μικρότεροι από 3 λεπτά, τελικής πήξης μικρότεροι από 10 λεπτά, και ανάπτυξης αντοχής μεγαλύτερης από 5 MPa στις πρώτες 8 ώρες. Οι επιταχυντές είναι χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για να αποκτά γρηγορότερα αντοχή και να μπορεί να φέρει φορτία της σήραγγας σε πρώιμα στάδια της διάνωσης. Εκτός αυτού μειώνουν τον βαθμό της αναπήδησης των αδρανών, και επιτρέπουν τη δημιουργία παχύτερων στρώσεων ανά ψεκασμό, την εκτόξευση σε υγρές επιφάνειες με μικρή ροή και την εκτόξευση προς την οροφή. Η εκτίμηση της καταλληλότητας του επιταχυντή θα πρέπει να γίνεται στο εργαστήριο πριν από την έναρξη της κατασκευής, καθώς πολλοί επιταχυντές είναι ασύμβατοι με διάφορα τσιμέντα.

Προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην ποσότητα της δόσης του επιταχυντή, καθώς οι επιταχυντές αφενός είναι ακριβοί, αφετέρου μειώνουν λιγότερο ή περισσότερο την τελική αντοχή του σκυροδέματος. Πολλοί από τους σύγχρονους επιταχυντές επιφέρουν πολύ μικρότερη μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος. Η συνήθης δόση των επιταχυντών είναι 4÷6% του τσιμέντου κατά βάρος, αν και δόσεις 7 % ή και μεγαλύτερες χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται εξαιρετικά γρήγορη σκλήρυνση. Επιτόπου χρησιμοποιούνται δύο ειδών περιεκτικότητες, μία χαμηλή για συνήθη χρήση, και μία υψηλότερη για την κατασκευή μίας αρχικής στρώσης πολύ μικρού πάχους κατάλληλης και για δύσκολες συνθήκες με νερά ή χαλαρό έδαφος. Στην πρώτη περίπτωση δεν πρέπει η αντοχή να μειώνεται περισσότερο από 30% σε σχέση με το αντίστοιχο σκυρόδεμα χωρίς τη χρήση του επιταχυντή. Στη δεύτερη περίπτωση η απώλεια στην τελική αντοχή δεν έχει σημασία, καθώς η προσωρινή σταθεροποίηση του εδάφους και η υδρομάστευση, ενώ τα φορτία πρόκειται να αναληφθούν από τις στρώσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που θα ακολουθήσουν. Επίσης, κατά τον ψεκασμό σε κατακόρυφα τοιχώματα η δόση τους θα είναι μικρότερη από ότι κατά τον ψεκασμό της οροφής, ενώ κατά τον ψεκασμό του δαπέδου συχνά είναι δυνατή η μη χρήση επιταχυντή. Οι επιταχυντές προσφέρονται σε μορφή υγρού ή σκόνης. Διακρίνονται σε ελεύθερους αλκαλίων και σε αλκαλιούχους, με τους δεύτερους να υποδιακρίνονται σε αργιλικούς και σε πυριτικούς. Ο Πίνακας 3-3 δίνει τις κύριες ιδιότητές τους.

3.3.2.1.1 Ελεύθεροι αλκαλίων

Οι υγροί ελεύθεροι αλκαλίων (alkali free) επιταχυντές, επιβάλλονται πλέον από τις προδιαγραφές σε παγκόσμιο επίπεδο για τις εφαρμογές εκτοξευόμενου σκυροδέματος υψηλών απαιτήσεων. Τούτο οφείλεται στις ευεργετικές ιδιότητές τους όσον αφορά την εφαρμογή και το περιβάλλον, την υγεία και την ασφάλεια. Αυτά τα προϊόντα που βασίζονται σε υδατικά διαλύματα ή αιωρήματα των ενώσεων θεικού αργιλίου, εξασφαλίζουν πολύ καλή εξέλιξη της πρώιμης αντοχής σε συνδυασμό με βέλτιστες ιδιότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μείωση της αναπήδησης. Όσον αφορά τον όρο «ελεύθεροι αλκαλίων», πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ δύο χημικών πτυχών επίδρασης του προϊόντος στις ιδιότητες του εκτοξευόμενου

σκυροδέματος: (α) η αλκαλικότητα (ή βασικότητα) είναι χαμηλή, συνήθως η τιμή του pH είναι περίπου 3. Αυτή η αλκαλικότητα επηρεάζει την υγεία και την ασφάλεια κατά την εφαρμογή, καθόσον οι άνθρωποι ιστοί κινδυνεύουν πολύ περισσότερο από ισχυρά αλκαλικά υγρά παρά από ασθενή οξέα, (β) η περιεκτικότητα σε ιόντα αλκαλίων, π.χ. νατρίου και καλίου, επηρεάζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Με την αυξανόμενη περιεκτικότητα σε αλκάλια η τελική αντοχή και η ανθεκτικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος μειώνεται.

Η επιταχυνόμενη πήξη και πρώιμη σκλήρυνση, επιτυγχάνονται χάρη σε δύο χημικές αντιδράσεις επαγόμενες από τα θειικά αργιλίου και θειικά υδροξείδια αργιλίου του επιταχυντή. Οι αντιδράσεις αυτές λαμβάνουν χώρα η μία μετά την άλλη, αλλά και με επικάλυψη και χημική παρεμβολή μεταξύ τους. Η αργιλική αντίδραση ξεκινάει με την ανάμειξη του επιταχυντή με το σκυρόδεμα στο ακροφύσιο, και εξ αυτής υπάρχει πολύ έντονος σχηματισμός εττρινγκίτη. Αυτή η άμεση εκκίνηση της κατακρήμνισης του εττρινγκίτη, η οποία λαμβάνει χώρα για ωρίμανση διάρκειας περίπου μίας ώρας, σχηματίζει μία αρχική στερεή μήτρα η οποία είναι αρκετά ισχυρή για την ασφαλή εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Ωστόσο, η μέγιστη αντοχή σε θλίψη, ως αποτέλεσμα αυτής της πρωτογενούς αντίδρασης, συνήθως δεν υπερβαίνει τα 1.0 έως 1.5 MPa.

Εν όψει της δράσης δυσμενών παραγόντων στο νεαρό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω π.χ. φορτίων στη στέψη ή εισροής νερού, αυτή η αρχικά επιτευχθείσα αντοχή πρέπει να συνεχιστεί από μία επακόλουθη διαδικασία αύξησης της αντοχής, την πυριτική ενυδάτωση ως δευτερεύουσα αντίδραση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Στο νωπό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενυπάρχουν γενικά επιβραδυντές για την παράταση της εργασιμότητας του μείγματος. Η επιβράδυνση αυτή της πυριτικής ενυδάτωσης είναι δυσμενής για την επίδοση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η δεύτερη δράση των επιταχυντών ελεύθερων αλκαλίων, κατά την ωρίμανση του νεαρού εκτοξευόμενου σκυροδέματος, είναι η ακύρωση της αρχικής επιβράδυνσης της ενυδάτωσης του τσιμέντου, η οποία οδηγεί σε μία γρηγορότερη έναρξη της πυριτικής αντίδρασης σε σύγκριση με το νωπό σκυρόδεμα.

Πίνακας 3-3. Τύποι επιταχυντών και κύριες ιδιότητες (Höfler et al., 2011)

Ιδιότητες	Τύπος επιταχυντή		
	Αλκαλιούχος αργιλικός	Αλκαλιούχος πυριτικός	Ελεύθερος αλκαλίων
Εύρος δόσης	3÷6%	12÷15%	4÷7%
pH	13÷14	12÷13	3
Ισοδύναμο Na ₂ O	20%	12%	<1%
Πολύ πρώιμη αντοχή για την ίδια δόση	++++	++++	++
Τελική αντοχή	+	--	+++
Υδατοστεγανότητα	++	--	+++
Έκπλυση	---	--	-
Υγιεινή	---	-	+++
Ασφάλεια μεταφοράς	--	-	+++

+ βελτίωση, - επιδείνωση

3.3.2.1.2 Αλκαλιούχοι (ή αλκαλικοί)

Είναι παλαιότεροι τύποι υγρών επιταχυντών, που βασίζονται σε υδατικά πυριτικά (silicates) ή αργιλικά (aluminates) διαλύματα. Η διαφορά της δράσης μεταξύ αργιλικών και πυριτικών επιταχυντών έγκειται στο ότι οι αργιλικοί λαμβάνουν μέρος στην ενυδάτωση του τσιμέντου και αναπτύσσουν την αντοχή του τσιμέντου μέσα σε 0.5 έως 2 ώρες. Οι επιταχυντές αυτοί δεν είναι απαλλαγμένοι από αλκάλια, που σημαίνει ότι περιέχουν υψηλές ποσότητες ιόντων αλκαλίων και είναι βασικά υγρά που έχουν πολύ υψηλή τιμή του pH, μεγαλύτερη του 12 (Πίνακας 3-3). Υπάρχουν δύο τύποι αργιλικών επιταχυντών, οι Νατρίου και Καλίου. Οι Καλίου αναπτύσσουν ταχύτερα την αντοχή. Οι χημικές αντιδράσεις στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατά τη χρήση αυτών των επιταχυντών διαφέρουν από αυτές των ελεύθερων από αλκάλια. Επίσης, λόγω της υψηλής καυστικότητας (βάσεις με υψηλό pH) υπάρχει ο κίνδυνος εγκαυμάτων από την επαφή με τους ανθρώπινους ιστούς, όπως τα μάτια και βλάβης από την εισπνοή στους πνεύμονες. Η χρήση τους επομένως απαιτεί ειδικά μέτρα ασφαλείας, όπως πολύ καλό εξοπλισμό, και πολύ καλή θωράκιση της κεφαλής των χειριστών. Οι επιταχυντές αυτοί επιτυγχάνουν συνήθως καλή πρώιμη ανάπτυξη της αντοχής. Όμως, η τελική αντοχή μειώνεται δραστικά, >20-30%, και το σκυρόδεμα εκπλύνεται εύκολα από τη διείσδυση νερού, και τα υλικά της έπλυσης φράζουν τα συστήματα αποστράγγισης. Επίσης, λόγω της εισαγωγής από τον επιταχυντή μεγάλης ποσότητας ιόντων αλκαλίων, διακυβεύεται η ανθεκτικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος λόγω της

ενίσχυσης του κινδύνου αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης. Δεν είναι συμβατοί με πολλούς τύπου τσιμέντου, ειδικά οι νατρίου.

Οι Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης (2009) αναφέρουν ότι παρατήρησαν σημαντική επίδραση του τύπου του επιταχυντή και της διαδικασίας εκτόξευσης. Συγκεκριμένα σε ένα σύνολο κατασκευαζόμενων σπράγγων, η αντοχή 28 ημερών κύβων ακμής 15 cm, πριν την προσθήκη του επιταχυντή ήταν ~55 MPa. Με την προσθήκη αργιλικού επιταχυντή η αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων, ληφθέντων από συντηρημένα πανέλα, έπεσε στα ~37 MPa για χρήση καλιούχου και στα ~32 MPa για χρήση νατριούχου. Όταν χρησιμοποιήθηκε επιταχυντής ελεύθερος αλκαλίων, υπήρξε μόνον μικρή πτώση της αντοχής, σε 48 ± 5 MPa.

3.3.2.1.3 Σύγκριση

Εάν χρησιμοποιείται αυξημένη δόση αλκαλικού επιταχυντή (>6%) η πτώση της αντοχής μπορεί να ξεπεράσει το 50% και αυτό θα οδηγήσει σε αρχική σύνθεση με υψηλό ποσοστό τσιμέντου και άρα υψηλό κόστος. Αντίθετα, η χρήση μη αλκαλικών επιταχυντών δεν επιφέρει μείωση αντοχών. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η πρώιμη αντοχή στις 24 ώρες, για το ίδιο μίγμα με αλκαλικό νατριούχο επιταχυντή φτάνει τα ~12 MPa και με μη αλκαλικό τα ~20 MPa (Πίνακας 3-4). Ο καλιούχος αργιλικός επιταχυντής δίνει μεγαλύτερες αντοχές από το νατριούχο, αλλά είναι πιο ακριβός. Το πλεονέκτημα των αλκαλικών επιταχυντών, οι οποίοι στην Ευρώπη έχουν καταργηθεί, είναι ο πολύ χαμηλός χρόνος πήξης που προσφέρουν, και η δυνατότητα στο χειριστή να εφαρμόζει μεγάλα πάχη στρώσεων χωρίς κόπο με ένα πέρασμα (Μιχαηλίδης, 2015). Για το ίδιο πάχος στρώσης, αν χρησιμοποιηθεί μη αλκαλικός επιταχυντής χρειάζονται τρία ή και τέσσερα περάσματα. Όμως, όταν η κάθιση είναι της τάξης των 15cm αυξάνεται το πάχος της στρώσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα πέρασμα (Μιχαηλίδης, 2015).

Πίνακας 3-4. Ανάπτυξη της αντοχής (Μιχαηλίδης, 2015).

Σκυρόδεμα με κάθιση πάνω από 20cm	Αντοχή σε MPa		
	24 ώρες	7 ημέρες	28 ημέρες
Αναφοράς (κύβοι 150×150×150)	-	47±3	54±4
Με αλκαλικό νατριούχο επιταχυντή	12±2	-	23±4
Με επιταχυντή ελεύθερο αλκαλίων	20±3		45±5

3.3.2.2 Λιπαντικά άντλησης

Η αξιολόγηση της αντλησιμότητας του σκυροδέματος βασίζεται ουσιαστικά στις ιδιότητες μαλακότητας και ρευστότητάς του. Η μαλακότητα προσδιορίζει το ιξώδες του νωπού σκυροδέματος. Όσο μαλακότερο το σκυρόδεμα, τόσο πιο εύκολα και πληρέστερα μπορεί να κατανεμηθεί στο μετασχηματιστή ροής στο ακροφύσιο και με περισσότερη ομοιογένεια και συνεπώς πιο αποτελεσματικά μπορεί να εγχυθεί και διασπαρεί σε αυτό ο επιταχυντής. Η ρευστότητα επηρεάζει επίσης τη δυνατότητα πλήρωσης για μεταφορά σε βαρέλες, και για το βαθμό πλήρωσης στους κυλίνδρους της αντλίας σκυροδέματος κατά τη φάση εισαγωγής και, συνεπώς, την αποτελεσματικότητα άντλησης. Χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο ψεκασμού πυκνής υγρής ροής, όπου αυξάνει επίσης τη λίπανση των σωλήνων και κατά συνέπεια βελτιώνει τη συνέχεια της ροής και μειώνει την ενέργεια και την απαιτούμενη πίεση.

3.3.2.3 Πρόσμικτα επιβράδυνσης της πήξης του σκυροδέματος αναφοράς

Προκειμένου να υπάρχει υλικό για άμεση εκτόξευση, παράγονται μίγματα που διατηρούν την εργασιμότητά τους και πάνω από 24 ώρες, ώστε κατά τη διάρκεια των εκσκαφών να υπάρχει άμεσα διαθέσιμο υλικό για την άμεση σταθεροποίηση των επιφανειών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση αναστολέων ενυδάτωσης που επιτρέπουν την επέκταση της διάρκειας ζωής του νωπού σκυροδέματος (Vandewalle, 2005). Το χημικό σύστημα αποτελείται από δύο πρόσμικτα, έναν αναστολέα ενυδάτωσης (σταθεροποιητή-stabiliser) που δύναται να δρα και ως ρευστοποιητής, και έναν επιταχυντή (ενεργοποιητή- activator). Ο πρώτος, εισαγόμενος στο μίγμα σκυροδέματος κατά τον χρόνο ανάμειξης παρεμποδίζει την ενυδάτωση του τσιμέντου, με τη διάρκεια να εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη δόση. Ο δεύτερος, με την ανάμειξή του με το σκυρόδεμα στο ακροφύσιο διασπά την επίστρωση του πρώτου, και στη συνέχεια δρα στο τσιμέντο όπως ένα συμβατικός επιταχυντής.

3.3.2.4 Μειωτές νερού

Προκειμένου να παραχθεί ισχυρό εκτοξευμένο σκυρόδεμα, ο λόγος νερού προς τσιμέντο πρέπει να είναι μικρότερος από 0.50. Τούτο έχει ως συνέπεια τη δημιουργία μη εργάσιμου σκυροδέματος. Γι' αυτό, στα υγρά μείγματα χρησιμοποιούνται μειωτές νερού που επιτρέπουν την παρασκευή εργάσιμου και αντλήσιμου νωπού

σκυροδέματος με χαμηλό λόγο N/T, σταθερή συνεκτικότητα για τον εργάσιμο χρόνο, και χαμηλό ιξώδες για αντλησιμότητα και ομοιογενή μίξη του επιταχυντή στο σκυρόδεμα κατά τη ροή εντός του μετασχηματιστή του ακροφυσίου. Μια κάθιση 16-18cm είναι ιδανική για εκτόξευση με το χέρι και μια 13-15cm για εκτόξευση με ρομπότ, ενώ μια πολύ μεγαλύτερη κάθιση 20-25cm, που αντιστοιχεί σε μία εξάπλωση 550-650mm, απαιτεί πολύ μεγάλες καταναλώσεις επιταχυντή (Μιχαηλίδης, 2015).

Οι μειωτές νερού, οι επιταχυντές και οποιαδήποτε άλλα πρόσμικτα του σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι συμβατά. Επομένως, οι συνδυασμοί θα πρέπει να είναι ελεγμένοι και εγκεκριμένοι από τον παρασκευαστή των πρόσμικτων και τον παραγωγό σκυροδέματος. Ο τυχαίος συνδυασμός των διαφόρων προϊόντων μπορεί να μη δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι μειωτές νερού διαφοροποιούνται ανάλογα με τη δυνατότητά τους για μείωση του νερού, και την καταλληλότητά τους.

