

## Κεφάλαιο 4

### 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)

## 4. Επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα<sup>5</sup>

### 4.1 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 gunitite ή sprayed concrete). Ο όρος gunitite (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 gunitite,
- 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 ιών 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 συμπίκνωση του υπολοίπου πάχους. Κατά τη δημιουργία του αρχικού στρώματος μέρος των

<sup>5</sup> Το παρόν κεφάλαιο συγγράφηκε σε συνεργασία με τον Μ. Μιχαηλίδη, ΧΜ/ΕΜΠ.

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 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 ανακατευθυσή, 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.

## 4.2 Ορισμοί σύμφωνα με την ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-12-03-02-00<sup>6</sup>

### 4.2.1 Γενικοί

- *Αναπήδηση* (rebound) του εκτοξευμένου σκυροδέματος ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μέρος των εκτοξευμένων 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 εκτοξευμένου σκυροδέματος.

### 4.2.2 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 σάκους 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.

### 4.2.3 Μέθοδοι κατασκευής

- *Ακροφύσιο* ορίζεται η διάταξη απόληξης της σωλήνας μεταφοράς του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Η διάταξη αποτελείται από μονάδα ανάμειξης, στην οποία, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, εισπνέονται εντός της ροής του βασικού αναμειγματος νερό, πιεσμένος αέρας ή/και πρόσθετα και πρόσμικτα.
- *Μεταφορά αραιής ροής* ορίζεται η μεταφορά του βασικού ξηρού ή υγρού αναμειγματος μέσω σωληνώσεων σε ένα συνεχές ρεύμα υψηλής πίεσης αέρα προς το ακροφύσιο και όπου η δύναμη και η

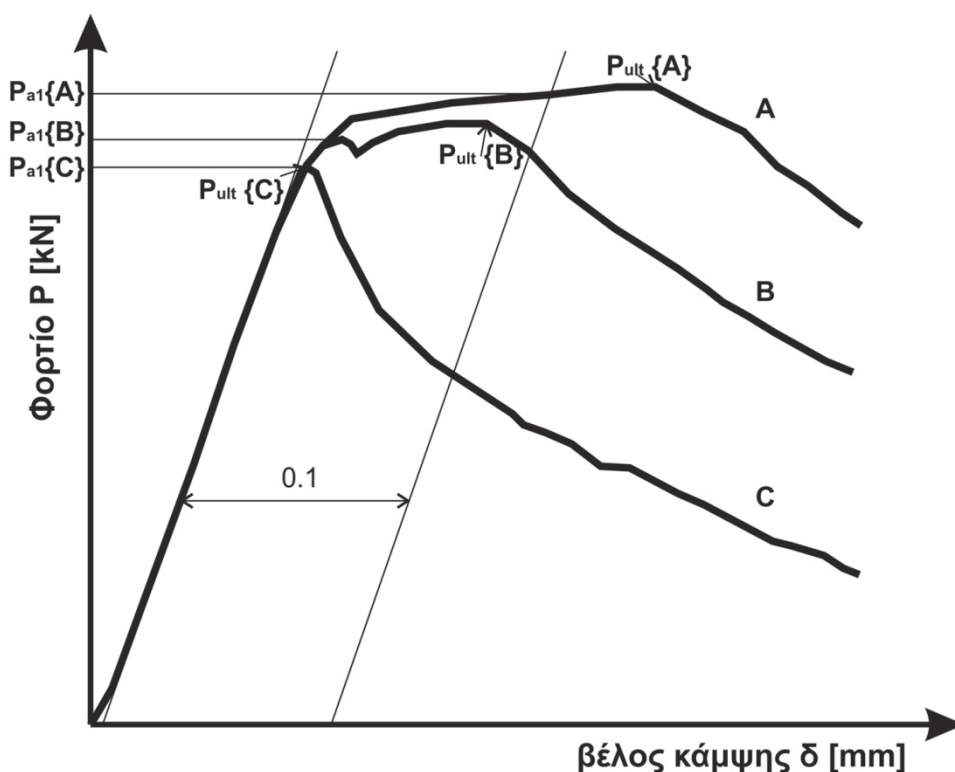
<sup>6</sup> Με μικρές διαφοροποιήσεις από τον συγγραφέα.

ενέργεια μεταφοράς χρησιμοποιείται για την εκτόξευση και συμπύκνωση του αναμείγματος. Πρακτικά, η τεχνική εφαρμόζεται στην ξηρή μέθοδο μόνο.

- *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.

#### 4.2.4 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 4-1) 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 4-1) 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 4-1. 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 4-1), όπως καταγράφεται σε μία καμπυλική 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  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , αντίστοιχα.
- *Προδιαγραμμένη 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 πτωχής συμπίκνωσης 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.

#### 4.2.5 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 προδιαγραμμένων 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 προδιαγραμμένες 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 προδιαγραμμένες απαιτήσεις στη νωπή και σκληρυμένη κατάσταση.

#### 4.3 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 συμπίκνωσης, 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 συμπίκνωσης. 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.

### 4.3.1 Συνήθη υλικά

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

#### 4.3.1.1 Τσιμέντο

Τσιμέντα Portland, που συμφωνούν με τις απαιτήσεις του EN 197-1 (Πίνακας 4-1), 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 ( $C_3A$ ) να είναι μεγαλύτερο από 5% και η ειδική επιφάνεια Blaine να είναι μεγαλύτερη από  $400\text{m}^2/\text{kg}$ . 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 προδιαγραφεται εναλλακτικά τσιμέντο CEM II σε περιεκτικότητα  $400\text{-}450\text{kg}/\text{m}^3$ , 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  $300\text{kg}/\text{m}^3$  (EFNARC, 1996). Συνήθως η ποσότητά του επιλέγεται να είναι  $350\text{-}450\text{kg}/\text{m}^3$ . 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  $350\text{-}400\text{kg}/\text{m}^3$ , αρκεί να είναι διαθέσιμη η κατάλληλη άμμος με υψηλή ποσότητα παιπάλης (Μιχαηλίδης, 2015).