Οι (απλοί) μειωτές νερού (lignosulphonates) έχουν ικανότητα μείωσης περιορισμένη σε $5\div 10\%$, η οποία σε συνδυασμό με τη χημική τους σύσταση τους καθιστά ακατάλληλους για χρήση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Οι υπερρευστοποιητές είναι μειωτές νερού υψηλής δράσης, που διαφέρουν χημικά από τους κοινούς μειωτές νερού. Διακρίνονται σε δύο τύπους: οι Ναφθαλίνης (SNF) ή Μελαμίνης (SMF), χαρακτηρίζονται από καλή δυνατότητα μείωσης νερού από $5\div 25\%$ και εξαιρετική συμβατότητα με επιταχυντές εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Εντούτοις, οι επιλογές επέκτασης του χρόνου εργασιμότητας και μέγιστης μείωσης νερού είναι κάπως περιορισμένες. Μετά από 30 έως 90 λεπτά η εργασιμότητα επιστρέφει στη συνήθη (Neville & Brooks (1993).

Η νέα γενιά των Πολυκαρβοξυλικών (PCE) χαρακτηρίζεται από βέλτιστη επίδοση μείωσης νερού από $10\div 40\%$ και μεγάλη επέκταση του χρόνου εργασιμότητας. Η διάδραση όμως μεταξύ αυτού του τύπου υψηλού εύρους μειωτή νερού και των επιταχυντών εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι πιο πολύπλοκη και συνεπώς τα προϊόντα αυτά πρέπει να ταιριάζουν.

3.3.2.5 Πολυμερή γαλακτώματα

Πολυμερή γαλακτώματα προστίθενται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ξηρής μίξης για να προσδώσουν σε αυτό ειδικά απαιτούμενες ιδιότητες όπως βελτίωση της πρόσφυσης, μείωση της περατότητας, αντίσταση στη δράση των χλωριδίων, αύξηση της ανθεκτικότητας σε συνθήκες παγετού και τήξης, αντίσταση στην κρούση, προστασία του χάλυβα και βελτίωση της αντοχής.

3.3.2.6 Αερακτικά

Στην περίπτωση που το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα εκτίθεται σε εναλλασσόμενες συνθήκες παγετού και τήξης, χρησιμοποιούνται αερακτικά. Η χρήση τους και η εισαγωγή αέρα 5-7% στο μείγμα δημιουργεί μεγάλη ευκολία στην εκτόξευση και στη διάσπρωση.

3.3.2.7 Οπλισμός

Όπως το συμβατικό σκυρόδεμα, έτσι και το εκτοξευόμενο είναι ένα ψαθυρό υλικό με περιορισμένη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη, αλλά σημαντική αντοχή σε θλίψη. Εντούτοις, η καταπόνησή του ως υλικό επένδυσης σηράγγων, είναι κατά βάση θλιπτική. Ανάλογα με τις συνθήκες καταπόνησής του δύναται να είναι άοπλο, ή να οπλίζεται προκειμένου να αναλαμβάνονται τυχόν εφελκυστικές τάσεις. Ο συμβατικός του οπλισμός πραγματοποιείται συνήθως με την τοποθέτηση δομικού πλέγματος (ΤΠ 1501-12-03-08-00, ΕΛΟΤ) σε μία ή δύο στρώσεις. Περαιτέρω ενίσχυσή του δύναται να επιτευχθεί με τον εγκιβωτισμό δικτυωτών πλαισίων ή και την τοποθέτηση ολόσωμων. Η ελάχιστη επικάλυψη αυτών θα είναι 15mm από την επιφάνεια του βράχου και 25 mm από την επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Επίσης, δεν θα μένουν κενά πίσω από τον οπλισμό. Εντούτοις, η εγκατάστασή τους είναι δύσκολη και χρονοβόρα εργασία, και συχνά σε συνθήκες που εξακολουθούν να είναι επικίνδυνες. Επίσης, οι ράβδοι οπλισμού δεν προσαρμόζονται στον ευέλικτο σχεδιασμό του πάχους της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Αντί του δομικού πλέγματος, εφόσον στατικά είναι αποδεκτό, προτιμάται για τον οπλισμό του η χρήση ινών, από χάλυβα ή άλλο υλικό, μήκους 3 έως 5 cm, η οποία ξεπερνάει τις παραπάνω δυσκολίες. Νέοι και πιο αποτελεσματικοί τύποι ινών έχουν αναπτυχθεί, και είναι διαθέσιμοι. Η χρήση των ινών συμμορφώνεται με τα Προσαρτήματα Α και Β του προτύπου ΕΛΟΤ EN 14487-1. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες πλεονεκτεί έναντι του δομικού πλέγματος, στην τοποθέτηση, με συνέπεια τη μείωση του χρόνου και του κόστους, και στην ασφάλεια. Η ελάχιστη περιεκτικότητα σε χαλύβδινες ίνες είναι 30 kg/m^3 (ΕΛΟΤ ΤΟ 1501-12-03-02-0: 2009) ή 40 kg/m^3 (ΟΜΟΕ, 2002). Το μήκος των ινών δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.7 της εσωτερικής

διαμέτρου του σωλήνα εκτόξευσης. Η ανάμειξη ινών στο σκυρόδεμα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία «σβώλων», που συνήθως απαιτεί ειδικό εξοπλισμό.

3.4 Μέθοδοι μίξης

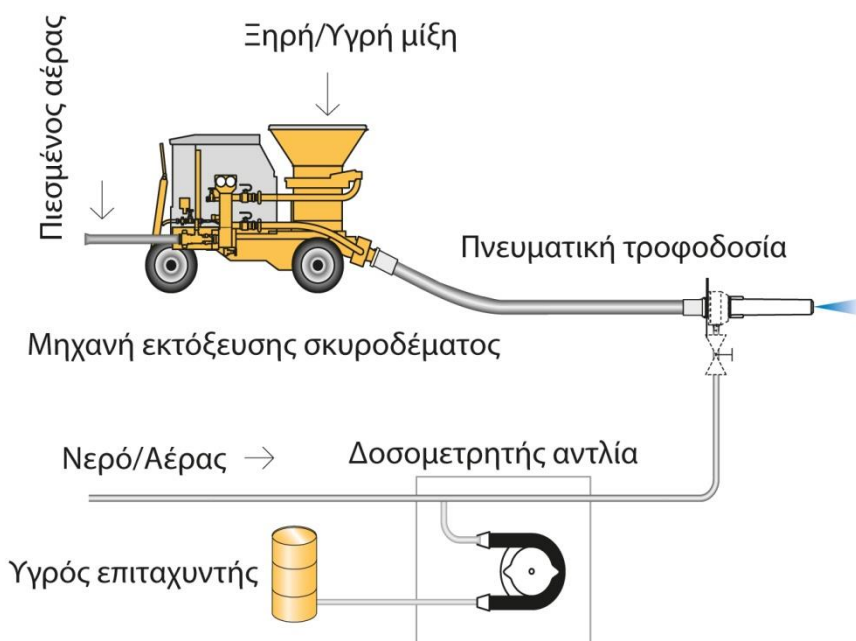
Η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πραγματοποιείται με την τεχνική του ξηρού ή του υγρού μίγματος.

3.4.1 Ξηρή μέθοδος

Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι τα ξηρά υλικά έρχονται ξέχωρα από τα υγρά στο ακροφύσιο, από όπου εκτοξεύονται. Το ξηρό μείγμα ύφυγων αδρανών και τσιμέντου-προσμίκτων/προσθέτων φορτώνεται στη χοάνη του μηχανήματος εκτόξευσης. Η υγρασία των αδρανών πρέπει να είναι 2÷5%. Εφόσον είναι ξηρότερα δημιουργείται σκόνη, ενώ αντίθετα αν είναι υγρότερα υπάρχει ο κίνδυνος πρόωρης πήξης και βουλώματος των σωλήνων. Επιταχυντές προσφέρονται σε μορφή σκόνης ή υγρή. Οι ξηροί συμπεριλαμβάνονται σε έτοιμα μίγματα μέσα σε σάκους, που κοστίζουν. Σήμερα υπάρχουν επιταχυντές ελεύθεροι αλκαλίων σε ξηρή μορφή οι οποίοι αν αναμιχθούν με κοινό τσιμέντο του προσδίδουν ιδιότητες ταχείας πήξης. Η ακριβής δόση εξασφαλίζεται από επιταχυντές σε υγρή μορφή, και ιδιαίτερα όταν η προσθήκη τους στο ακροφύσιο γίνεται ξέχωρα από το νερό. Η σκόνη που δημιουργείται όταν χρησιμοποιούνται υγροί επιταχυντές δεν περιέχει καυστικά συστατικά σε αντίθεση με όταν χρησιμοποιούνται ξηροί επιταχυντές. Επίσης, λόγω του καλύτερου έλεγχου της μείξης των υγρών επιταχυντών, επιτυγχάνονται καλύτερες τιμές τελικής αντοχής (απώλεια <25%).

3.4.1.1 Μεταφορά στο ακροφύσιο

Με τη βοήθεια πιεσμένου αέρα το μείγμα προωθείται σε αραιή ροή μέσω σωλήνωσης με μεγάλη ταχύτητα στο ακροφύσιο. Από διαφορετικούς σωλήνες έρχονται στο ακροφύσιο το νερό με τα τυχόν υγρά πρόσμικτα/πρόσθετα και ο πιεσμένος αέρας. Η μείξη γίνεται στο ακροφύσιο αμέσως πριν την εκτόξευση. Ο επιταχυντής, εφόσον είναι ξηρός προστίθεται στο ξηρό μείγμα, ενώ, εφόσον είναι υγρός, προστίθεται στο νερό (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-3. Διαδικασία αραιής ροής ξηρού (ή υγρού) εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE)

Οι επιταχυντές μπορούν να αντικατασταθούν από ειδικά τσιμέντα που πήζουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα μετά την διαβροχή με νερό. Είναι δυνατή επίσης η χρήση εργοστασιακού με ακρίβεια ζυγισμένου και αναμειγμένου ξηρού μίγματος. Οι ξηροί σάκοι ως υλικό κοστίζουν ακριβότερα, όμως η χρήση

τους απαιτεί λιγότερο ανθρώπινο δυναμικό και προσφέρει ευκολία, μεγαλύτερη παραγωγικότητα και ομοιομορφία ποιότητας. Ο Πίνακας 3-5 δίνει τυπική σύνθεση για ποιότητα C30/37. Παρατηρούμε την αύξηση της αναλογίας τσιμέντου στο τελικό μείγμα, λόγω της αναπήδησης των αδρανών.

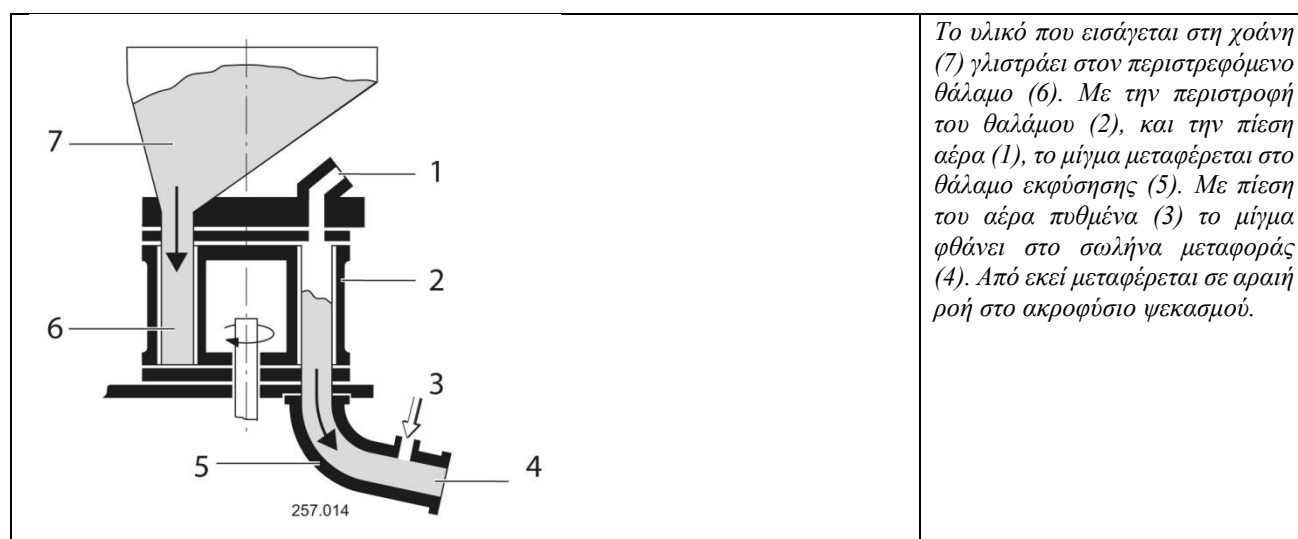
Πίνακας 3-5. Σύνθεση 1m^3 ξηρού μίγματος. C30/37, CEM I 42.5, 350kg/1000l αδρανών (Sika®, 2007)

		kg/l	kg	l
1	Τσιμέντο	3.15	280	89
2	Πυριτιακή παιπάλη	2.22	20	9
3	0-4mm αδρανή 4% υγρασία	2.70	680	252
4	4-8mm αδρανή 2% υγρασία	2.70	560	207
	Ξηρό μίγμα		1540	557
5	Σταθεροποιητής 0.2-2%			
6	Επιταχυντής μη αλκαλικός 3-6%			
	Αναπήδηση 16-20%			580-610
	Περιεκτικότητα σε τσιμέντο στον τοίχο		450kg/m ³	

3.4.1.2 Εξοπλισμός

Οι μηχανές ψεκασμού λεπτής ροής είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες της πυκνής ροής. Διακρίνονται σε διπλού θαλάμου πίεσης και σε περιστροφικές. Στις διπλού θαλάμου το ξηρό μείγμα έρχεται στον άνω θάλαμο και κατόπιν με την πίεση και την βαρύτητα οδηγείται στον κάτω θάλαμο όταν η βαλβίδα του αέρα είναι ανοικτή. Από τον κάτω θάλαμο μετρημένες ποσότητες στέλνονται συνεχώς στη σωλήνα παροχής. Στις περιστροφικές (Σχήμα 3-4) η χοάνη της μηχανής τροφοδοτείται με ξηρό μείγμα από όπου αυτό πέφτει σε μία σειρά από εννέα ή και περισσότερες οπές που βρίσκονται μέσα σε ένα περιστρεφόμενο κύλινδρο ή μία λεκάνη. Η δόση κάθε οπής ενεργοποιείται με την πίεση αέρα που την ωθεί στον σωλήνα παροχής.

Η μηχανή θα πρέπει να εξασφαλίζει την ομαλή μόνιμη ροή του μίγματος στο σωλήνα και στο ακροφύσιο. Η απόδοση των μηχανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο ακροφύσιο είναι από 5 έως 8 m³/h. Η μεγαλύτερη απόσταση παροχής εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής και για τις καλύτερες από αυτές μπορεί να υπερβεί τα 270m οριζόντια ή τα 90m κατακόρυφα, στις πολύ μεγάλες μάλιστα αποστάσεις οι κοινές σωλήνες παροχής μπορεί να αντικατασταθούν από χαλύβδινες, ώστε να μειωθούν οι τριβές στα τοιχώματα.



Σχήμα 3-4. Λειτουργία μηχανής περιστροφικού τύπου (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE).

3.4.1.3 Εκτόξευση στο τοίχωμα

Ο ακριβής έλεγχος του νερού από τον χειριστή αποσκοπεί στην αποφυγή είτε της δημιουργίας υπερβολικής σκόνης είτε της ροής στην επιφάνεια. Η τελική ανάμειξη των αδρανών με το νερό επέρχεται στο τοίχωμα, και γι' αυτό θα πρέπει να γίνονται κυκλικές κινήσεις του ακροφυσίου κατά την εκτόξευση. Το σκυρόδεμα εκτοξεύεται από το ακροφύσιο με μεγάλη ταχύτητα στην επιφάνεια και η δύναμη κρούσης συμυκνώνει το υλικό. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ίνες οπλισμού του σκυροδέματος, τότε έχει παρατηρηθεί αύξηση της φθοράς του εξοπλισμού.

Για την ικανοποιητική διαδικασία της εκτόξευσης απαιτείται ένας ικανός αεροσυμπιεστής που θα παρέχει καθαρό, ξηρό, χωρίς λάδια αέρα, ικανό να διατηρεί τις απαιτούμενες ταχύτητες στο ακροφύσιο. Οι απαιτήσεις διαφέρουν με τον εξοπλισμό, την κατάσταση του και τον τρόπο της λειτουργίας του. Η παροχή των αεροσυμπιεστών με πίεση 700 kPa κυμαίνεται από 10 m³/h για εσωτερικές διαμέτρους σωλήνων 25 mm έως 28 m³/h για εσωτερικές διαμέτρους σωλήνων 64 mm. Οι παροχές αυτές θα πρέπει να μειωθούν ανάλογα με την παλαιότητα, το υψόμετρο και τις απώλειες στις σωληνώσεις και στη μηχανή. Επιπλέον το μήκος του σωλήνα, το φαινόμενο βάρος του υλικού, οι κάμψεις και συνδέσεις των σωλήνων, και το ύψος του ακροφυσίου σχετικά με τη μηχανή, επηρεάζουν τις απαιτήσεις του εξοπλισμού σε αέρα. Ως γενικός κανόνας λαμβάνεται ότι η πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τα 175 kPa, για χρήση σωλήνων μικρότερων από τα 30 m, και ότι η πίεση πρέπει να μεγαλώνει κατά 35 kPa ανά 15 m επιπλέον σωλήνα και άλλα 35 kPa ανά 8 m διαφοράς υψομέτρου του ακροφυσίου άνω της μηχανής. Γενικά η πίεση στην εισαγωγή μίας περιστροφικής μηχανής πρέπει να είναι 380 kPa η οποία θα πρέπει να αυξάνεται κατά 2.3kPa ανά μέτρο σωλήνα πάνω από τα 30 μέτρα. Η πίεση του νερού πρέπει να διατηρείται 70 έως 100 kPa πάνω από την πίεση εισαγωγής του αέρα, ώστε να υπάρχει επαρκής διαβροχή στο ακροφύσιο. Κατά την ξηρή εκτόξευση ο χειριστής αντιμετωπίζει πολύ σκόνη ψεκασμού και σημαντική αναπήδηση.

3.4.1.4 Δυνατότητες και εφαρμογές

Στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού και η ευελιξία. Αντίθετα, στα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται: το κόστος φθοράς των μηχανών, η δημιουργία σκόνης, που αντιμετωπίζεται εν μέρει με την ύγρανση των αδρανών ή τη χρήση δεσμευτών σκόνης ή την αύξηση της πίεσης του νερού στο ακροφύσιο, η αυξημένη αναπήδηση που δύναται να φτάσει και το 50% στη στέψη, η μικρή παροχή που ακόμη και για τις πλέον σύγχρονες μηχανές δεν ξεπερνά τα 8-10m³/h, η εφαρμογή γενικά χωρίς ίνες ή μικροπυριτία ή μεγάλη εκμηχάνιση. Κύριες εφαρμογές της είναι σε έργα όπου απαιτούνται μικροί όγκοι εκτοξευμένου σκυροδέματος, υψηλές απαιτήσεις ευελιξίας (π.χ. επισκευές) ή μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς.

3.4.2 Υγρή μέθοδος

Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι το νωπό σκυρόδεμα φτάνει ξέχωρα από τον επιταχυντή στο ακροφύσιο από όπου εκτοξεύεται. Το υγρό μείγμα μετρημένων ποσοτήτων αδρανών, τσιμέντου, προσθέτων, προσμίκτων και νερού τροφοδοτεί τη χοάνη του εξοπλισμού μεταφοράς.

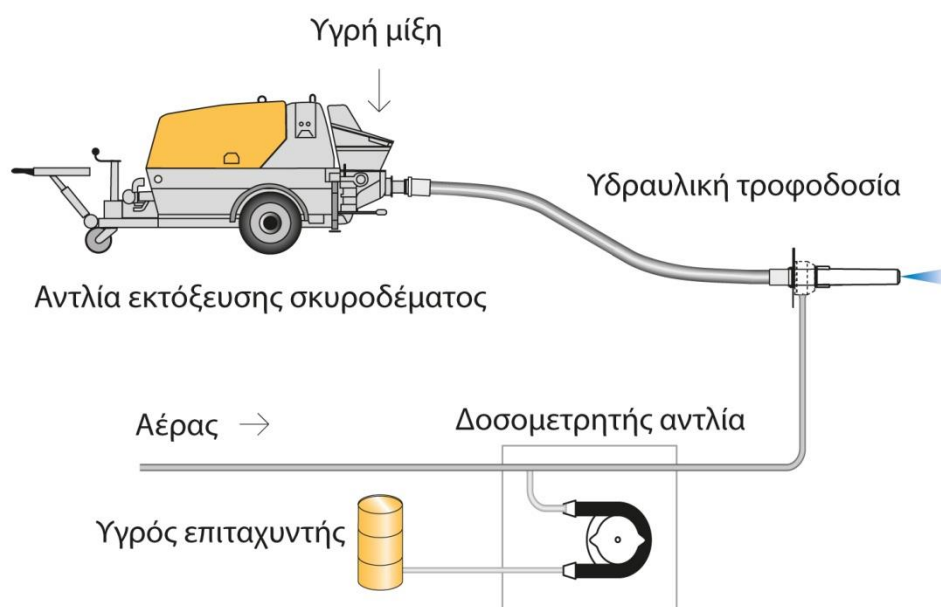
3.4.2.1 Μεταφορά στο ακροφύσιο

Το νωπό σκυρόδεμα έρχεται στη μηχανή εκτόξευσης είτε ως έτοιμο (Σχήμα 3-5) είτε ως εργοταξιακό. Στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω σωλήνων στο άκρο τους όπου βρίσκεται το ακροφύσιο. Από διαφορετικούς σωλήνες έρχονται στο ακροφύσιο το επιταχυντικό πρόσμικτο και ο πιεσμένος αέρας. Εκεί, το υγρό σκυρόδεμα αναμιγνύεται με αέρα και επιταχυντή, και ψεκάζεται. Η εφαρμογή πραγματοποιείται με πυκνή ροή. Η μέθοδος αραιής ροής, όπου το υγρό μείγμα βάσης αντλείται μέσω ενός ρότορα, όπως και στην ξηρή μέθοδο (Σχήμα 3-3), με ώθηση πιεσμένου αέρα, γενικά δεν εφαρμόζεται.

Κατά τη μέθοδο πυκνής ροής (Σχήμα 3-6), το επαρκώς υγρό σκυρόδεμα αντλείται έως το ακροφύσιο με αντλία σκυροδέματος, και μετά διασπείρεται με πιεσμένο αέρα σε έναν μετασχηματιστή όπου η ροή του μετατρέπεται σε αραιή. Η κύρια διαφορά από το συμβατικό αντλούμενο σκυρόδεμα έγκειται στην απαίτηση για όσο το δυνατόν λιγότερους παλμούς κατά την διάρκεια μεταφοράς ώστε ο ψεκασμός από το ακροφύσιο να είναι σταθερός. Ο πιεσμένος αέρας, μέσω ενός αεροσυμπιεστή, τροφοδοτείται σε ξεχωριστές σωλήνες προς το ακροφύσιο. Το επιταχυντικό πρόσμικτο προστίθεται από τη μετρητική μονάδα, στον πιεσμένο αέρα λίγο πριν το μετασχηματιστή, ώστε η συγκέντρωσή του να είναι ομοιόμορφη στο σκυρόδεμα. Η δοσολογία είναι συγχρονισμένη με την ποσότητα του σκυροδέματος, έτσι ώστε να προστίθεται πάντα η προκαθορισμένη ποσότητα του επιταχυντή.



Σχήμα 3-5. Τροφοδότηση χοάνης της αντλίας (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009).



Σχήμα 3-6. Διαδικασία εκτόξευσης πυκνής ροής σκυροδέματος υγρής μίξης (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE).

Η μέθοδος πυκνής ροής είναι η σύγχρονη υψηλής απόδοσης διαδικασία, που χρησιμοποιείται πάντα όταν προδιαγράφεται σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας και απόδοσης. Η εφαρμογή της στα έργα επιτρέπει: (α) μεγάλη παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μέχρι $25 \text{ m}^3/\text{h}$ σε ορισμένες περιπτώσεις, (β) βελτιωμένες συνθήκες εργασίας στην περιοχή ψεκασμού, λόγω της μικρότερης παραγωγής σκόνης, (γ) υψηλή ποιότητα και

ανθεκτικότητα λόγω της ελεγχόμενης σταθερής ποσότητας του νερού ανάμειξης, (δ) μειωμένη αναπήδηση στο μισό έως τέταρτο, (ε) μειωμένο κόστος φθοράς στον εξοπλισμό ψεκασμού, (ς) χαμηλή κατανάλωση αέρα κατά τη διάρκεια του ψεκασμού. Η διαδικασία πυκνής ροής απαιτεί περισσότερη εργασία στην αρχή (εκκίνηση) και στο τέλος (καθάρισμα) του ψεκασμού σε σχέση με την ξηρή διαδικασία. Επίσης, με την εφαρμογή αναστολέα ενυδάτωσης ο χρόνος εργασίας επεκτείνεται έτσι ώστε να μην είναι προκαθορισμένος κατά την παραγωγή και το σκυρόδεμα να πρέπει να εφαρμόζεται εντός αυτού του χρόνου άλλως να απορρίπτεται, όπως συνέβαινε παλαιότερα.

Πίνακας 3-6. Βέλτιστες παράμετροι πυκνής ροής νωπού εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Εργασιμότητα για πάνω από 2 ώρες	Θερμοκρασία	Περιεκτικότητα σε αέρα	Πρώιμη αντοχή
< 200mm κάθιση	20 °C	3÷8%	J2

Ο σχεδιασμός του μείγματος εξαρτάται από: (α) τις απαιτήσεις των προδιαγραφών αντοχής και ανθεκτικότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος, και της πολύ πρώιμης και της πρώιμης ανάπτυξης της αντοχής του εκτοξευμένου σκυροδέματος, (β) την απαιτούμενη εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος, (γ) το διαθέσιμο εξοπλισμό παραγωγής, και (δ) το κόστος του. Ο Πίνακας 3-6 δίνει τις βέλτιστες παραμέτρους για το νωπό και πρώιμο σκυρόδεμα. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών των παραμέτρων επιλέγονται ο τύπος και η περιεκτικότητα τσιμέντου, ο τύπος και η διαβάθμιση αδρανών, η περιεκτικότητα σε νερό, και το είδος και η ποσότητα των προσθέτων-προσμίκτων. Η καταλληλότητα του μίγματος επιβεβαιώνεται με δοκιμές. Η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών εξαρτάται από τα διαθέσιμα τοπικά υλικά, καθώς και η μεταφορά των μεγάλων ποσοτήτων τους είναι αντισυμβατική. Για τις ίδιες προδιαγραφές εκτοξευμένου σκυροδέματος και οι δύο διαδικασίες, πυκνής και αραιής ροής, απαιτούν το ίδιο μίγμα, σε κοκκομετρία, N/T, πρόσμικτα-πρόσθετα, περιεκτικότητα και τύπο τσιμέντου. Ο Πίνακας 3-7 δίνει μια σύνθεση μίγματος πριν την εκτόξευσή του.

Πίνακας 3-7. Σύνθεση 1m³ μίγματος πριν την εισαγωγή των προσμίκτων

Μίγμα 1m ³	Συνήθεις ποσότητες	Λόγος	kg	kg/l	l
			2310	2.310	1000
Τσιμέντο CEM I 42.5	350÷450		400	3.15	127
Νερό	0.45÷0.50	0.48	192	1.00	192
Αέρας	4%	4%	0	0.00	40
Αδρανή		100%	1718	2.68	641
Άμμος 0÷4mm	60%	60%	1031	2.68	385
Χαλίκι 4÷8mm	40%	40%	687	2.68	256
Παιπάλη <0.125mm	4÷9%				
Νερό (N/T 0.45÷0.50)					192
Υγρασία άμμου		4%	1031	1.00	41
Υγρασία χαλικιών		2%	687	1.00	14
Προστιθέμενο νερό					137
Πρόσμικτο Υπερρευστοποιητής	0.8÷1.2	1%	4	1.10	4
Επιταχυντής	5÷8% AF	6%	24	1.40	17

Ο Πίνακας 3-8 δίνει τη σύνθεση του σκυροδέματος μετά την εκτόξευση ως επένδυση στον τοίχο, η οποία έχει ποσοτικά μεταβληθεί λόγω της αναπήδησης και της συμπίκνωσης.

3.4.2.2 Εξοπλισμός

Για την αραιή ροή, δύναται να χρησιμοποιηθεί μία περιστροφική μηχανή όπως αυτή στο Σχήμα 3-4. Για την πυκνή ροή υγρού μείγματος ψεκασμού σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα με αμφίδρομες αντλίες. Αντίθετα με τις συμβατικές αντλίες σκυροδέματος, τα συστήματα αυτά πρέπει να πληρούν την πρόσθετη απαίτηση ροής μιας όσο το δυνατό πιο σταθερής και συνεχούς παροχής, ώστε να εξασφαλίζεται ο ομοιογενής ψεκασμός. Οι αντλίες σκυροδέματος λειτουργούν υδραυλικά με κινητήρες ηλεκτρικούς ή ντίζελ. Τα έμβολα παροχής συνδέονται υδραυλικά μέσω κυλίνδρων καθοδήγησης. Λειτουργούν με ώση-έλξη. Το έμβολο αντιστροφής δημιουργεί ένα κενό το οποίο γεμίζει με υλικό που εισρέει στον κύλινδρο. Συγχρόνως, το προς τα εμπρός κινούμενο έμβολο ωθεί το υλικό του κυλίνδρου (σκυρόδεμα) στο σωλήνα παροχής. Στο τέλος

της ώσης τα έμβολο αντιστρέφει κίνηση. Ο διακόπτης του σωλήνα μετατοπίζεται μπροστά από τον άλλο πλήρη σκυροδέματος κύλινδρο και τα έμβολα αντιστρέφουν την κατεύθυνση της κίνησής τους.

Πίνακας 3-8. Σύνθεση μίγματος στον τοίχο λόγω αναπήδησης και συμπύκνωσης (Höfler et al., 2011).

Μίγμα επί τόπου	Μεταβολή	kg	kg/l	l
		2119	2.362	897
Τσιμέντο	-4%×400	384	3.15	122
Νερό	-4%×192	184	1.00	184
Αέρας	-3%×1000	0	0.00	10
Αδρανή	-10%×641	1546	2.68	577
Πρόσμικτα				
Υπερρευστοποιητής		4	1.10	4
Επιταχυντής		24	1.40	17

3.4.2.3 Εκτόξευση στο τοίχωμα

Η υψηλή συμπύκνωση στο τοίχωμα δεν επιτυγχάνεται με τη μεγάλη ταχύτητα ψεκασμού, αλλά με την καλή διαβάθμιση και πλήρη ανάμειξη του σκυροδέματος που ψεκάζεται στην επιφάνεια σε μικρές σταγόνες, δίχως σκόνη και δημιουργώντας μία ομογενή επιφάνεια. Η πυκνή ροή του μείγματος απαιτεί παροχή αέρα στον δακτύλιο τουλάχιστον 3 m³/min.

Κατά την υγρή εκτόξευση το κράτημα της ιδιαίτερα βαριάς σωλήνας (Σχήμα 3-7α) που είναι γεμάτη με σκυρόδεμα δημιουργεί σημαντική φυσική καταπόνηση. Ο χειριστής της μηχανής ευθύνεται για την παροχή συνεχούς ροής μίγματος με σωστές αναλογίες στον χειριστή του ακροφυσίου, για την ασφαλή διάνοιξη που εξαρτάται από την ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Ο χειρωνακτικός έλεγχος του ακροφυσίου έχει εγκαταλειφθεί όπου η επιτυχία ενός συστήματος εκτόξευσης εξαρτάται σημαντικά από την ικανότητα παροχής σκυροδέματος υπό υψηλή πίεση για καλή συμπύκνωση. Η περαιτέρω απαίτηση για ταχύτερη κατασκευή με ποσότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάνω από 10 m³/h προώθησε περαιτέρω την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων και τηλεχειριζόμενων συστημάτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Σχήμα 3-7β) ([δείτε βίντεο](#)). Η ακολουθία των κινήσεων ψεκασμού μπορεί να προγραμματισθεί, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα χειρισμού από έξω από την επικίνδυνη περιοχή.



(α) Χειρωνακτική εκτόξευση



(β) Εκτόξευση με χρήση Robot

Σχήμα 3-7. Εκτόξευση σκυροδέματος (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

3.4.2.4 Δυνατότητες και εφαρμογές

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μεγάλη απόδοση, το περιβάλλον εργασίας, και η ποιότητα εφαρμογής. Η αναπήδηση είναι 5-10%, και η αιωρούμενη σκόνη είναι μειωμένη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ρομπότ και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, που βελτιώνουν την ασφάλεια της εργασίας. Επιτυγχάνονται παχύτερες στρώσεις σκυροδέματος με καλύτερη πρόσφυση και χρησιμοποιούνται νέα πρόσμικτα. Η ποιότητα είναι σταθερή, και με

τη χρήση υπερρευστοποιητών και μικροπυριτίας επιτυγχάνονται υψηλές τιμές τελικής αντοχής, έως και 100MPa. Τέλος, παρασκευάζεται όπως το κοινό σκυρόδεμα και μεταφέρεται σε σωλήνες με τη βοήθεια αντλιών και την προσθήκη αέρα 7-15m³/min με πίεση 7bar. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το σημαντικό κόστος του εξοπλισμού, η μεγαλύτερη απαίτηση ποιότητας αδρανών, ο περιορισμός στις διακοπές, και το κόστος καθαρισμού. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σήμερα κατά 100% στην Ιταλία και Σκανδιναβία.

3.4.3 Επιλογή της μεθόδου

Και οι δύο διαδικασίες είναι σύμφωνες με τις συνήθεις απαιτήσεις ποιότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Γενικά, η ξηρή μέθοδος τείνει να εφαρμόζεται περισσότερο στη μεταλλευτική (Hoek, et al. 1995), ενώ η υγρή μέθοδος τείνει να εφαρμόζεται στη τεχνικά έργα που απαιτούν μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος. Η ξηρή μέθοδος δίνει σκυρόδεμα με μικρότερες αντοχές, ανομοιομορφία ποιότητας, κακή κατανομή του νερού λόγω μικρής απόστασης-χρόνου ενυδάτωσης, και μεγαλύτερη αναπήδηση. Έχει σχεδόν εγκαταλειφθεί στα υπόγεια τεχνικά έργα, και το μοναδικό της πλεονέκτημα είναι η χρήση της σε περιοχές που υπάρχει ρέον ύδωρ, όπου μειώνοντας το προστιθέμενο νερό κατά την εκτόξευση δεσμεύεται το επιφανειακό νερό που ρέει. Μία υγρή διαδικασία έχει περιορισμένες δυνατότητες αντιμετώπισης του νερού. Σε έρευνα κατά την εκκίνηση του «Ολυμπιακό Μετρό» το 1999, αποδείχθηκε (Μιχαηλίδης, 2015) η επίτευξη: (α) χαμηλότερης αντοχής σε σχέση με την υγρή μέθοδο, (β) μεγάλης διακύμανσης των αντοχών, (γ) μεγαλύτερης αναπήδησης. Η επιλογή της μεθόδου πραγματοποιείται με κριτήρια κατασκευαστικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά. Ο κατάλληλος εξοπλισμός και η ορθή τεχνική εκτόξευσης έχουν πολύ μεγάλη σημασία στην εξασφάλιση της επιτόπου ποιότητας. Ο Πίνακας 3-9 δίνει τα βασικά κριτήρια επιλογής μεταξύ των δύο τεχνικών εκτόξευσης. Η επένδυση σε εξοπλισμό της μεθόδου υγρής μείξης είναι τουλάχιστον τριπλάσια της αντίστοιχης ξηρής. Εντούτοις ο κατασκευαστής που επιθυμεί γρήγορη πρόοδο των εργασιών προτιμά την υγρή μίξη, που έχει μικρή αναπήδηση, δύναται να προμηθευθεί μεγάλες ποσότητες υλικού από μονάδα παραγωγής σκυροδέματος, και να επιτυγχάνει παραγωγή έως και 20 m³/h ειδικά όταν χρησιμοποιούνται τηλεχειριζόμενες αυτοματοποιημένες μηχανές. Οι μηχανές υγρής μίξης γενικά δεν μπορούν να μεταφερθούν και χρησιμοποιηθούν σε προβληματικές περιοχές που απαιτείται γρήγορη επέμβαση.