Πίνακας 4-1. 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		

#### 4.3.1.2 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 4-2). Διακρίνονται (α) σε υδραυλικά<sup>7</sup> και ποζολανικά,<sup>8</sup> 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  $400\text{-}500\text{m}^2/\text{kg}$  Blaine, αναπτύσσει ικανοποιητικές υδραυλικές ιδιότητες.

<sup>7</sup> Συνδετικά (τσιμεντικά) υλικά που πήζουν και σκληρύνονται μέσω χημικής αντίδρασης με το νερό, ακόμη και μέσα σε αυτό.

<sup>8</sup> Πυριτικά υλικά που δεν έχουν από μόνα τους υδραυλικές ιδιότητες αλλά παρουσία υγρασίας αντιδρούν χημικά με το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  για να αναπτυχθούν ενώσεις που έχουν υδραυλικές ιδιότητες.

Είναι φτηνή, και αποτελεί εξαιρετικό πληρωτικό (filler), μειώνει όμως την πολύ πρώιμη αντοχή. Συχνά βελτιώνει την ανθεκτικότητα του εκτοξευμένου σκυροδέματος.

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 4-2. Χαρακτηριστικά τσιμέντου - προσθέτων στο ψεκαζόμενο σκυρόδεμα (Höfler et al., 2011)

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

+ βελτίωση, - επιδείνωση

Η πυριτιακή παιπάλη (EN 13263) είναι παραπροϊόν των επαγωγικών τοξοτών κλιβάνων στις βιομηχανίες παραγωγής μετάλλων πυριτίου και σιδηροπυριτικών κραμάτων. Συνίσταται από κόκκους άμορφου διοξειδίου του πυριτίου με πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια, 20-35m<sup>2</sup>/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 πρώιμη 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).

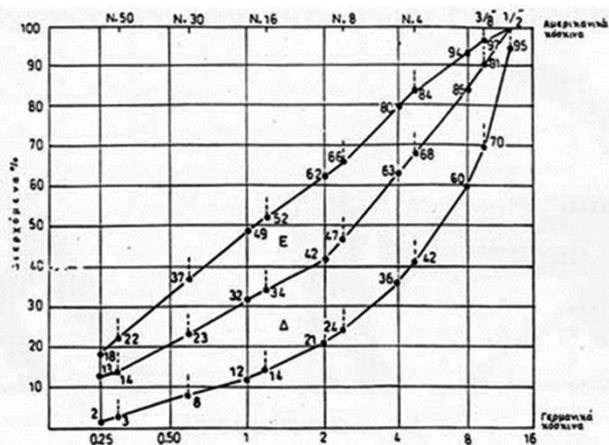
#### 4.3.1.3 Νερό

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.

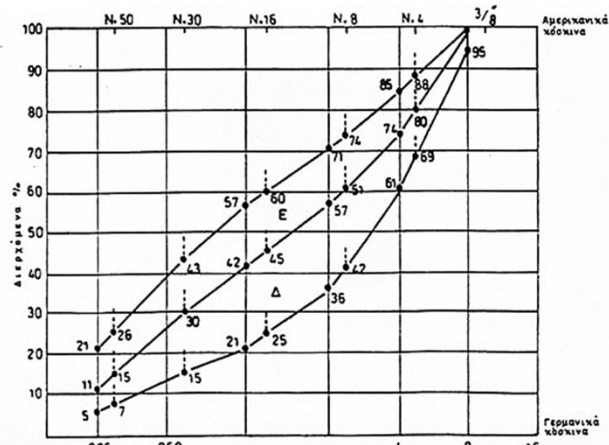
#### 4.3.1.4 Αδρανή

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 4-2 α, β): συνιστάται η ζώνη Ε (ΚΕΔΕ, 1999). Στο Σχήμα 4-2γ δίνονται τα όρια της διαβάθμισης που προτείνονται από την EFNARC (1996). Εικόνα της διαβάθμισης των αδρανών φαίνεται στο Σχήμα 4-2δ. 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 ρυολιθικούς 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.



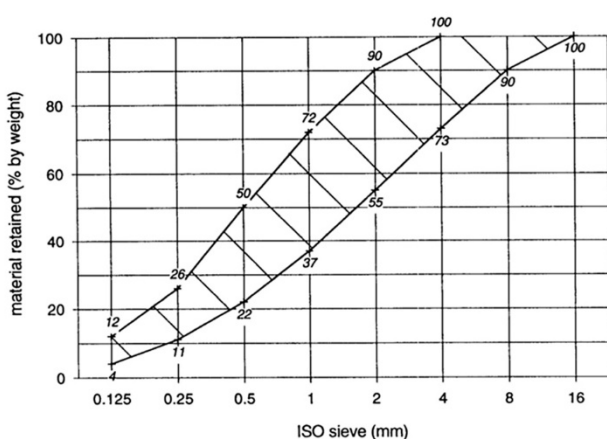
Διάγραμμα III: Ορια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μεγίστου κόκκου □ 16 ή 1/2".

(α) ΚΤΣ, 1997 (ΦΕΚ 315)



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

(β) ΚΤΣ, 1997 (ΦΕΚ 315)



(γ) EFNARC, (1996)

Σχήμα 4-2. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών



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

#### 4.3.1.5 Λεπτά αδρανή (filler)

Τα λεπτά υλικά ακολουθούν την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 206-1. Λειτουργούν ως λιπαντικά στο νωπό σκυρόδεμα, και γι' αυτό προστίθενται στο μίγμα, στο κλάσμα  $-0.125\text{mm}$ , που μαζί με το τσιμέντο και τα πρόσθετα επιτελούν το σκοπό αυτό. Μειώνουν επίσης τον κίνδυνο διαχωρισμού του μίγματος κατά την τοποθέτηση και η συμπύκνωση 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.

#### 4.3.2 Πρόσμικτα (admixtures)

Τα πρόσμικτα ακολουθούν την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 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  $32\text{ kg/m}^3$ .

##### 4.3.2.1 Επιταχυντές

Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω της εφαρμογής του με ψεκάσμο, υπάρχουν δύο απαιτήσεις. Ως νωπό σκυρόδεμα απαιτείται να έχει πολύ καλή εργασιμότητα, και αντλησιμότητα. Αντίθετα, μετά τον ψεκάσμο 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 αποκτή γρηγορότερα αντοχή και να μπορεί να φέρει φορτία της σήραγγας σε πρώιμα στάδια της διάνοιξης. 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 σημασία έχει 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 4-3 δίνει τις κύριες ιδιότητές τους.

#### 4.3.2.1.1 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 θειικού 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, καθώς οι ανθρωπίνι 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 ετρινγκίτη. Αυτή η άμεση εκκίνηση της κατακρήμνισης του ετρινγκίτη, 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 νερό 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 4-3. 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 <sub>2</sub> O	20%	12%	<1%
Πολύ πρόωμη αντοχή για την ίδια δόση	++++	++++	++
Τελική αντοχή	+	--	+++
Υδατοστεγανότητα	++	--	+++
Έκπλυση	---	--	-
Υγιεινή	---	-	+++
Ασφάλεια μεταφοράς	--	-	+++

+ βελτίωση, - επιδείνωση

#### 4.3.2.1.2 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 4-3). 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 πρόωμη 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 εκτοξευμένου 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.

#### 4.3.2.1.3 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 πρόωμη αντοχή στις 24 ώρες, για το ίδιο μίγμα με αλκαλικό νατριούχο επιταχυντή φτάνει τα ~12 MPa και με μη αλκαλικό τα ~20 MPa (Πίνακας 4-4). 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 4-4. 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

#### 4.3.2.2 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.

#### 4.3.2.3 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.

#### 4.3.2.4 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÷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÷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÷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.

#### 4.3.2.5 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.

#### 4.3.2.6 Αερακτικά

Στην περίπτωση που το εκτοξευμένο 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 διάστρωση.

#### 4.3.2.7 Οπλισμός

Όπως το συμβατικό σκυρόδεμα, έτσι και το εκτοξευμένο 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 εκτοξευμένου 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. Εκτοξευμένο 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<sup>3</sup> (ΕΛΟΤ ΤΟ 1501-12-03-02-0: 2009) ή 40 kg/m<sup>3</sup> (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.

### 4.4 Μέθοδοι μίξης

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

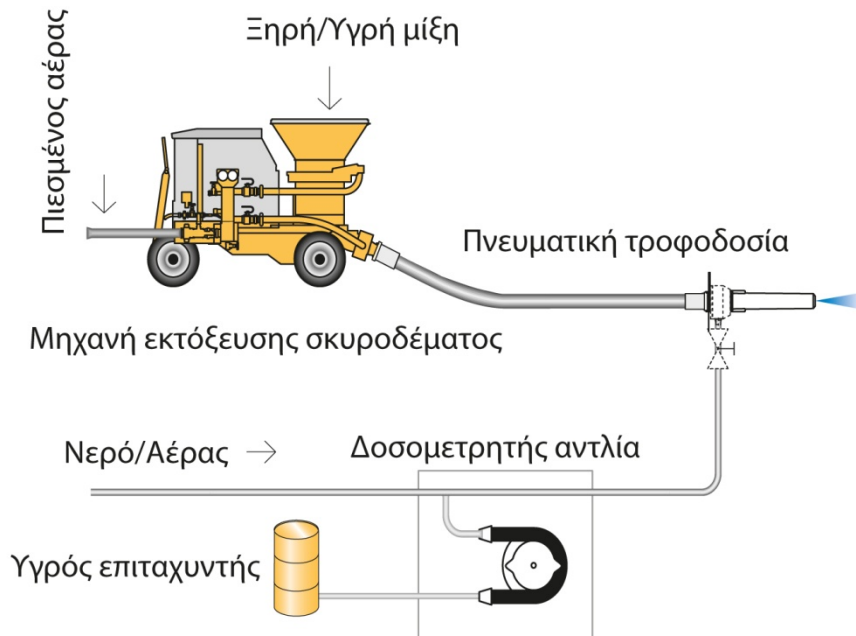
#### 4.4.1 Ξηρή μέθοδος

Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι τα ξηρά υλικά έρχονται ξέχωρα από τα υγρά στο ακροφύσιο, από όπου εκτοξεύονται. Το ξηρό μείγμα ύφυγρων 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%).

#### 4.4.1.1 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 4-3).



Σχήμα 4-3. 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 μείγματος. 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 4-5 δίνει τυπική σύνθεση για ποιότητα C30/37. Παρατηρούμε την αύξηση της αναλογίας τσιμέντου στο τελικό μείγμα, λόγω της αναπήδησης των αδρανών.