Η ξηρή μέθοδος δημιουργεί σκόνη και η δυνατότητα παραγωγής είναι σημαντικά μικρότερη από την υγρή. Εντούτοις το ξηρό μίγμα μπορεί να διατηρηθεί για σχετικά μεγάλες περιόδους έως ότου χρειαστεί, για να εφαρμοσθεί αμέσως σε μέτριες ποσότητες σε περιοχές που απαιτείται. Η μη ορθή ποσότητα τροφοδοσίας του νερού κατά την ξηρή μίξη επιδρά αρνητικά στον βαθμό αναπήδησης και στην αντοχή. Ο λόγος N/T του ψεκαζόμενου σκυροδέματος από μηχανή ξηρής μίξης είναι πολύ χαμηλός.

Πίνακας 3-9. Βασικά κριτήρια επιλογής της τεχνικής ψεκασμού

Παράγων	Τεχνική	Ξηρή μίξη	Υγρή πυκνής ροής
Δημιουργία σκόνης		Σημαντική	Αμελητέα
Αναπήδηση		Σημαντική (15-50%)	Μικρή (<10%)
Παραγωγή		Μικρή προς μέτρια (3÷10 m ³ /h)	Υψηλή (>10m ³ /h)
Κόστος εξοπλισμού		Μικρό	Υψηλό
Επί τόπου εξοπλισμός		Σημαντικός	Μικρός
Έτοιμο σκυρόδεμα		Έτοιμο το ξηρό μίγμα	Ναι
Ομοιογένεια		Μέτρια	Υψηλή
Περιοχές με ροή νερού		Καταλληλότερο	Με δυσκολία εφαρμογής
Διατήρηση για περίοδο		Μεγάλη	Με χρήση σταθεροποιητή μέχρι 48 ώρες

Οι μηχανές υγρής μείξης πλεονεκτούν στα υπόγεια έργα όσον αφορά τη μειωμένη σκόνη, τη μικρότερη απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού, και του λιγότερου επιτόπου εξοπλισμού. Η αναπήδηση είναι μεγαλύτερη με την ξηρή μέθοδο παρά με την υγρή. Εντούτοις για σκυρόδεμα υγρής μίξης ακόμα και για μικρές πιέσεις, ένα αυτοματοποιημένο μηχάνημα είναι απαραίτητο, καθόσον το βάρος του υγρού σκυροδέματος στη σωλήνα το καθιστά πολύ βαρύ στο κράτημα. Ο χρόνος ξεπλύματος του εξοπλισμού υγρής μίξης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της ξηρής. Ο καθαρισμός θα πρέπει να γίνεται μετά από κάθε χρήση, πριν δε από κάθε διακοπή μεγάλης διάρκειας το πλύσιμο θα γίνεται σε ειδικές για το σκοπό περιοχές. Άρα ποσότητες τουλάχιστον 10 m³ θα πρέπει να ψεκάζονται σε μία φάση, ώστε να καθιστούν την υγρή μέθοδο αποτελεσματική.

3.5 Εκτέλεση της εργασίας

Η εκτέλεση εκτός από τα κατάλληλα υλικά απαιτεί να είναι καλά εκπαιδευμένος ο χειριστής του ακροφυσίου και ο εξοπλισμός να είναι ικανός και καλά συντηρημένος.

3.5.1 Προετοιμασία υλικών

Τα αδρανή υλικά του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ζυγίζονται με ακρίβεια πριν από την ανάμειξη. Στην περίπτωση ξηρής ανάμειξης, τα αδρανή αναμειγνύονται πλήρως, χωρίς την προσθήκη νερού, πριν την εναπόθεσή τους στον εξοπλισμό διάστρωσης. Το τσιμέντο προστίθεται όχι νωρίτερα της μίας ώρας από την ώρα διάστρωσης. Η προσθήκη των ινών συνήθως πρέπει να γίνεται στα παρασκευαστήρια. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, προστίθενται στο αυτοκίνητο μεταφοράς σκυροδέματος, αλλά αναμειγνύονται επί επαρκή χρόνο για την επίτευξη της απαραίτητης ομοιογένειας. Τα πρόσμεικτα, αφού μετρηθούν επακριβώς, προστίθενται στους κατάλληλους χρόνους πριν από τη διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Πριν την εισαγωγή του επιταχυντή, γίνεται:

- Λήψη δοκιμών για εξακρίβωση σωστής ποιότητας τροφοδοσίας (Σχήμα 3-8α). Λαμβάνονται κυβικά δοκίμια, ακμής 15cm (Μαρσέλλος, 2013), για τον έλεγχο σε θλίψη του νωπού σκυροδέματος.
- Έλεγχος εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος (Σχήμα 3-8β). Μετρείται με τον κώνο κάθισης, και είναι μεταξύ 12-20cm.



(α) Συμπύκνωση κυβικών δοκιμών σκυροδέματος ακμής 15cm
Σχήμα 3-8. Πριν την εισαγωγή του επιταχυντή (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)



(β) Μέτρηση εργασιμότητας

- Μέτρηση θερμοκρασίας νωπού σκυροδέματος (Σχήμα 3-9β).
- Εξασφάλιση της κατάλληλης θερμοκρασίας επιταχυντή (Σχήμα 3-9α). Μετράμε τη θερμοκρασία του επιταχυντή, η οποία, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο, θα πρέπει να διατηρείται μεταξύ 30 και 40 °C, προκειμένου να γίνεται η καλύτερη δυνατή κατανομή του επιταχυντή στη μάζα του σκυροδέματος.



(α) Μέτρηση στο σκυρόδεμα (β) Διάταξη θερμοστατών στη βάση του δοχείου του επιταχυντή
Σχήμα 3-9. Μετρήσεις θερμοκρασίας προ της εισόδου του επιταχυντή (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

- Εξασφάλιση της βέλτιστης δόσης επιταχυντή. Πριν από την έναρξη της διαδικασίας εκτόξευσης μετράμε τη στάθμη του επιταχυντή στο δοχείο του, ώστε μετά την εκτόξευση να υπολογίσουμε την ακριβή ποσότητα που καταναλώθηκε. Στη συνέχεια τοποθετούμε στην επιθυμητή ένδειξη τον δοσομετρητή του επιταχυντή στο μηχάνημα εκτόξευσης (Σχήμα 3-10).



(α) Μέτρηση διαστάσεων δοχείου επιταχυντή (β) Ένδειξη δοσομετρητή
Σχήμα 3-10. Επιταχυντικό πρόσμικτο (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

- Τοποθέτηση πανέλων για δειγματοληψία εκτοξευμένου σκυροδέματος (Σχήμα 3-11).

Κατά την εκτόξευση γεμίζονται τα πανέλα (Σχήμα 3-11) προκειμένου να ελεγχθούν μετά στο εργαστήριο, και συγχρόνως καταγράφεται η θέση και το όνομα του χειριστή. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει βασικά τα ίδια χαρακτηριστικά αντοχής με το κοινό σκυρόδεμα και οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής αποτελούν την πιο συνηθισμένη μέθοδο ποιοτικού ελέγχου.



Σχήμα 3-11. Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα ελέγχεται με τη λήψη τετάρων πάχους 15cm, ακμής εσωτερικής 60cm και εξωτερικής 80cm, τα οποία πρέπει να γεμίζουν με μία στρώση (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

3.5.2 Προετοιμασία επιφάνειας

Όταν εκτοξεύεται το σκυρόδεμα σε επιφάνειες που προκύπτουν από εκσκαφή, αυτές προετοιμάζονται με ένα ελάχιστο ξεσκάρωμα των χαλαρών υλικών. Οι επιφάνειες που αποκαλύπτονται καθαρίζονται τελείως με αέρα και νερό υπό πίεση για να αφαιρεθούν όλα τα ίχνη σκόνης, χαλαρών κομματιών, υλικών αναπήδησης, και οποιοδήποτε άλλο επιβλαβές υλικό. Όπου υπάρχουν διαρροές νερού από τον βράχο, πάνω στον οποίο διαστρώνεται το σκυρόδεμα, και η ροή του νερού δεν δύναται να σταματήσει μόνο με την εφαρμογή του σκυροδέματος με επιταχυντικό πρόσμικτο, το νερό απομακρύνεται από την περιοχή με έμφραξη της φλέβας ή εκτρέπεται με σωλήνες, συλλεκτήρες ή άλλα μέσα, έτσι ώστε το σκυρόδεμα να μείνει ανεπηρέαστο από την δράση του νερού λόγω διήθησης, υδροστατικής πίεσης ή διάβρωσης. Στη συνέχεια γεμίζονται οι υπερεκσκαφές και ψεκάζεται μια πρώτη σταθεροποιητική στρώση (Σχήμα 3-13β). Αυτό το λεπτό υλικό διεσδύει στους πόρους και ρωγμές και δημιουργεί τη βάση για την τοποθέτηση και συμπίκνωση της υπόλοιπης επένδυσης. Στην περίπτωση πολλαπλών στρώσεων (Σχήμα 3-13γ) πρέπει να εξασφαλίζεται η καλή συνάφεια μεταξύ τους, και γι' αυτό, πριν από κάθε ψεκασμό η επιφάνεια θα πρέπει να καθαρίζεται καλά από τη σκόνη, με ψεκασμό νερού και αέρα. Ο ψεκασμός του σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται πάντα επάνω σε υγραμένη επιφάνεια, χωρίς νερό να ρέει, ώστε να μην απορροφά η (ξηρή) επιφάνεια το νερό του σκυροδέματος, ούτε να αποκολλάται το σκυρόδεμα από τη ροή. Κατά τις επόμενες επιστρώσεις, όλες οι επιφάνειες πρέπει να είναι υγρές, καθαρές και απαλλαγμένες υλικών αναπήδησης. Εφόσον οι προς επίστρωση επιφάνειες έχουν ίχνη, συντριμμάτων, υλικών αναπήδησης, και οποιοδήποτε άλλου επιβλαβούς υλικού, καθαρίζονται τελείως με αέρα και νερό υπό πίεση.

3.5.3 Εξοπλισμός

Η μηχανή εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να διαθέτει επαρκή ικανότητα διάστρωσης, για την επίτευξη του ελάχιστου χρόνου καθυστέρησης στην εκσκαφή και στις άλλες εργασίες κατασκευής της σήραγγας. Ο εξοπλισμός πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε τα πρόσμικτα ταχείας σκλήρυνσης να αναμιγνύονται επαρκώς και αμέσως πριν από τη διάστρωση.

3.5.4 Διάστρωση

Η πρωταρχική λειτουργία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι η συγκράτηση των χαλαρών μόλις εμφανισθέντων και δονημένων λόγω των ανατινάξεων επιφανειών των πετρωμάτων. Γι' αυτό ο ψεκασμός πρέπει να εκτελείται άμεσα πλησίον του μετώπου και πάντα όχι αργότερα από 4 ώρες μετά από τη διάνοιξη ή την ανατίναξη και σε κάθε περίπτωση πριν από τη διάτρηση για τον επόμενο κύκλο εκσκαφής, ώστε να παρεμποδίζεται η χαλάρωση με την πρώτη πύξη του σκυροδέματος που θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει την επόμενη ανατίναξη μέσα σε δύο ώρες από το τέλος του ξεμπαζώματος.

Τυχόν υπάρχων οπλισμός, όπως πλαίσια, πλέγματα και ράβδοι οπλισμού, περιβάλλονται πλήρως με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και λαμβάνεται μέριμνα κατά τη διάστρωση ώστε να μην παραμένουν κενά πίσω από τον οπλισμό. Προηγουμένως, από τα χαλύβδινα πλαίσια αφαιρούνται όλα τα χαλαρά παρενθέματα και τα απομένοντα σταθεροποιούνται με τάκους και σφήνες (όχι ξύλινα) ή σφίγγονται. Η ελάχιστη αποδεκτή επικάλυψη είναι 15 mm από την επιφάνεια του βράχου και 25 mm από την τελική επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η εκτόξευση πρέπει να εξασφαλίζει: (α) Ελάχιστη αναπήδηση, για να αποφεύγεται η δημιουργία εγκλεισμάτων (φωλεών) από υλικά αναπήδησης στο περατωμένο σκυρόδεμα. (β) Μόρφωση όσο το δυνατόν

πιο ομαλής τελικής επιφάνειας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, για να είναι δυνατή η ασφαλής τοποθέτηση των υλικών υδατοστεγάνωσης (γεωϋφασμα, μεμβράνη). Για την εκπλήρωση της απαίτησης αυτής, χρησιμοποιείται, για την τελευταία προς το εσωτερικό της σήραγγας στρώση χωρίς ίνες και με αποκλειστικά λεπτόκοκκο αδρανές (0-8mm). (γ) Αποφυγή δημιουργίας κοιλιοτήτων και φωλεών μέσα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και κενών πίσω από τον οπλισμό. (δ) Ελάχιστο αριθμό ρωγμών από συρρίκνωση λόγω πήξης του σκυροδέματος. (ε) Καλή πρόσφυση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο βράχο και μεταξύ των στρώσεων.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται σε διαδοχικές στρώσεις. Το πάχος της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δύναται να ελέγχεται είτε με την διεύθυνση ράβδου, αμέσως μετά την περάτωση της εφαρμογής του, είτε με τοποθέτηση καρφιών γνωστού μήκους στον βράχο πριν από την εφαρμογή, ή με λήψη διατομών πριν και μετά τη διάστρωση, ή με λήψη πυρήνων βάσει καννάβου. Οι ποσότητες του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που εκτοξεύονται από το ακροφύσιο, καθορίζονται με βάση το μέσο πάχος εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αφού μετρηθεί η αναπήδηση.

Η πρώτη στρώση είναι λεπτή, $\sim 6\text{cm} < 10\text{cm}$, και οι επόμενες είναι παχύτερες, $5-15\text{cm}$. Ο ψεκασμός αρχίζει από κάτω προς τα πάνω. Η υποστήριξη αρχίζει με το γέμισμα οπών και ρωγμών. Η δόση του επιταχυντή θα πρέπει γενικά να είναι χαμηλή, $5-30\text{kg/m}^3$, λιγότερη στα τοιχώματα από την οροφή. Τα υλικά της αναπήδησης αφαιρούνται και απομακρύνονται πριν εφαρμοσθεί εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε οποιαδήποτε παρακείμενη επιφάνεια. Τα υλικά της αναπήδησης δεν επαναχρησιμοποιούνται, και απορρίπτονται, σε περιοχή απόθεσης υλικών όπου καλύπτονται με προϊόντα εκσκαφών, πάχους τουλάχιστον ενός μέτρου.

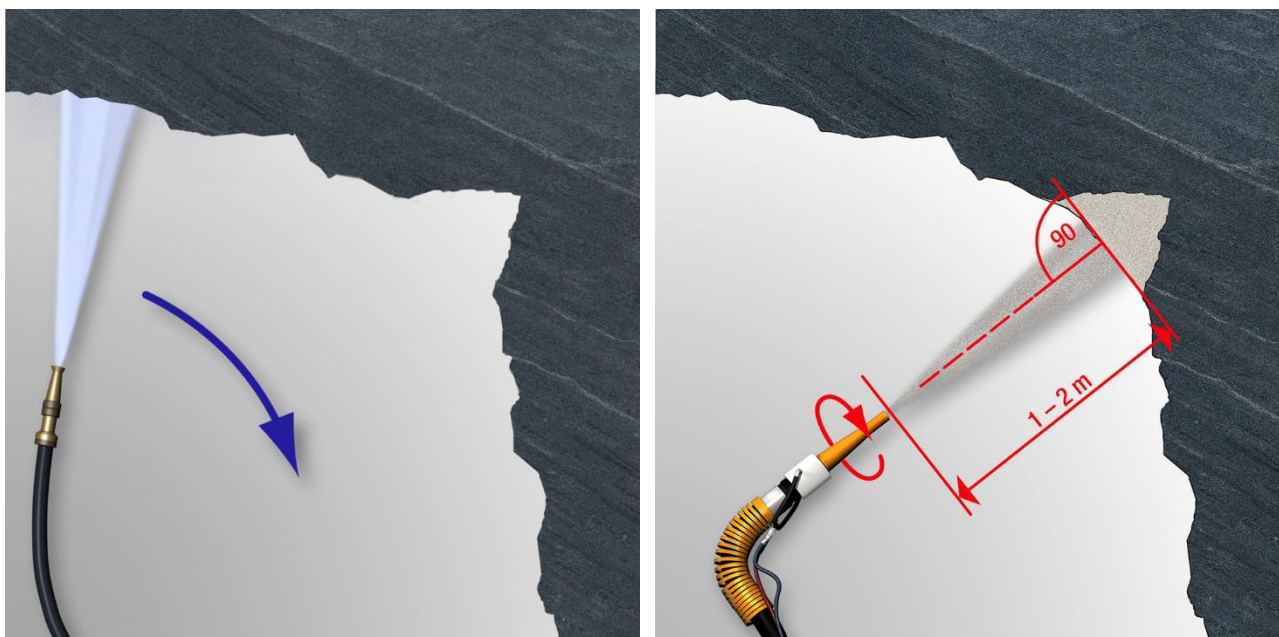
Το μέγιστο πάχος κάθε στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνεχούς διάστρωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 cm, εκτός αν χρησιμοποιούνται κατάλληλα πρόσμικτα. Εάν απαιτείται μεγαλύτερο συνολικό πάχος, αυτό επιτυγχάνεται με τη διάστρωση αλληπάλλληλων στρώσεων, η καθεμία των οποίων έχει πάχος μικρότερο ή ίσο των 10 cm. Η κάθε στρώση εφαρμόζεται μόνο όταν η υποκείμενη στρώση έχει σκληρυνθεί. Η κάθε πρόσθετη στρώση δεν εκτοξεύεται πολύ αργότερα (πάνω από 12 ώρες) από την προηγούμενη εκτός εάν ληφθούν ειδικά μέτρα καθαρισμού και ύγρανσης της έτοιμης επιφάνειας ή και άλλα μέτρα βελτίωσης της συνάφειας των στρώσεων. Όταν το συνολικό πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος υπερβαίνει τα 8 cm, τοποθετείται το πλέγμα περίπου στο μέσο της στρώσης, και στερεώνεται στην προηγούμενη στρώση με βλήτρα ή η διάστρωση γίνεται σε δύο διακριτές υποφάσεις.

Σε περιοχές όπου η εκροή υπογείων υδάτων από αρμούς ή αναβλύσεις επηρεάζει τις εργασίες, εγκαθίστανται σωληνώσεις διαφυγής και σφραγίζονται οι συνεχείς αρμοί πριν από τη διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

3.5.5 Χειρισμός

Η ροή του υλικού στο ακροφύσιο πρέπει να είναι συνεχής και ομοιόμορφη και ο ρυθμός εφαρμογής του πάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια να είναι επίσης ομοιόμορφος. Η παροχή δε θα πρέπει να ξεπερνά το $\leq 75\%$ της μέγιστης και η πίεση του αέρα πρέπει να είναι 6 bar. Η επιφάνεια του πετρώματος θα πρέπει να καθαρίζεται με νερό από τη σκόνη (Σχήμα 3-12α). Η απόσταση του ακροφυσίου (Σχήμα 3-12β) από την επιφάνεια εργασίας κυμαίνεται από 0.5 m μέχρι 1.5 m (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-02-00) και εν πάση περιπτώσει όχι πάνω από 2.0 m (1 έως 2m σύμφωνα με την BTS/ICE, 2000). Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η μικρότερη αναπήδηση για λεπτή ροή, ξηρής ή υγρής μίξης, πραγματοποιείται για απόσταση ακροφυσίου 1.5 m, ενώ αντίθετα, για πυκνή ροή υγρής μείξης, η μικρότερη αναπήδηση παρατηρείται για απόσταση ακροφυσίου 0.5m (Maidl, 1992). Η επιλογή της απόστασης σκοπό έχει να δημιουργεί την καλύτερη συμπύκνωση και ποιότητα του 5m. σκυροδέματος και τη λιγότερη αναπήδηση.

Το ακροφύσιο πρέπει να στοχεύει κάθετα (Σχήμα 3-13β) στην προσπίπτουσα επιφάνεια και οπωσδήποτε όχι με γωνία μικρότερη από 45° . Όταν το ακροφύσιο κρατιέται σε πολύ μεγάλη γωνία από την κάθετη στην επιφάνεια, το σκυρόδεμα κυλά ή πτυχώνεται δημιουργώντας μία ανώμαλη κυματώδη επιφάνεια με χειρότερη ποιότητα σκυροδέματος και σημαντική αναπήδηση. Το ακροφύσιο θα πρέπει να περιστρέφεται μόνιμα επάνω σε μία σειρά από περιφέρειες μικρών κύκλων (Σχήμα 3-12β). Στην περίπτωση εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάνω σε επιφάνεια με πλέγμα, το ακροφύσιο τοποθετείται πιο κοντά στην επιφάνεια και υπό μικρή γωνία ως προς την κάθετο στην επιφάνεια, ώστε να γίνεται ευκολότερη η ενσωμάτωση του πλέγματος και η απομάκρυνση του υλικού αναπήδησης. Ο ψεκασμός του σκυροδέματος εφαρμόζεται σε στρώσεις (Σχήμα 3-13) που πραγματοποιούνται σε διαφορετικούς χρόνους. Κάθε στρώση δομείται με διάφορες διαδρομές του ακροφυσίου πάνω από την επιφάνεια εργασίας, σε μία ενιαία συνεχή εργασία.



(α) Καθαρισμός από τη σκόνη του υποστρώματος με νερό. (β) Σωστή απόσταση χειρισμού του ακροφυσίου
Σχήμα 3-12. Καθαρισμός του πετρώματος και σωστή απόσταση ψεκασμού (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE)



α. 1η στρώση σκυροδέματος για σταθεροποίηση μετά από το γέμισμα διακοπές ψεκασμού υπερεκσκαφών. (β) Καθαρισμός από τη σκόνη μετά από διακοπές ψεκασμού (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE).
γ. 2η στρώση σκυροδέματος για σταθεροποίηση αφού απομακρυνθεί η σκόνη με νερό, μετά από διακοπή.

Σε περίπτωση εφαρμογής του σκυροδέματος σε κατακόρυφες ή μεγάλης κλίσης επιφάνειες, εκτός του θόλου της σήραγγας, η εφαρμογή αρχίζει στο χαμηλότερο σημείο και η στρώση του σκυροδέματος εκτόξευσης δομείται σε οριζόντιες ζώνες, από κάτω προς τα πάνω, μέχρις ότου καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια. Τα άκρα των περιοχών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάνω στα οποία δεν πρόκειται να εφαρμοσθεί περαιτέρω εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μορφώνονται ώστε να σχηματίζουν καθαρές κανονικές γραμμές και με κλίση 45° προς τις παρακείμενες επιφάνειες. Οι κατασκευαστικοί αρμοί και οι αρμοί διακοπής της εργασίας πρέπει να έχουν κλίση 45° περίπου ως προς την παρακείμενη επιφάνεια του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με καθαρή, κανονική ακμή. Πριν από τη διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην παρακείμενη επιφάνεια, το κεκλιμένο τμήμα και το παρακείμενο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υφίστανται κατάλληλη προετοιμασία.

3.5.6 Συντήρηση

Όπως στο κανονικό σκυρόδεμα, έτσι και εδώ η συντήρηση παίζει σπουδαίο ρόλο στην αύξηση των αντοχών. Έχει παρατηρηθεί ότι καρότα από πανέλα που δεν έχουν συντηρηθεί έχουν μειωμένη αντοχή 5MPa (ITA/AITES, 2006) σε σχέση με καρότα που έχουν συντηρηθεί. Οι μέθοδοι ύγρυνσης μέσα στη σήραγγα είναι δύσκολες. Μερικές φορές είναι δυνατόν τα υλικά συντήρησης να προσθέτονται στο μίγμα, λύση ακριβή που δεν έχει πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα. Όταν στην επιφάνεια οποιασδήποτε στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος εμφανισθούν οι πρώτες στεγνές κηλίδες, η επιφάνεια αυτή υγραίνεται με εκτόξευση νερού τουλάχιστον μία φορά κάθε 4 ώρες ή συντηρείται διαφορετικά, για χρονικό διάστημα τουλάχιστον επτά ημερών. Μεμβράνες ωρίμανσης δύνανται να εφαρμόζονται σε τελειωμένες επιφάνειες μόνο και συνιστώνται όταν οι συνθήκες ξήρανσης δεν είναι πολύ σοβαρές και από αισθητική άποψη είναι αποδεκτές (Malmberg, 1993).

3.6 Έλεγχος ποιότητας

Η ΤΠ 1501-12-03-02-00 του ΕΛΟΤ δίνει τις απαιτήσεις και τους ελέγχους για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αυτοί αφορούν τη σύνθεση και τον έλεγχο της ποιότητάς του ως νωπό σκυρόδεμα, μετά τη διάστρωση ως νεαρό σκυρόδεμα, και στη συνέχεια ως σκληρυμένο σκυρόδεμα. Παρακάτω δίνονται οι έλεγχοι που αφορούν την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και την αντοχή του νεαρού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

3.6.1 Νωπό σκυρόδεμα

Κατά τη διαδικασία υγρής μείξης, πριν την εισαγωγή του επιταχυντή, λαμβάνονται κυβικά δοκίμια. Επίσης, ελέγχεται η εργασιμότητα με τον κώνο κάθισης (Σχήμα 3-8β), που θα πρέπει να είναι 12-20cm (S2-S4), και η θερμοκρασία του σκυροδέματος (Σχήμα 3-9α).

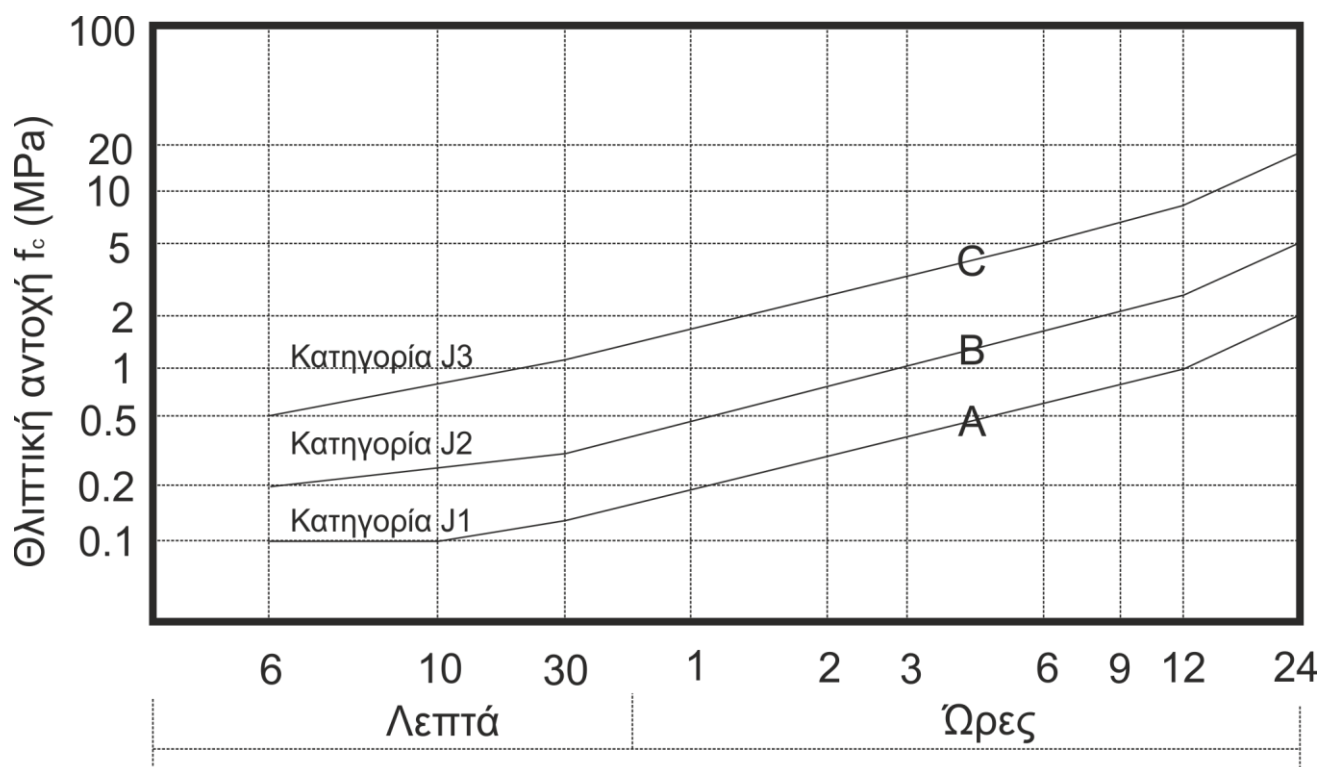
3.6.2 Νεαρό σκυρόδεμα

Στο νεαρό σκυρόδεμα παρακολουθούμε τον χρόνο και την ομοιομορφία πήξης του στο τοίχωμα. Στις βαθιές εξορύξεις, η πρόωγη ανάπτυξη της αντοχής έχει ιδιαίτερη σημασία. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει να εφαρμόζεται γρήγορα σε παχιά στρώματα, ακόμη και στην οροφή. Η απαίτηση ανάπτυξης της αντοχής από περίπτωση σε περίπτωση διαφέρει. Το νεαρό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ταξινομείται, σύμφωνα με το πρότυπο EN 14487-1, στις κατηγορίες πρόωξης αντοχής J1, J2 ή J3 σύμφωνα με το Σχήμα 3-14.

Κατηγορία J1. Είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε λεπτές στρώσεις σε ένα στεγνό υπόστρωμα. Δεν θα πρέπει να αναμένονται από αυτό το σκυρόδεμα απαιτήσεις υποστήριξης κατά τη διάρκεια των πρώτων ωρών μετά την εφαρμογή του.

Κατηγορία J2. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτούνται παχύτερες στρώσεις μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Μπορεί να εφαρμοστεί στην οροφή και είναι κατάλληλο ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες, π.χ. σε περίπτωση ελαφριάς εισροής νερού και άμεσης στη συνέχεια εργασίας διάτρησης-ανατίναξης.

Κατηγορία J3. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές σε κατακερματισμένα πετρώματα ή σε έντονη εισροή νερού. Λόγω της ταχείας πήξης, παράγεται περισσότερη σκόνη και αναπήδηση κατά την εφαρμογή, και ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.



Σχήμα 3-14. Κατηγορίες πρώιμης αντοχής εκτοξευόμενου σκυροδέματος (EN 14487-1).

Σύμφωνα με την ICE (1996), η αρχική πήξη συμβαίνει μέσα στα πρώτα 10 λεπτά, και η τελική πήξη μεταξύ 3 λεπτών και μισής ώρας. Η πρώιμη θλιπτική αντοχή του νεαρού σκυροδέματος μέχρι τις 24 ώρες μπορεί να εκτιμηθεί με έμμεσες μεθόδους. Η μέθοδος της διείσδυσης βελόνας (EN 14488-2 Μέθοδος Α) είναι κατάλληλη για την εκτίμηση αντοχής $0.2 \div 1.2$ MPa κατά τις πρώτες 3 ώρες. Τα αποτελέσματα της μεθόδου υπολογίζονται από τη δύναμη που απαιτείται για τη διείσδυση βελόνας διαμέτρου 3mm σε βάθος 15mm από την επιφάνεια του δοκιμίου (Σχήμα 3-15α).



(α) με βελόνα



(β) με καρφί

Σχήμα 3-15. Έλεγχος πρώιμης αντοχής (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE).

Η μέθοδος της διείσδυσης βλήτρου (EN 14488-2 Μέθοδος Β) είναι κατάλληλη για την εκτίμηση αντοχής $3 \div 16$ MPa κατά τις μετέπειτα από 3 έως 24 ώρες. Τα αποτελέσματα της μεθόδου προσδιορίζονται από το βάθος διείσδυσης καρφιού καρφωμένου με πιστόλι Hilti (Σχήμα 3-15β). Η μέθοδος της εξόλκευσης ήλου (EN

12504-3:2005) είναι κατάλληλη ως μη καταστροφική δοκιμή για την εκτίμηση αντοχής $>10\text{MPa}$ μετά από μία μέρα.

3.6.3 Σκληρυμένο σκυρόδεμα

Ενδεικτικές αντοχές παίρνουμε με καρότα από πανέλα (Σχήμα 3-16). Πραγματικές αντοχές παίρνουμε με καρότα από το πεδίο εφαρμογής Σχήμα 3-17. Μηχάνημα και χειριστής επιδρούν στο αποτέλεσμα και στην κατανάλωση επιταχυντή, άρα και στην αντοχή. Επομένως, η μελέτη σύνθεσης είναι ενδεικτική και η μέτρηση των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνεται στο έργο.



Σχήμα 3-16. Λήψη πυρήνων από τελάρια (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009).

3.6.3.1 Θλιπτική αντοχή

Συνήθη πρακτική αποτελεί ο καθορισμός της θλιπτικής αντοχής μετά από 8 ώρες, 24 ώρες και 28 ημέρες. Γενικά απαιτείται αντοχή σκυροδέματος τουλάχιστον C25/30, ανάλογα με το προς υποστήριξη έδαφος, και αν θα ακολουθήσει αργότερα μόνιμη επένδυση ή όχι. Η προδιαγραφμένη αντοχή προσδιορίζεται σε πυρήνες σκυροδέματος ληφθέντες από πανέλα σύμφωνα με το EN 12504-1, και ταξινομείται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206-1. Εφόσον απαιτηθεί, δείγματα λαμβάνονται και από το σκυρόδεμα της επένδυσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17.

Από τα πανέλα που ελήφθησαν κατά την εκτόξευση λαμβάνονται (Σχήμα 3-16 αριστερά) κυλινδρικοί πυρήνες διαμέτρου 75mm (Σχήμα 3-16 δεξιά) για την εκτέλεση δοκιμών στα δοκίμια. Σκοπός είναι ο καθορισμός της αντοχής σε νεαρή ηλικία, όταν οι πιέσεις λόγω χαλάρωσης και μετακίνησης του εδάφους πρέπει να εμποδιστούν και η αντοχή σε 28 ημέρες σε μία τελική τιμή για τη μελέτη. Η BTS/ICE (2000) προτείνει χαρακτηριστικές τιμές της αντοχής 8MPa στις 24 ώρες και 35MPa στις 28 ημέρες. Συνήθεις τιμές της αντοχής σε κυλινδρικούς πυρήνες με λόγο μήκους προς διάμετρο 2 προς 1, στις 8 ώρες, 24 ώρες και 28 μέρες είναι 5.5MPa, 10-20 MPa και 25-45 MPa, ανάλογα με τον τύπο και την ποσότητα του επιταχυντή. Κατά τη διάνοιξη του Μετρό της Θεσσαλονίκης μετρήθηκαν τιμές αντοχής 24 ωρών, 18-22MPa για σκυρόδεμα με επιταχυντή ελεύθερο αλκαλίων και 10-14MPa για σκυρόδεμα με αλκαλικό επιταχυντή.