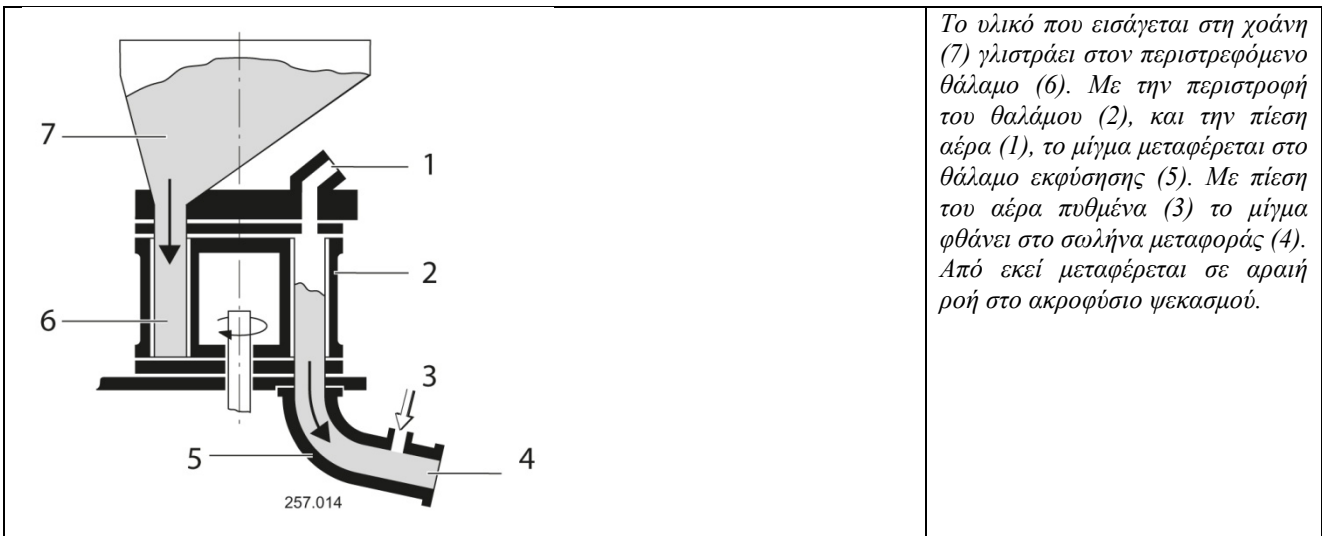
Πίνακας 4-5. Σύνθεση  $1m^3$  ξηρού μίγματος. C30/37, CEM I 42.5, 350kg/1000l αδρανών (Sika®, 2007)

		kg/l	kg	l
1	Τσιμέντο	3.15	280	89
2	Πυριτική 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 <sup>3</sup>	

#### 4.4.1.2 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 4-4) 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 μείγματος στο σωλήνα και στο ακροφύσιο. Η απόδοση των μηχανών εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο ακροφύσιο είναι από 5 έως 8 m<sup>3</sup>/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.



Το υλικό που εισάγεται στη χοάνη (7) γλιστράει στον περιστρεφόμενο θάλαμο (6). Με την περιστροφή του θαλάμου (2), και την πίεση αέρα (1), το μίγμα μεταφέρεται στο θάλαμο εκφύσησης (5). Με πίεση του αέρα πυθμένα (3) το μίγμα φθάνει στο σωλήνα μεταφοράς (4). Από εκεί μεταφέρεται σε αραιή ροή στο ακροφύσιο ψεκασμού.

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

#### 4.4.1.3 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 σκυροδέμα εκτοξεύεται από το ακροφύσιο με μεγάλη ταχύτητα στην επιφάνεια και η δύναμη κρούσης συμπυκνώνει 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 m<sup>3</sup>/h για εσωτερικές διαμέτρους σωλήνων 25 mm έως 28 m<sup>3</sup>/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 θα 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 σωλήνας 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.

#### 4.4.1.4 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 8-10m<sup>3</sup>/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.

#### 4.4.2 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.

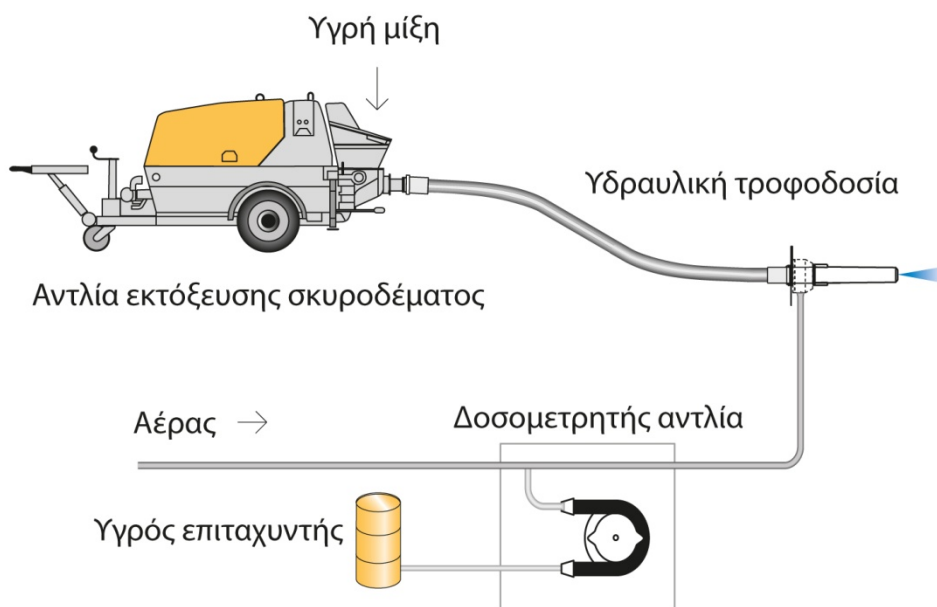
##### 4.4.2.1 Μεταφορά στο ακροφύσιο

Το νωπό σκυρόδεμα έρχεται στη μηχανή εκτόξευσης είτε ως έτοιμο (Σχήμα 4-5) 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 4-3), με ώθηση πιεσμένου αέρα, γενικά δεν εφαρμόζεται.