Σχήμα 3-17. Λήψη καρótων από σήραγγα (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

3.6.3.2 Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει σημαντική σημασία στην φέρουσα ικανότητά του, ιδιαίτερα σε τεμαχισμένα πετρώματα. Επειδή είναι πιο εύκολος ο ποιοτικός έλεγχος σε θλίψη, έχουν διατυπωθεί διάφορες σχέσεις μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής, όπως π.χ. ότι ο λόγος της πρώτης προς τη δεύτερη κυμαίνεται στη μία μέρα από 0.18 έως 0.30 και στις 28 ημέρες από 0.15 έως 0.18.

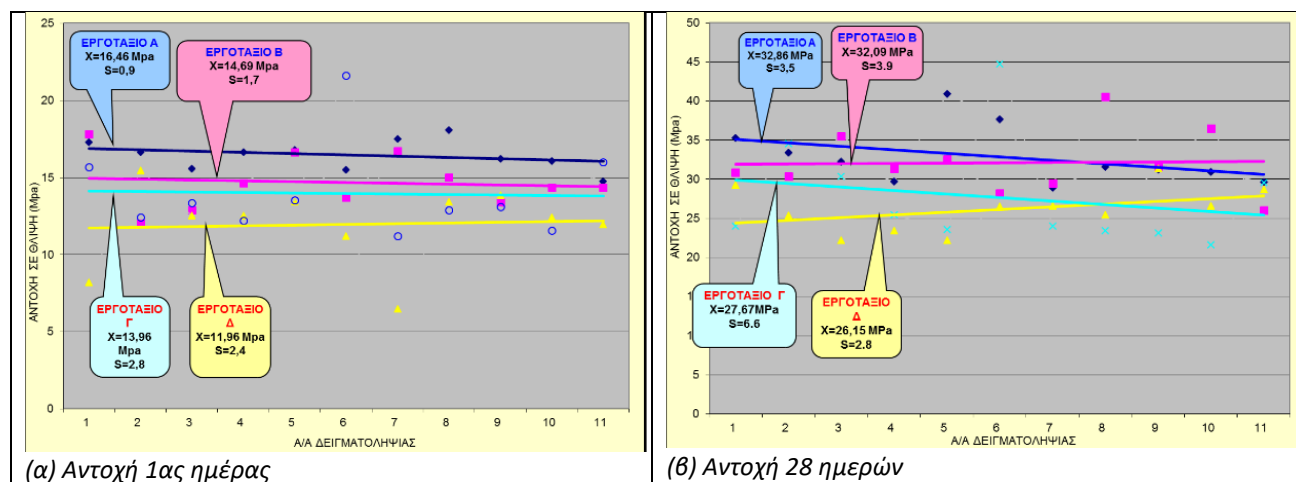
3.6.3.3 Πρόσφυση

Για την πρόσφυση στην επιφάνεια του πετρώματος δεν υπάρχουν τυποποιημένες δοκιμές, πειράματα όμως έχουν δείξει ότι η αντοχή της πρόσφυσης ή η τάση εξόλκευσης είναι περίπου το ένα τέταρτο της θλιπτικής αντοχής. Η τάση αυτή πρέπει να μεγιστοποιείται στο εργοτάξιο με επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας πριν την εκτόξευση της πρώτης στρώσης.

3.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα

Η ανάπτυξη της αντοχής εξαρτάται από τη χρήση επιταχυντή αλλά και από τον χειριστή της εκτόξευσης. Στο Σχήμα 3-18 δίνεται η μετρημένη αντοχή σε θλίψη, σε 4 εργοτάξια, 11 καρótων ανά εργοτάξιο, συντηρημένων από πανέλα εκτοξευμένου σκυροδέματος με χρήση αργιλικού επιταχυντή, ίδιου αρχικού μίγματος, ανηγμένη

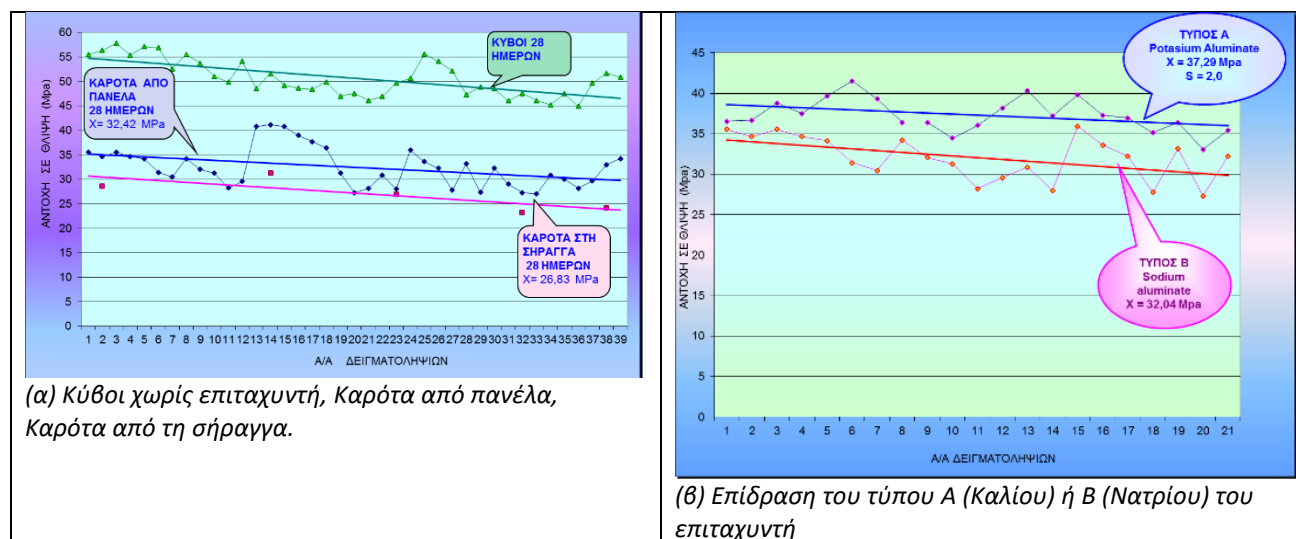
σε αντοχή κύβου 15cm, κατά την 1^η και την 28^η ημέρα μετά την εκτόξευση. Παρατηρούμε τη διαφοροποίηση της αντοχής ανά εργοτάξιο, που δείχνει να οφείλεται στον χειριστή της εκτόξευσης.



Σχήμα 3-18. Αντοχή σε θλίψη καρότων συντηρημένων από πάνελα εκτοξευμένου σκυροδέματος με αργιλικό επιταχυντή, ανηγμένη σε αντοχή κύβου 15cm (Μιχαηλίδης, 2015)

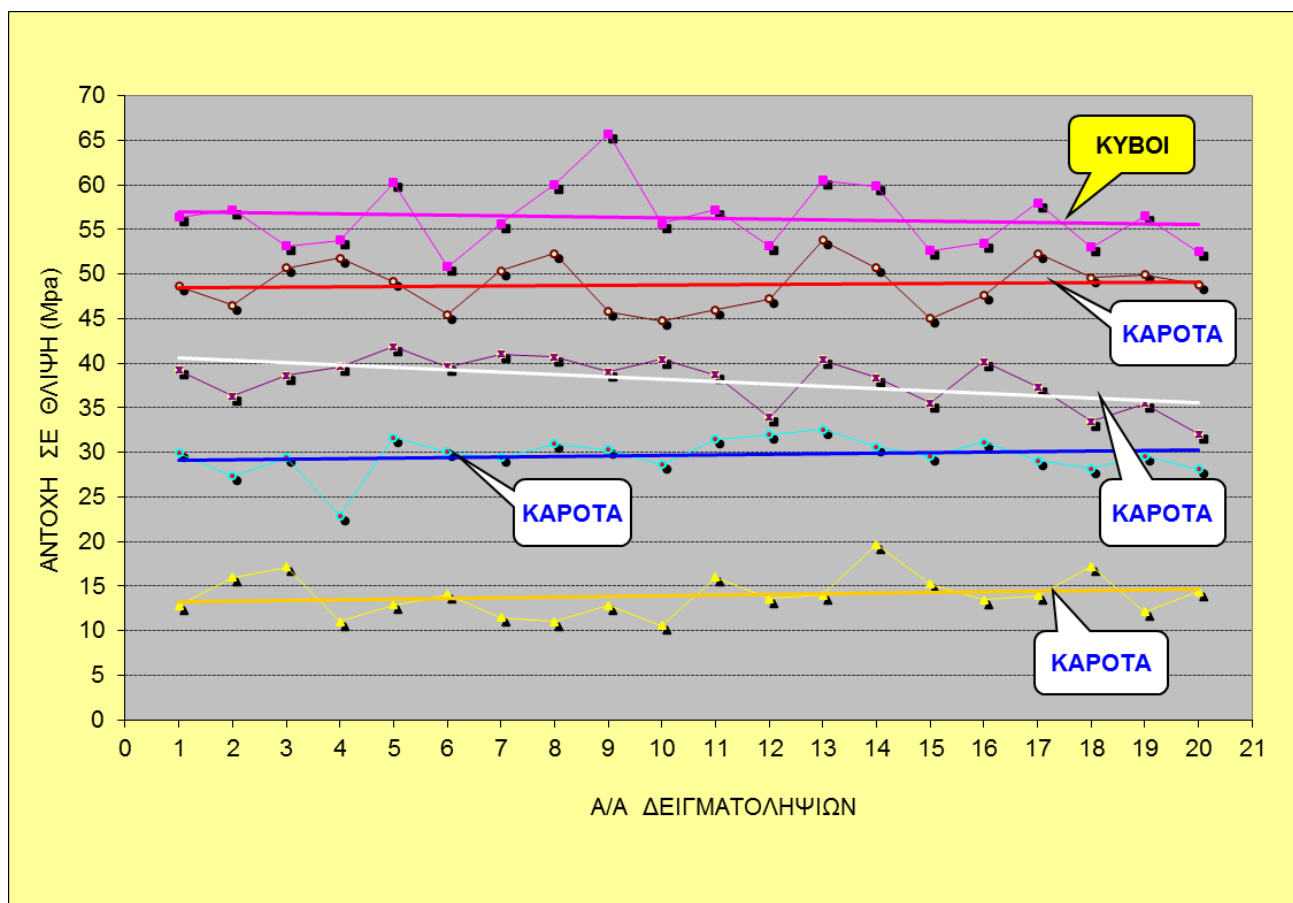
Στο Σχήμα 3-19α συσχετίζονται αντοχές 28 ημερών του σκυροδέματος, μετρημένων σε 39 κύβους χωρίς επιταχυντή, και 39 καρότα από πάνελα και σε 5 καρότα από τη σήραγγα, με αργιλικό επιταχυντή. Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες αντοχές μετρώνται στους κύβους και οι ελάχιστες στα καρότα από τη σήραγγα. Οι μέγιστες αντοχές στους κύβους οφείλονται στη συντήρησή τους και στην έλλειψη επιταχυντή. Οι ελάχιστες μετρώνται στα καρότα από τη σήραγγα, και οφείλονται στην έλλειψη συντήρησης και στην χρήση αργιλικού επιταχυντή. Η ενδιάμεσες αντοχές στα καρότα από πάνελα οφείλονται στη συντήρηση των δοκιμών αυτών.

Στο Σχήμα 3-19β συσχετίζεται η επίδραση δύο τύπων αργιλικού επιταχυντή, στην αντοχή 28 ημερών 21 δοκιμών κάθε τύπου. Παρατηρούμε ότι οι μετρημένες αντοχές των δοκιμών με τύπο Α (Καλίου) επιταχυντή είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτών με τύπο Β (Νατρίου) επιταχυντή.



Σχήμα 3-19. Επίδραση του αργιλικού (αλκαλιούχου) επιταχυντή στην αντοχή εκτοξευόμενου σκυροδέματος 28 ημερών (Μιχαηλίδης, 2015).

Στο Σχήμα 3-20 συσχετίζεται η αντοχή σε θλίψη κύβων χωρίς επιταχυντή, και καρότων με επιταχυντή ελεύθερο αλκαλίων και με άλλους επιταχυντές. Παρατηρούμε ότι οι επιταχυντές ελεύθεροι αλκαλίων μείωσαν λίγο την αντοχή του σκυροδέματος σε σχέση με τους αργιλικούς επιταχυντές που τη μείωσαν σημαντικά.



Σχήμα 3-20. Επίδραση του επιταχυντή ελεύθερου αλκαλίων στην αντοχή 28 ημερών. Προ επιταχυντή σε κύβους ~55MPa. Με επιταχυντή ελεύθερο αλκαλίων σε καρότα 48±5MPa. Σε καρότα με άλλους επιταχυντές <30MPa (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009).

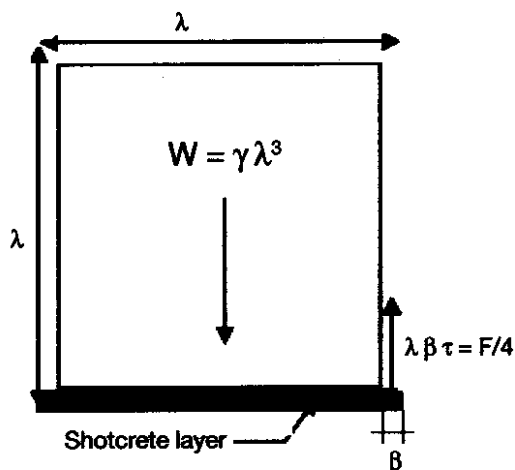
Οι παραπάνω μετρήσεις αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων έδειξαν ότι η επί τόπου αντοχή του εκτοξευμένου σκυροδέματος εξαρτάται από τον χειριστή, και τον τύπο του επιταχυντή που χρησιμοποιήθηκε. Οι ελεύθεροι αλκαλίων επιταχυντές τείνουν να μη μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος.

3.8 Δράσεις

Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα ως επένδυση προσφέρει στατική ενίσχυση με την: (α) Η παρεμπόδιση ή ελαχιστοποίηση της χαλάρωσης του πετρώματος με την ισχυροποίηση της μάζας της οποίας γεμίζονται τα κενά, (β) με τη μεταφορά του φορτίου του πετρώματος σε γειτονικό ευσταθές πέτρωμα με δυνάμεις διάτμησης ή συγκόλλησης, και (γ) με λειτουργία μεμβρανικού φορέα. Η στατική αυτή ενίσχυση εξαρτάται άμεσα από την αντοχή του εκτοξευμένου σκυροδέματος.

3.8.1 Αντίσταση στην πτώση τεμαχίων

Το Σχήμα 8-21 δείχνει τη στατική λειτουργία (β) μεταφοράς φορτίου. Το βάρος του ασταθούς όγκου W μεταφέρεται σε γειτονικό σταθερό πέτρωμα εφόσον η δύναμη πρόσφυσης F, που ασκείται σε μία ζώνη πλάτους β, είναι επαρκής.



Σχήμα 3-21. Μεταφορά δυνάμεων με διατμητικές δυνάμεις.

Το Σχήμα 3-21 δείχνει τη στατική λειτουργία μεταφοράς φορτίου (α2). Το βάρος του ασταθούς όγκου W μεταφέρεται σε γειτονικό σταθερό πέτρωμα εφόσον η δύναμη πρόσφυσης F , που ασκείται σε μία ζώνη πλάτους β , είναι επαρκής. Επομένως θα πρέπει:

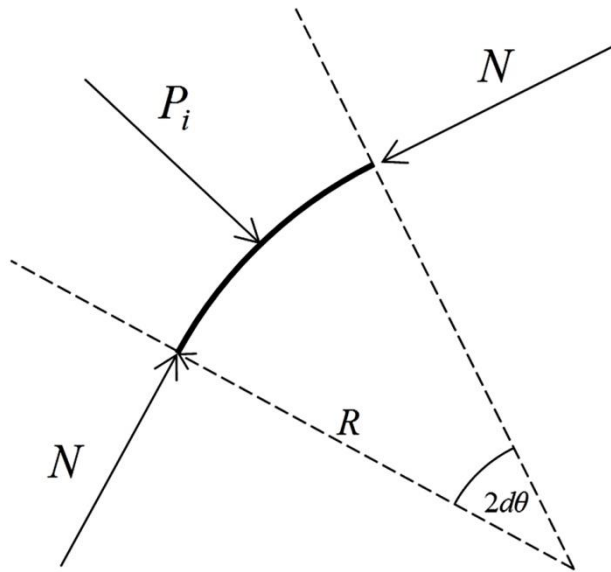
$$\gamma \cdot \lambda^3 = W = F = 4 \cdot \lambda \cdot \beta \cdot \tau \Rightarrow \lambda = \sqrt{\frac{4 \cdot \beta \cdot \tau}{\gamma}} \quad (3-1)$$

Αν π.χ., ζητείται ο μέγιστος όγκος κυβικού τεμάχους ακμής λ (Σχήμα 3-21) που μπορεί να στηριχτεί σε σταθερά γειτονικά τεμάχια, για πλάτος φορτιζόμενης πρόσφυσης $\beta=30\text{mm}$, αντοχή σε πρόσφυση $\tau=1\text{MPa}$, φαινόμενο βάρος τεμάχους $\gamma=27\text{kN/m}^3$, τότε:

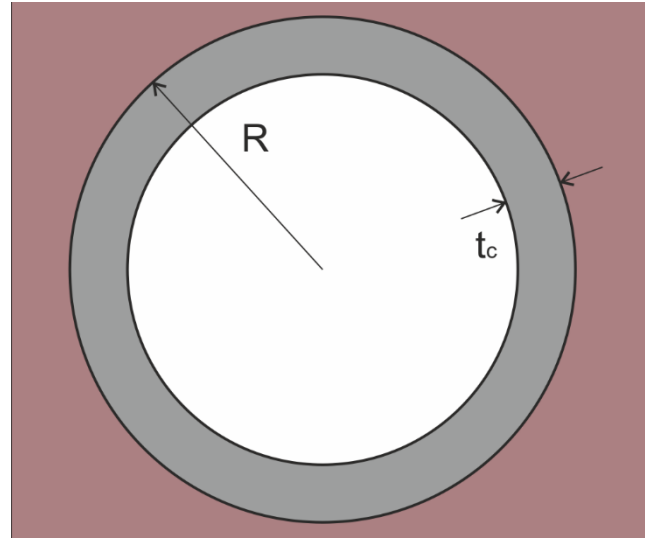
$$\lambda = \sqrt{\frac{4 \cdot \beta \cdot \tau}{\gamma}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.03 \cdot 10^3}{27}} = 2.11\text{m} \quad (3-2)$$

3.8.2 Διάδραση με το πέτρωμα

Η επένδυση από σκυρόδεμα, στην κλίμακα του ανοίγματος, λειτουργεί ως κέλυφος. Στο Σχήμα 3-22β φαίνεται κυκλική σήραγγα αντιστηριζόμενη από επένδυση σκυροδέματος.