Κατά τη μέθοδο πυκνής ροής (Σχήμα 4-6), 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 4-5. Τροφοδότηση χοάνης της αντλίας (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009).



Σχήμα 4-6. 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 4-6. 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 εκτοξευόμενου σκυροδέματος, (β) την απαιτούμενη εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος, (γ) το διαθέσιμο εξοπλισμό παραγωγής, και (δ) το κόστος του. Ο Πίνακας 4-6 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 μείγματος επιβεβαιώνεται με δοκιμές. Η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών εξαρτάται από τα διαθέσιμα τοπικά υλικά, καθόσον η μεταφορά των μεγάλων ποσοτήτων τους είναι αντιοικονομική. Για τις ίδιες προδιαγραφές εκτοξευόμενου 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 4-7 δίνει μια σύνθεση μείγματος πριν την εκτόξευσή του.

Πίνακας 4-7. Σύνθεση 1m<sup>3</sup> μίγματος πριν την εισαγωγή των προσμίκτων

Μίγμα 1m <sup>3</sup>	Συνήθειες 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 4-8 δίνει τη σύνθεση του σκυροδέματος μετά την εκτόξευση ως επένδυση στον τοίχο, η οποία έχει ποσοτικά μεταβληθεί λόγω της αναπήδησης και της συμπίκνωσης.

#### 4.4.2.2 Εξοπλισμός

Για την αραιή ροή, δύναιται να χρησιμοποιηθεί μία περιστροφική μηχανή όπως αυτή στο Σχήμα 4-4. 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 4-8. 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

#### 4.4.2.3 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  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Κατά την υγρή εκτόξευση το κράτημα της ιδιαίτερα βαριάς σωλήνας (Σχήμα 4-7α) 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  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  προώθησε περαιτέρω την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων και τηλεχειριζόμενων συστημάτων εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Σχήμα 4-7β) (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 4-7. Εκτόξευση σκυροδέματος (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

#### 4.4.2.4 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 7-15m<sup>3</sup>/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.

#### 4.4.3 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 4-9 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 m<sup>3</sup>/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 4-9. 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 <sup>3</sup> /h)	Υψηλή (>10m <sup>3</sup> /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  $10 \text{ m}^3$  θα πρέπει να ψεκάζονται σε μία φάση, ώστε να καθιστούν την υγρή μέθοδο αποτελεσματική.

## 4.5 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.

### 4.5.1 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 ιών 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 4-8α). Λαμβάνονται κυβικά δοκίμια, ακμής 15cm (Μαρσέλλος, 2013), για τον έλεγχο σε θλίψη του νωπού σκυροδέματος.
- Έλεγχος εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος (Σχήμα 4-8β). Μετρείται με τον κόνο κάθισης, και είναι μεταξύ 12-20cm.



(α) Συμπύκνωση κυβικών δοκιμών σκυροδέματος ακμής 15cm  
Σχήμα 4-8. Πριν την εισαγωγή του επιταχυντή (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

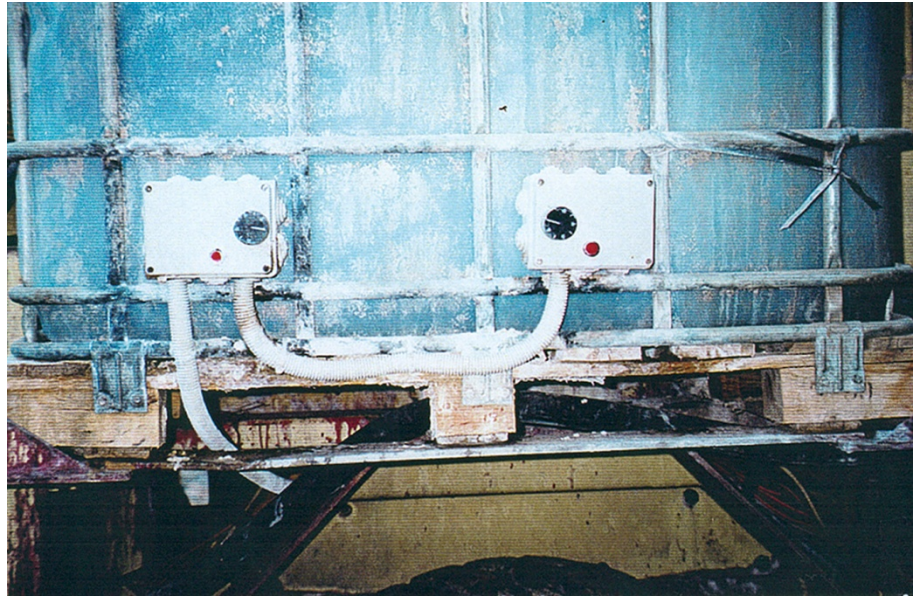


(β) Μέτρηση εργασιμότητας

- Μέτρηση θερμοκρασίας νωπού σκυροδέματος (Σχήμα 4-9β).
- Εξασφάλιση της κατάλληλης θερμοκρασίας επιταχυντή (Σχήμα 4-9α). 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

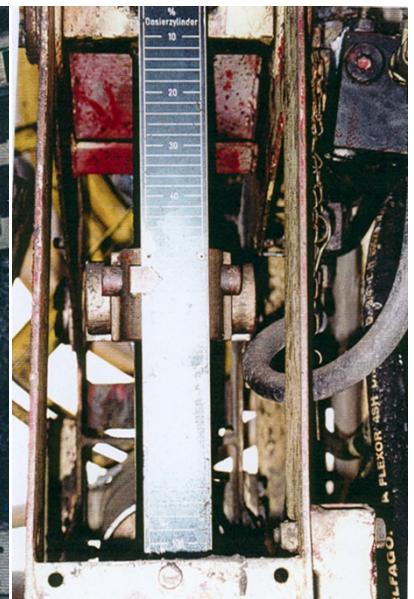
Σχήμα 4-9. Μετρήσεις θερμοκρασίας προ της εισόδου του επιταχυντή (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

- 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 4-10).



(α) Μέτρηση διαστάσεων δοχείου επιταχυντή

Σχήμα 4-10. Επιταχυντικό πρόσμικτο (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)



(β) Ένδειξη δοσομετρητή

- Τοποθέτηση πανέλων για δειγματοληψία εκτοξευμένου σκυροδέματος (Σχήμα 4-11).

Κατά την εκτόξευση γεμίζονται τα πανέλα (Σχήμα 4-11) 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 4-11. Το εκτοξευμένο σκυρόδεμα ελέγχεται με τη λήψη τελάρων πάχους 15cm, ακμής εσωτερικής 60cm και εξωτερικής 80cm, τα οποία πρέπει να γεμίζουν με μία στρώση (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

#### 4.5.2 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 μένει ανεπηρέαστο από την δράση του νερού λόγω διήθησης, υδροστατικής πίεσης ή διάβρωσης. Στη συνέχεια γεμίζονται οι υπερεκσκαφές και ψεκάζεται μια πρώτη σταθεροποιητική στρώση (Σχήμα 4-13β). 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 4-13γ) 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 υγραμμένη 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.

#### 4.5.3 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.

#### 4.5.4 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 διάτρωση για τον επόμενο κύκλο εκσκαφής, ώστε να παρεμποδίζεται η χαλάρωση με την πρώτη πήξη 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 σκυροδέμα. (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 κοιλοτήτων και φωλεών μέσα στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα 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 σκυροδέμα 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,  $\sim 6\text{cm} < \leq 10\text{cm}$ , και οι επόμενες είναι παχύτερες,  $5 \div 15\text{cm}$ . 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 σκυροδέμα 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 αλληπάλληλων 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 τη 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.

#### 4.5.5 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 4-12α). Η απόσταση του ακροφυσίου (Σχήμα 4-12β) 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 4-13β) στην προσπίπτουσα επιφάνεια και οπωσδήποτε όχι με γωνία μικρότερη από  $45^\circ$ . Όταν το ακροφύσιο κρατιέται σε πολύ μεγάλη γωνία από την κάθετη στην επιφάνεια, το σκυροδέμα 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 4-12β). 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 4-13) 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 4-12. Καθαρισμός του πετρώματος και σωστή απόσταση ψεκασμού (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE)



α. 1η στρώση σκυροδέματος για σταθεροποίηση μετά από το γέμισμα υπερεκσκαφών.

(β) Καθαρισμός από τη σκόνη μετά από διακοπές ψεκασμού

γ. 2η στρώση σκυροδέματος για σταθεροποίηση αφού απομακρυνθεί η σκόνη με νερό, μετά από διακοπή.

Σχήμα 4-13. Κανόνες ψεκασμού του σκυροδέματος (Χορήγηση από © Sika Hellas ABEE).

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  $45^\circ$  προς τις παρακείμενες επιφάνειες. Οι κατασκευαστικοί αρμοί και οι αρμοί διακοπής της εργασίας πρέπει να έχουν κλίση  $45^\circ$  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.



#### 4.5.6 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 (ΙΤΑ/ΑΙΤΕΣ, 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).

#### 4.6 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.

##### 4.6.1 Νωπό σκυρόδεμα

Κατά τη διαδικασία υγρής μείξης, πριν την εισαγωγή του επιταχυντή, λαμβάνονται κυβικά δοκίμια. Επίσης, ελέγχεται η εργασιμότητα με τον κώνο κάθισης (Σχήμα 4-8β), που θα πρέπει να είναι 12-20cm (S2-S4), και η θερμοκρασία του σκυροδέματος (Σχήμα 4-9α).