(α) Δυνάμεις επί του διαφορικού στοιχείου της επένδυσης.
Σχήμα 3-22. Φορέας επένδυσης κυκλικής σήραγγας



(β) Σήραγγα επενδυμένη με σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση αξονικής συμμετρίας, οι ροπές, οι τέμνουσες και οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια, μηδενίζονται. Τότε, η ισορροπία των δυνάμεων είναι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-22α. Εξισώνοντας τις δυνάμεις στη διεύθυνση της διχοτόμου, προκύπτει:

$$2 \cdot N \cdot d\theta = P_i = p_i \cdot R \cdot 2 \cdot d\theta \Rightarrow \frac{N}{R} = \frac{\sigma_{\theta\theta c} \cdot t_c}{R} = p_i \quad (3-3)$$

Η ορθή δυστένεια της αξονοσυμμετρικής επένδυσης, για επίπεδη παραμόρφωση, υπολογίζεται από την:

$$k_c = \frac{dp_i}{d(\delta_i/R)} = \frac{dp_i}{d\varepsilon_{\theta\theta c}}; \varepsilon_{\theta\theta c} = \frac{N}{t_c \cdot \frac{E_c}{1-\nu_c^2}} = \frac{p_i \cdot R}{t_c \cdot \frac{E_c}{1-\nu_c^2}} \Rightarrow k_c = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \cdot \frac{t_c}{R} \quad (3-4)$$

E_c : Μέτρο Young του εκτοξευόμενου ή έγχυτου σκυροδέματος, = 21±7 GPa.

ν_c : Λόγος του Poisson του εκτοξευόμενου ή έγχυτου σκυροδέματος, =0.2.

t_c : Πάχος της επένδυσης.

R : Ακτίνα της παρειάς εκσκαφής της σήραγγας.

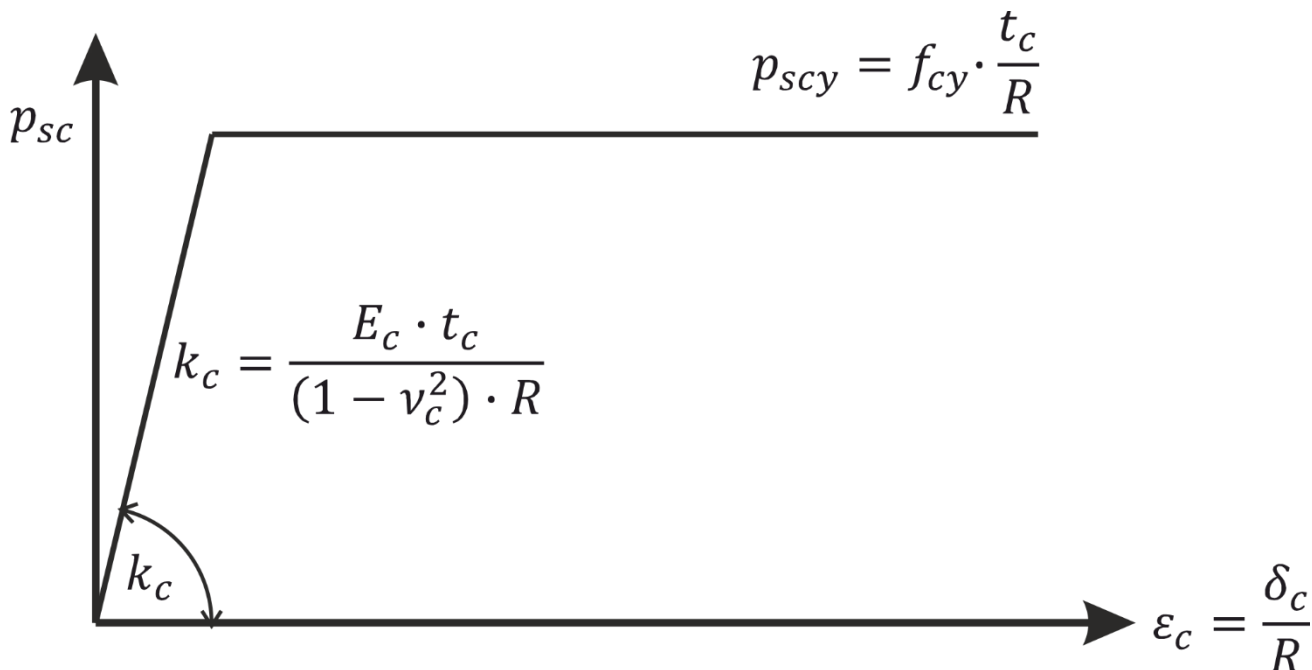
f_{cy} : Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος, =35±20 MPa.

Εφόσον το πάχος της επένδυσης αξονοσυμμετρικής σήραγγας (Σχήμα 3-22β) θεωρηθεί σημαντικό σε σχέση με την ακτίνα της, η ορθή δυστένεια k_c και η φέρουσα ικανότητα p_{scy} της υποστήριξης δίνονται από τις σχέσεις (3-5) και (3-6), αντίστοιχα.

$$k_c = \frac{E_c \cdot [R^2 - (R - t_c)^2]}{(1 + \nu_c) \cdot [(1 - 2\nu_c)R^2 + (R - t_c)^2]} \approx \frac{E_c \cdot t_c}{(1 - \nu_c^2) \cdot R} \quad (3-5)$$

$$p_{scy} = \frac{f_{cy}}{2} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{t_c}{R} \right)^2 \right] = f_{cy} \cdot \frac{t_c}{R} \cdot \left(1 - \frac{t_c}{2 \cdot R} \right) \approx f_{cy} \cdot \frac{t_c}{R} \quad (3-6)$$

Στο Σχήμα 3-23, οι παραπάνω απλοποιημένες σχέσεις δίνονται γραφικά. Η δεξιά σχέση (3-6) υπερεκτιμά την πίεση της αντίστασης κατά t_c/D . Για μεγάλα πάχη και μικρές διαμέτρους η υπερεκτίμηση αυτή είναι σημαντική, ενώ για τους μικρούς λόγους είναι πολύ μικρή. Π.χ. για $t_c/D=0.5/2=25\%$ ο απλός τύπος δίνει 17.50MPa και ο ακριβής 13.13MPa ($4.37/17.50=25\%$), ενώ για τους συνήθεις λόγους, για επένδυση από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, λόγους $t_c/D=0.25/10=2.5\%$, ο απλός τύπος δίνει 1.75MPa και ο ακριβής 1.71MPa ($0.04/1.71=2.5\%$).



Σχήμα 3-23. Καταστατικός νόμος επένδυσης αξονοσυμμετρικής σήραγγας από εκτοξευμένο σκυρόδεμα

Ο Πίνακας 3-10 δίνει ενδεικτικές τιμές για τη μέγιστη προσφερόμενη πίεση από επένδυση σκυροδέματος σε κυκλικό άνοιγμα εκσκαφής, δεδομένης της διαμέτρου του. Ο Πίνακας 3-11 δίνει τιμές της δυστροπίας τριών επενδύσεων από σκυρόδεμα.

Πίνακας 3-10. Μέγιστη πίεση p_{scy} [MPa] προσφερόμενη από σκυρόδεμα.

Διάμετρος σήραγγας D[m]		ακριβής σχέση (3-6)				$p_{scy} \cdot D$
		2	5	10	20	$\approx 2 \cdot f_{cy} \cdot t_c$
α/α	Σκυρόδεμα					
1	Εκτοξευμένο, $t=50\text{mm}$, $f_{cy}=14\text{MPa}$, μετά 1 μέρα	0.68	0.28	0.14	0.07	1.4
2	Εκτοξευμένο, $t=50\text{mm}$, $f_{cy}=35\text{MPa}$, μετά 28 μέρες	1.71	0.69	0.35	0.17	3.5
3	Εκτοξευμένο, $t=250\text{mm}$, $f_{cy}=35\text{MPa}$, μετά 28 μέρες	7.66	3.33	1.71	0.86	21.0
4	Έγχυτο, $t=500\text{mm}$, $f_{cy}=35\text{MPa}$, μετά 28 μέρες	13.13	6.30	3.33	1.71	35.0

Πίνακας 3-11. Ορθή k_{cn} και εφαπτομενική k_{cf} δυστροπία της επένδυσης από σκυρόδεμα (Panet, 1995)

α/α	Περιγραφή υποστήριξης	k_{cn} [MPa]	k_{cf} [MPa]
1	Επένδυση, από έγχυτο σκυρόδεμα, πάχους 40cm	2500	1.35
2	Δακτύλιος, από 6 προκατασκευασμένα τόξα οπλισμένου σκυροδέματος, πάχους 30 cm	2800	0.50
3	Επένδυση, από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, πάχους 10cm – Βραχυπρόθεσμη τιμή	210	.004

Η συμβατική οριακή ελαστική τροπή $\varepsilon_{0.001}$ της επένδυσης δύναται να ορισθεί ως η τροπή κατά την επίτευξη της μέγιστης προσφερόμενης πίεσης για ελαστική παραμόρφωση. Για επίπεδη παραμόρφωση δίνεται από την:

$$\varepsilon_{\theta\theta cel} = \frac{p_{scy}}{k_c} = \frac{f_{cd}}{E_c} (1 - \nu_c^2) \Rightarrow \varepsilon_{\theta\theta cel}(C30/37) = \frac{30}{32 \times 10^3} \cdot \frac{0.85}{1.50} (1 - 0.04) = 0.51 \times 10^{-3} \quad (3-7)$$

Η οριακή τιμή της τροπής του σκυροδέματος της επένδυσης είναι:

$$\varepsilon_{\theta\theta cor} = 2 \times 10^{-3} \quad (3-8)$$

Άρα, η συμβατική ελαστική παραμόρφωση του σκυροδέματος είναι περίπου το τέταρτο της οριακής. Η ακτινική μετατόπιση δ_c της επένδυσης της σήραγγας, που είναι ίση ή μεγαλύτερη από την μετρούμενη μετατόπιση δ_{cmon} της επένδυσης, δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την οριακή μετατόπιση δ_{cor} της επένδυσης, όπως αυτή υπολογίζεται από την οριακή τιμή της τροπής. Για σήραγγα ακτίνας $R=5m$, οι μετατοπίσεις αυτές είναι:

$$\delta_{cmon} \leq \delta_c \leq \delta_{cor} = \varepsilon_{\theta\theta cor} \times R = 2 \times 10^{-3} \times 5000 = 10mm \quad (3-9)$$

Η μετατόπιση αυτή στο πρώτο τέταρτό της, της ελαστικής και στιβαρής συμπεριφοράς της επένδυσης μέχρι τα 2.5mm, θα εκδηλώνεται αργά με τη φόρτιση. Αντίθετα, μετά την παραμόρφωση αυτή, ο ρυθμός ανάληψης φορτίου θα είναι μικρότερος, και υφίσταται ο κίνδυνος βίαιης θραύσης. Οι ευσταθείς σήραγγες, επομένως, μετά το κλείσιμο του δακτυλίου και τη σκλήρυνση της επένδυσης, παρουσιάζουν ελάχιστες μετατοπίσεις. Αν, όμως η παραμόρφωση του πετρώματος είναι σημαντική, τότε η επένδυση θα υποχρεωθεί να θραυστεί. Τούτο μπορεί να αποφευχθεί με τη διαμόρφωση ενδοτικών αρμών κατά μήκος της σήραγγας σε διάφορες θέσεις στην περιφέρειά της.

Κανονισμοί-Προδιαγραφές

ACI 506 “Shotcrete”. (ACI 506R, “Guide to Shotcrete”, ACI 506.1R, “Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete”, ACI 506.2, “Specification for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete”, ACI 506.4R, “Guide for the Evaluation of Shotcrete”, ACI 506.5R, “Guide for Specifying Underground Shotcrete”, ACI C-06, “Application and Use of Shotcrete”, ACI CCS4, “Shotcrete for the Craftsman”, ACI CP60, “Shotcrete Nozzleman Craftsman Workbook”, ACI SP-14, “Shotcreting”).

AFTES (2000). “Design of Sprayed Concrete For Underground Support”, Recommendation GT20R1A1.

ÖVBB (2009). “Shotcrete” Guideline, Tunnel, 12/2009: 93.

BTS/ICE (2000). “Specifications for Tunnelling”, Thomas Telford Publishing

EFNARC (1996). “European Specification for Sprayed Concrete”, UK

EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, ΕΛΟΤ.

EN 206-1. Concrete Part 1: Specification, performance production and conformity, ΕΛΟΤ.

EN 450-1. Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria.

EN 933-1. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, ΕΛΟΤ.

EN 934-2/A1. Admixtures for concrete, mortar and grout - Concrete admixtures- Part 2: Definitions, requirements, conformity, marking and labelling, ΕΛΟΤ.

EN 934-5. Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 5: Admixtures for sprayed concrete - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling, ΕΛΟΤ.

EN 934-6 E2. Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 6: Sampling, conformity control and evaluation of conformity, ΕΛΟΤ.

- EN 1008. Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, ΕΛΟΤ.
- EN 1504-03. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair, ΕΛΟΤ.
- EN 1542. Products and system for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bond strength by pull-of, ΕΛΟΤ.
- EN 12350. Testing fresh concrete (Slump-test, Flow table test, Density) , ΕΛΟΤ.
- EN 12390. Testing hardened concrete (Compressive strength of test specimens, Flexural strength of test specimens Density of hardened concrete Depth of penetration of water under pressure Freeze-thaw resistance – Scaling) , ΕΛΟΤ.
- EN 12504. Testing concrete in structures (Cored specimens - Taking, examining and testing in compression, Determination of pull-out force), ΕΛΟΤ.
- EN 12620+A1. Aggregates for concrete, ΕΛΟΤ.
- EN 13263-1. Silica fume for concrete. Definitions, requirements and conformity criteria.
- EN 13412 E2 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of modulus of elasticity in compression, ΕΛΟΤ.
- EN 13791 Εκτίμηση αντοχής σκυροδέματος στην κατασκευή, ΕΛΟΤ.
- EN 14487 Sprayed concrete – (1: Definitions, specifications and conformity, 2: Execution) , ΕΛΟΤ.
- EN 14488 Testing sprayed concrete (1: Sampling fresh and hardened concrete, 2: Compressive strength of young sprayed concrete, 3: Flexural strengths first peak ultimate and residual of fibre reinforced beam specimens, 4: Bond strength of cores by direct tension, 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens 6: Thickness of concrete on a substrate, 7: Fibre content of fibre reinforced concrete), ΕΛΟΤ.
- EN 15167. Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout. Definitions, specifications and conformity criteria
- ΚΕΔΕ (1999). «Σχέδιο Προδιαγραφής για το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα».
- ΤΠ 1501-12-03-02-00. «Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπογείων έργων και σηράγγων», ΕΛΟΤ.
- ΤΠ 1501-12-03-08-00. «Πλέγματα οπλισμού εκτοξευομένου σκυροδέματος σηράγγων», ΕΛΟΤ.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

- ASA (2015). *Shotcrete, Speed, Versatility, Cost Savings, Sustainability*, Brochure.
- King EH (1996). "Shotcrete", in *Tunnel Engineering handbook* by Bickel JO, Kuesel TR and King EH eds., Chapman & Hall.
- Höfler J, Schlumpf J, Jahn M (2011). *Sika^R Sprayed Concrete Handbook*, eds. Sika AG & Putzmeister AG.
- Hoek E, Kaiser PK and Bawden WF (1995). "Support of underground excavations in hard rock, ch. 15 Shotcrete", Balkema.
- ICE (1996). "Sprayed Concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground", ICE design and practice guide, Thomas Telford Publishing.
- ITA/AITES (2006). "Report on Shotcrete for rock support", A summary report on state-of-the-art presented by ITA Working Group N°12 "Shotcrete Use".
- Maidl B (1992). *Handbuch für Spritzbeton*, W. Ernst & Sohn.
- Malmberg Bo (1993). "Shotcrete for Rock Support: a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 4.
- Μαρσέλλος Ν (2013). *Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος – Από τον ΚΤΣ.97 στον ΚΤΣ 2013*, Εκδόσεις Δεδεμάδη.
- Mehta PK and Monteiro PJM (2009). *ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: μικροδομή, ιδιότητες, και υλικά*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Melbye T (2001). *Sprayed Concrete for Rock Support*, Master Builders Technologies, Zurich.
- Μιχαηλίδης Μ (2015). Προσωπικό αρχείο.
- Μιχαηλίδης Μ & Γαρατζιώτης Γ (2009). «Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα», Διάλεξη στο ΔΠΜΣ/ΣΚΥΕ, ΕΜΠ.
- Neville AM (1994). *Properties of Concrete*, Longman Scientific & Technical
- Neville AM & Brooks JJ (1993). *Concrete Technology*, Longman Group
- ΟΜΟΕ (2002). *Τεύχος Οδικών Σηράγγων – Έργα Πολιτικού Μηχανικού*.
- Sika (2007). *Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος*
- Vandewalle M (2005). *Tunnelling is an Art*, NV Bekaert SA, Belgium.