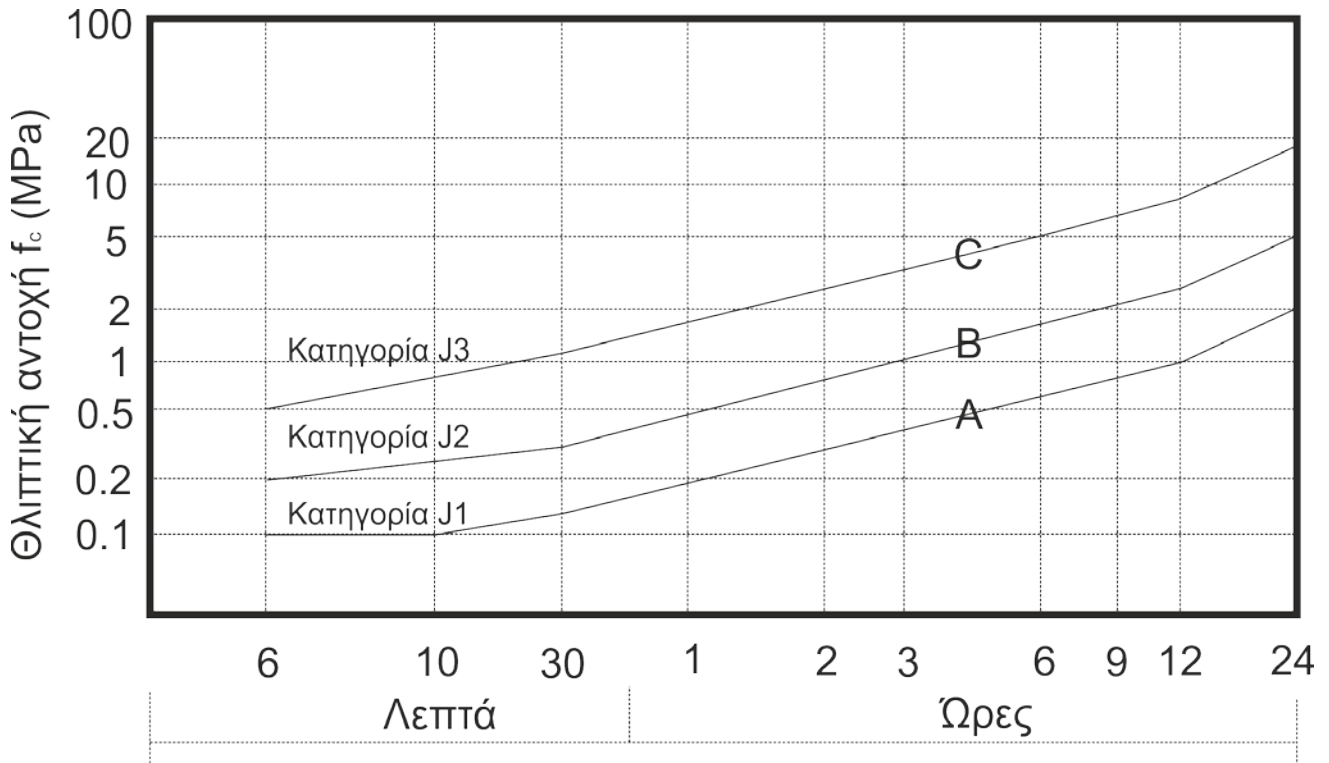
##### 4.6.2 Νεαρό σκυρόδεμα

Στο νεαρό σκυρόδεμα παρακολουθούμε τον χρόνο και την ομοιομορφία πήξης του στο τοίχωμα. Στις βαθιές εξορύξεις, η πρόωμη 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 πρόωμης αντοχής J1, J2 ή J3 σύμφωνα με το Σχήμα 4-14.

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 4-14. 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 4-15α).



(α) με βελόνα



(β) με καρφί

Σχήμα 4-15. 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 4-15β). Η μέθοδος της εξόλκευσης

ήλου (EN 12504-3:2005) είναι κατάλληλη ως μη καταστροφική δοκιμή για την εκτίμηση αντοχής >10MPa μετά από μία μέρα.

### 4.6.3 Σκληρυμένο σκυρόδεμα

Ενδεικτικές αντοχές παίρνουμε με καρότα από πανέλα (Σχήμα 4-16). Πραγματικές αντοχές παίρνουμε με καρότα από το πεδίο εφαρμογής Σχήμα 4-17. 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 4-16. Λήψη πυρήνων από τελέρα (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009).

#### 4.6.3.1 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 προδιαγραμμένη 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 4-17.

Από τα πανέλα που ελήφθησαν κατά την εκτόξευση λαμβάνονται (Σχήμα 4-16 αριστερά) κυλινδρικοί πυρήνες διαμέτρου 75mm (Σχήμα 4-16 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 4-17. Λήψη καρόντων από σήραγγα (Μιχαηλίδης & Γαρατζιώτης, 2009)

#### 4.6.3.2 Εφελκυστική αντοχή

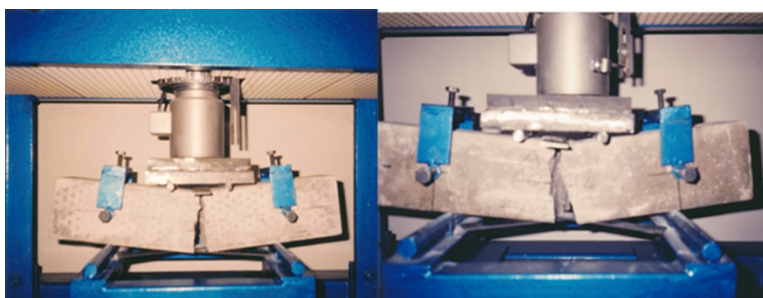
Η εφελκυστική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει σημαντική σημασία στην φέρουσα ικανότητά του, ιδιαίτερα σε τεμαχισμένα πετρώματα. Επειδή είναι πιο εύκολος ο ποιοτικός έλεγχος σε θλίψη, έχουν διατυπωθεί διάφορες σχέσεις μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής, όπως π.χ. ότι ο λόγος της πρώτης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

#### 4.6.3.3 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.

#### 4.6.3.4 Δυσθραυστότητα ινοπλισμένου σκυροδέματος

Για τον ποιοτικό έλεγχο του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Κατσικογιάννη et al., 2008), οι πιο διαδομένες δοκιμές είναι της δυσθραυστότητας σε δοκούς και πλάκες (Σχήμα 4-18). Οι δοκιμές σε πλάκες γενικά θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν καλύτερα τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος στις επενδύσεις σηράγγων.



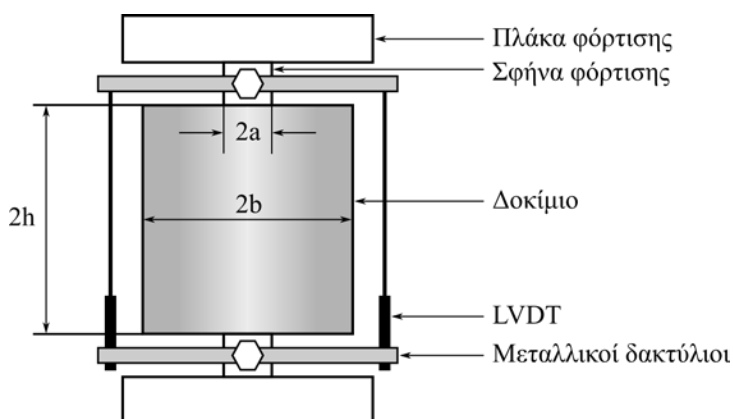
(α) Δοκιμή σε δοκό

Σχήμα 4-18. Δοκιμές δυσθραυστότητας (Κατσικογιάννη, 2004).