Κριτήρια αξιολόγησης

Κριτήριο αξιολόγησης 1⁸

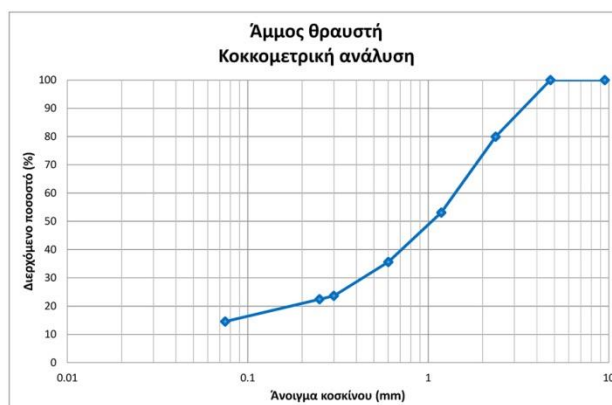
Ορθογωνική στοά μεταλλείου πλάτους εκσκαφής 3m και ύψους 2.5m, διανοίγεται σε βήματα μήκους 2m. Από το πέτρωμα εκρέουν μικρές ποσότητες νερού. Η στοά ανά βήμα επενδύεται στα πλευρά και τη στέψη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ξηρής μείξης, πάχους 50mm. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C20/25. Η ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου (εβ 3.1) θα πρέπει να είναι 450kg/m³ και κατά προτίμηση 500kg/m³. Παρέχονται δύο κλάσματα αδρανών, άμμος (εβ 2.70) και ρύζι (εβ 2.68), που δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Τα ποσοστά των κλασμάτων αδρανών, θα είναι κατά προτίμηση ~75% άμμος και ~25% ρύζι. Ο λόγος N/T θα πρέπει να είναι ~0.40. (α) Δώστε τα διαγράμματα κοκκομετρικής διαβάθμισης κάθε κλάσματος. (β) Προσδιορίστε την αναλογία των δύο κλασμάτων για διαβάθμιση των αδρανών εντός της ζώνης Ε (Σχήμα 3-2β), με μέγιστο κόκκο 3/8". (γ) Δώστε μια σύνθεση του σκυροδέματος, (δ) Προδιαγράψτε τον απαιτούμενο εξοπλισμό. (ε) Δώστε την απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης.

ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΣΚΙΝΟΥ (mm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ	ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ			
		Άμμος θραυστή		Ρύζι θραυστό	
		(g)	(%)	(g)	(%)
75	3"				
63	2 ½ "				
50	2"				
37.5	1 ½ "	1320	100	3053	100
31.5	1 ¼ "				
25.0	1"	1320	100	3053	100
19.0	3/4"				
16.0	5/8"				
12.5	1/2"	1320	100	3053	100
9.5	3/8"	1320	100	3053	100
6.3	1/4"				
4.75	No4	1320	100	1515	50
2.36	No8	1055	80	197	6
2.0	No10				
1.18	No16	701	53	68	2
0.6	No30	470	36	44	1
0.425	No40				
0.3	No50	312	24	34	1
0.25	No60	296	22	28	1
0.18	No80				
0.15	No100				
0.075	No200	192	14.5	20	0.7

Απάντηση/Λύση

(α) Δώστε τα διαγράμματα κοκκομετρικής διαβάθμισης κάθε κλάσματος.

⁸ Επιμέλεια από τον Αλέξανδρο Παπαγιάννη, MMM/ΕΜΠ



Σχήμα 3-24. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

(β) Προσδιορίστε την αναλογία των δύο κλασμάτων για διαβάθμιση των αδρανών εντός της ζώνης Ε, με μέγιστο κόκκο 10mm. Τα όρια της ζώνης Ε δίνονται από τον επόμενο πίνακα.

Πίνακας ορίων ζώνης Ε σύμφωνα με τον ΚΤΣ'97

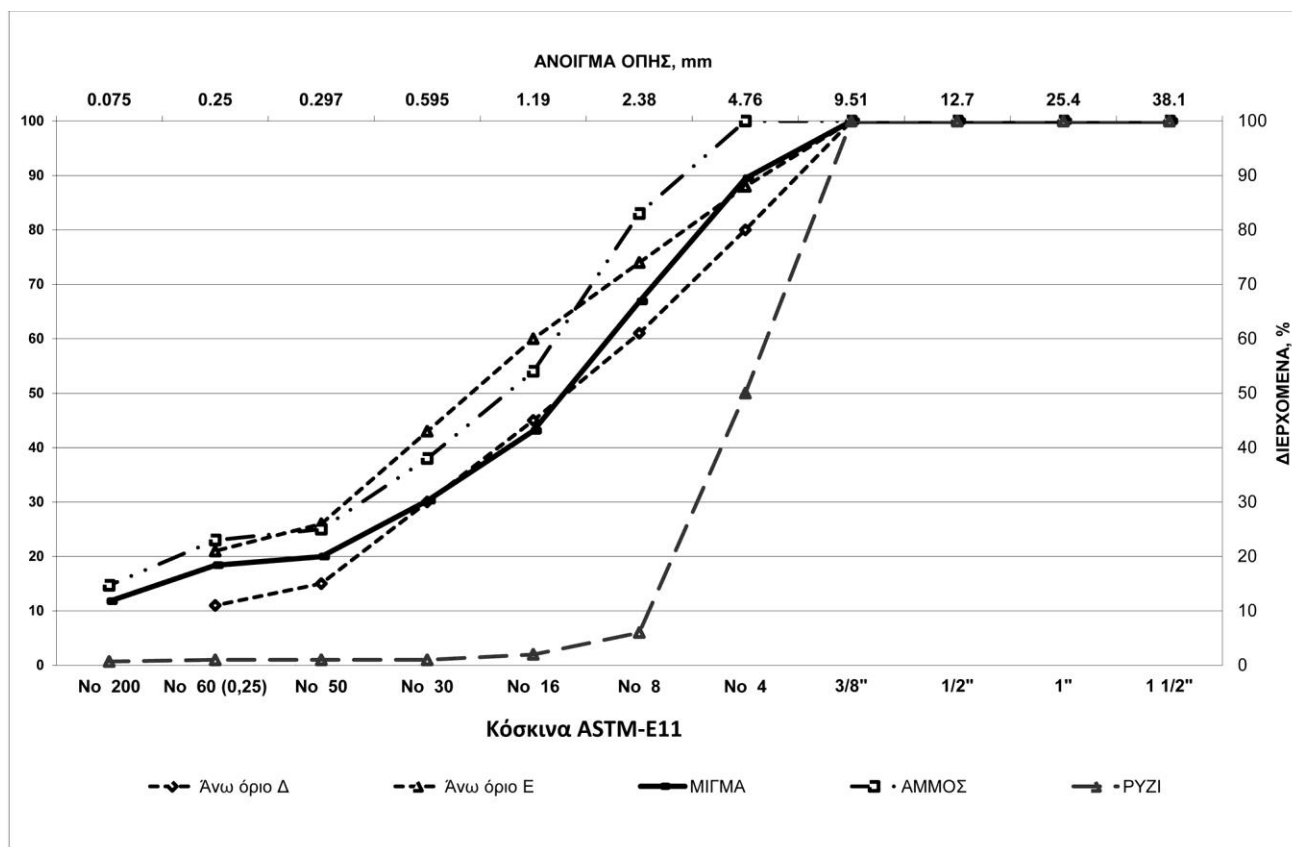
Ανοίγμα	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.25	(0.075)
Ονομασία	3/8	No4	No8	No16	No30	No50	(No60)	(No200)
Άνω όριο	100	88	74	60	43	26	21	-
Κάτω όριο	100	80	61	45	30	15	11	-

Επιλέγουμε ποσοστά του κάθε κλάσματος ξεκινώντας από 75% άμμο και 25% ρύζι, και υπολογίζουμε κάθε φορά την κοκκομετρική καμπύλη μέχρις ότου αυτή βρεθεί εντός της ζώνης Ε. Στον επόμενο πίνακα επιλέγονται τα ποσοστά κάθε κλάσματος ώστε το μείγμα να βρίσκεται εντός της ζώνης Ε.

Πίνακας κοκκομετρικής σύνθεσης αδρανών σκυροδέματος

ΚΟΣΚΙΝΑ No	% ΜΙΓΜΑΤΟΣ				ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙ ΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ ΟΡΙΟ ΚΑΜΠΥ ΛΗΣ Ε	ΑΝΩ ΟΡΙΟ ΚΑΜΠΥΛ ΗΣ Ε
	ΣΚ ΥΡ Α	ΓΑΡ ΜΠ ΙΛΙ	ΡΥΖΙ	ΑΜΜΟΣ			
	%	%	%	%			
	0	0	21	79			
1 1/2"			100	100	100.0	100	100
1"			100	100	100.0	100	100
1/2"			100	100	100.0	100	100
3/8"			100	100	100.0	100	100
No 4			50	100	89.5	80	88
No 8			6	83	66.8	61	74
No 16			2	54	43.1	45	60
No 30			1	38	30.2	30	43
No 50			1	25	20.0	15	26
No 60 (0.25)			1	23	18.4	11	21
No 200			0.7	14.7	11.8		

Στο Σχήμα 3-25 δίνεται το διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης του μείγματος αδρανών μαζί με τη διαβάθμιση κάθε μείγματος και τα όρια της ζώνης Ε.



Σχήμα 3-25. Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών.

(γ) Δώστε μια σύνθεση του σκυροδέματος C20/25.

Επιλέγουμε ποσότητα τσιμέντου 500 kg/m^3 . Αυτά αντιστοιχούν σε $500/3.1=161.3 \text{ l}$ τσιμέντο.

Επιλέγουμε λόγο N/T 0.40, οπότε η ποσότητα του νερού είναι $0.40 \times 500=200 \text{ kg}$ ή 200 l .

Συνολικός όγκος: $161.3+200=361.3 \text{ l}$ τσιμέντο και νερό.

Αδρανή: $1000-361.3=638.7 \text{ l}$. Κατανέμονται σε:

Άμμο $79\% \times 638.7=504.6 \text{ l}$ ή $504.6 \times 2.70=1362.3 \text{ kg}$

Ρύζι $21\% \times 638.7=134.1 \text{ l}$ ή $134.1 \times 2.68=359.5 \text{ kg}$.

Ο επόμενος πίνακας δίνει τη σύνθεση του σκυροδέματος.

Τσιμέντο	Άμμος	Ρύζι	Νερό (θα εκτοξευθεί)
500	1362.3	359.5	200

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί υγρός αργιλικός επιταχυντής για άμεση πήξη.

(δ) Προδιαγράψετε τον απαιτούμενο εξοπλισμό.

Χειρωνακτικός λόγω μικρού χώρου και μικρών απαιτήσεων σε σκυρόδεμα.

(ε) Δώστε την απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης.

Υπολογίζουμε τον όγκο που πρέπει να πληρωθεί, ως το γινόμενο του μήκους της περιμέτρου που θα πληρωθεί επί το πάχος επί το μήκος του βήματος προχώρησης. Σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί ένα ποσοστό λόγω της αναπήδησης και άλλων απωλειών.

Περίμετρος= $2.5+2.5+3=8\text{m}$. Πάχος 0.05m . Βήμα προχώρησης 2m . Άρα ο όγκος τοποθετημένου σκυροδέματος είναι:

$$V_{\text{επένδυσης}} = 8 \times 0.05 \times 2 = 0.8 \text{ m}^3$$

Λαμβανομένων υπόψη και των απωλειών κατά την εκτόξευση και την αναπήδηση ~20% θα παρασκευαστεί υλικό για ψεκαζόμενο όγκο σκυροδέματος:

$$V_{\text{ψεκαζόμενος}} = \frac{0.8}{1 - 20\%} = 1 \text{ m}^3$$

Κριτήριο αξιολόγησης 2⁹

Πεταλλοειδής σήραγγα πλάτους εκσκαφής 6m και ύψους 6m, διανοίγεται σε βήματα μήκους 2m. Η σήραγγα ανά βήμα επενδύεται στα πλευρά και τη στέψη με εκτοξευμένο σκυρόδεμα υγρής μίξης, πάχους 100mm σε μία στρώση. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C25/30. Παρέχονται δύο κλάσματα αδρανών, άμμος και ρύζι, που δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

(α) Δώστε μια σύνθεση του σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη ότι:

Η ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου ($\epsilon\beta=3.1$) θα είναι: 400kg/m³

Ο συνολικός λόγος N/Ta θα είναι 0.52

Το ποσοστό κλάσματος άμμου ($\epsilon\beta=2.70$) θα είναι 75%

Ποσοστό κλάσματος ρυζιού ($\epsilon\beta=2.68$) θα είναι 25%

Θα χρησιμοποιηθεί αναστολέας ενυδάτωσης ($\epsilon\beta=1.14$) 0.6% κβ τσιμέντου

Θα χρησιμοποιηθεί ρευστοποιητής ($\epsilon\beta=1.05$) 0.7% κβ τσιμέντου.

(β) Τι είδους επιταχυντής θα χρησιμοποιηθεί;

(γ) Επιλέξτε τον απαιτούμενο εξοπλισμό.

(δ) Αν το μήκος της ψεκαζόμενης περιμέτρου είναι 18m και η εκτιμώμενη αναπήδηση (και λοιπές απώλειες) 10%, δώστε την απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης.

Απάντηση/Λύση

(α) Δώστε μια σύνθεση του σκυροδέματος ανά m³.

Επιλέγουμε ποσότητα τσιμέντου 420 kg. Αυτά αντιστοιχούν σε 420/3.1=135.5 l τσιμέντο.

Επιλέγουμε λόγο N/T 0.52, οπότε η ποσότητα του νερού είναι 0.52×420=218.4 kg ή 218.4 l.

Αναστολέας ενυδάτωσης 0.6% κβ τσιμέντου, οπότε η ποσότητά είναι: 0.6%×420=2.52kg ή 2.52/1.14=2.2 l.

Ρευστοποιητής 0.7% κβ τσιμέντου, οπότε η ποσότητα είναι: 0.7%×420=2.94kg ή 2.94/1.05=2.80 l.

Συνολική μάζα: 420+218.4+2.52+2.94=643.86 kg.

Συνολικός όγκος: 135.5+218.4+2.2+2.8=358.9 l.

Αδρανή: 1000-358.9=641.1 l. Κατανέμονται σε

Άμμο 75% ×641.1=480.8 l ή 480.8×2.70=1298.2 kg

Ρύζι 25%×641.1=160.3 l ή 160.3×2.68=429.6 kg.

Πίνακας. Σύνθεση σκυροδέματος σε kg/m³

Άμμος	Ρύζι	Τσιμέντο	Νερό	Αναστολέας	Ρευστοποιητής
1298.2	429.6	420	218.4	2.52	2.94

(β) Τι είδους επιταχυντής θα χρησιμοποιηθεί;

Θα χρησιμοποιηθεί επιταχυντής ελεύθερος αλκαλίων, καθόσον δίνει μεγαλύτερη τελική αντοχή του σκυροδέματος και καλύτερες συνθήκες εργασίας.

(γ) Επιλέξτε τον απαιτούμενο εξοπλισμό

Θα χρησιμοποιηθεί ρομπότ, το οποίο ανταποκρίνεται στο μεγάλο ύψος της σήραγγας, έχει δυνατότητα ψεκασμού της μεγάλης επιφάνειας εργασίας, επιτυγχάνει καλύτερη συμπίκνωση του σκυροδέματος, και ολοκληρώνει τις εργασίες με ταχύτητα.

⁹ Επιμέλεια από τον Αλέξανδρο Παπαγιάννη, MMM/ΕΜΠ

(δ) Δώστε την απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης

Για τον υπολογισμό του όγκου υπολογίζουμε την περίμετρο της επενδυμένης σήραγγας την οποία πολλαπλασιάζουμε με το πάχος της επένδυσης και το βήμα προχώρησης, προκειμένου να υπολογίσουμε τον όγκο του σκυροδέματος. Άρα,

$$V_{\text{επένδυσης}} = 18 \times 0.1 \times 2 = 3.6 m^3$$

Για αναπήδηση 10%

$$V_{\text{ψεκαζόμενος}} = \frac{3.6}{1 - 10\%} = 4 m^3$$

Το σκυρόδεμα θα έρθει στο μέτωπο με μία βαρέλα η οποία θα περιέχει τον παραπάνω όγκο σκυροδέματος.

Ασκήσεις εμπέδωσης

Άσκηση 1.

Είναι διαθέσιμα θραυστά αδρανή λατομείου σε δύο κλάσματα Α και Β, που αντιστοιχούν σε θραυστή άμμο και γαρμπίλι, με φαινόμενη πυκνότητα 2.7 kg/lt, ενυπάρχουσα υγρασία 4% και 2% αντίστοιχα, και διαβάθμιση όπως στον πίνακα:

Άνοιγμα (mm) κοσκίνου	0.25	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	12.5	19
Κλάσμα Α	24	27	43	61	84	100	100	100	100
Κλάσμα Β				1	2	3	58	97	100

Για την παρασκευή εκτοξευόμενου σκυροδέματος τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης του μείγματος των θραυστών αδρανών πρέπει να βρίσκεται εντός των υποζωνών Δ και Ε των πινάκων των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων του Κ.Τ.Σ.-97, και συνίσταται η υποζώνη Ε με μέγιστος κόκκο αδρανών 16 mm. Ο λόγος νερού: τσιμέντο δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 0.55. Ζητείται η σύνθεση εκτοξευόμενου σκυροδέματος C30/37 για υγρή εκτόξευση, κατηγορίας τσιμέντου CEM I42.5 με περιεκτικότητα 425 kg σε 1 m³ μείγματος.