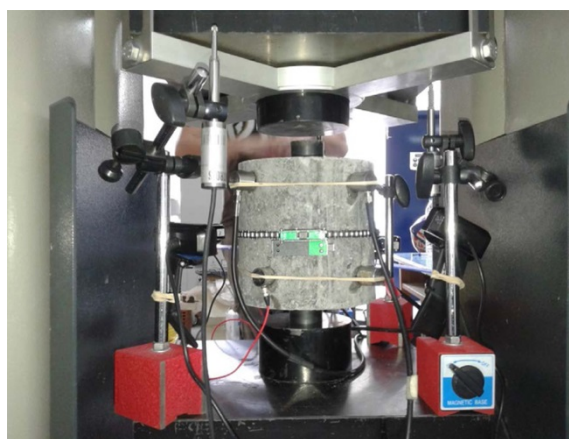


(β) Δοκιμή σε πλάκα

Μία απλούστερη δοκιμή είναι η BCN (Σχήμα 4-19). Είναι μια δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού που βασίζεται στη δοκιμή διπλής διάτρησης, η οποία προτάθηκε από τον Chen (1970). Ένα κυλινδρικό δοκίμιο από ινοπλισμένο σκυρόδεμα, με διάμετρο ίση με το ύψος του ίση με 15 cm υποβάλλεται σε θλίψη μέσω δύο χαλύβδινων κυλινδρικών σφηνών οι οποίες τοποθετούνται στο κέντρο της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου. Η αναλογία μεταξύ των διαμέτρων των σφηνών και του δοκιμίου είναι 1:4. Για τον προσδιορισμό της εκλυόμενης ενέργειας, το εφαρμοζόμενο φορτίο και η συνολική περιφερειακή παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD), η οποία μετρείται στο ήμισυ του ύψους του, καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Choumanidis, 2015). Η δοκιμή πραγματοποιείται με έλεγχο αξονικής μετατόπισης πλακών με ταχύτητα ίση με 500  $\mu\text{m}/\text{min}$ .



Σχήμα 4-19. Δοκιμή Barcelona



## 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 Nozzelman 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.
- Chen W (1970). "Double punch test for tensile strength of concrete", *ACI-Mater J*; 67:993–5.
- Choumanidis D, Nomikos P, Sofianos AI, Komninou E, Oikonomou P, Badogiannis E (2015). "Acoustic emission of fiber reinforced concrete under double-punching indirect tensile loading", *6th International Conference Emerging Technologies in Non-Destructive Testing ETNDT6 27-29 MAY, BRUSSELS, BELGIUM*
- 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<sup>R</sup> 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".
- Κατσοκογιάννη Π (2004). *Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, Εφαρμογές στην Ελλάδα*, ΔΕ, ΕΜΠ.
- Κατσοκογιάννη Π, Νομικός ΠΠ, Auxion G, Μιχαηλίδης Μ., Σοφιανός Α (2008). «Ποιοτικός Έλεγχος Ινοπλισμένου Σκυροδέματος στη Σηραγγοποιία», *1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων*, ΤΕΕ, Αθήνα.
- 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 1<sup>9</sup>

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/m<sup>3</sup> και κατά προτίμηση 500kg/m<sup>3</sup>. 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 E (Σχήμα 4-2β), με μέγιστο κόκκο 3/8". (γ) Δώστε μια σύνθεση του σκυροδέματος, (δ) Προδιαγράψετε τον απαιτούμενο εξοπλισμό. (ε) Δώστε την απαιτούμενη ποσότητα σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης.

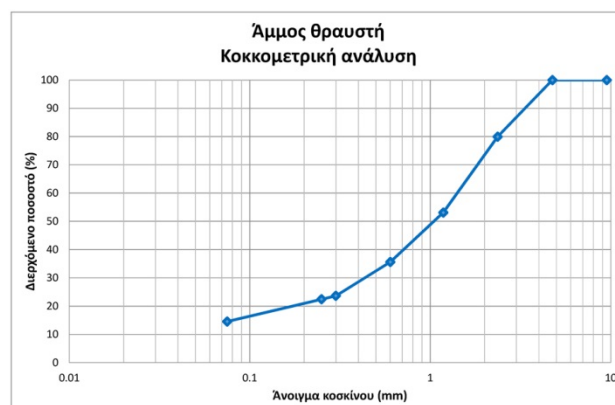
ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΣΚΙΝΟΥ (mm)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ	ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ			
		Άμμος θραυστή		Ρύζι θραυστό	
		(g)	(%)	(g)	(%)
75	3"				
63	2 ½ "				
50	2"				
37.5	1 ½ "	1320	100	3053	100
31.5	1 ¼ "				
25.0	1"	1320	100	3053	100
19.0	¾"				
16.0	5/8"				
12.5	1/2"	1320	100	3053	100
9.5	3/8"	1320	100	3053	100
6.3	1/4"				
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.

<sup>9</sup> Επιμέλεια από τον Αλέξανδρο Παπαγιάννη, MMM/EMΠ





Σχήμα 4-20. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

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

Πίνακας ορίων ζώνης E σύμφωνα με τον ΚΤΣ'97

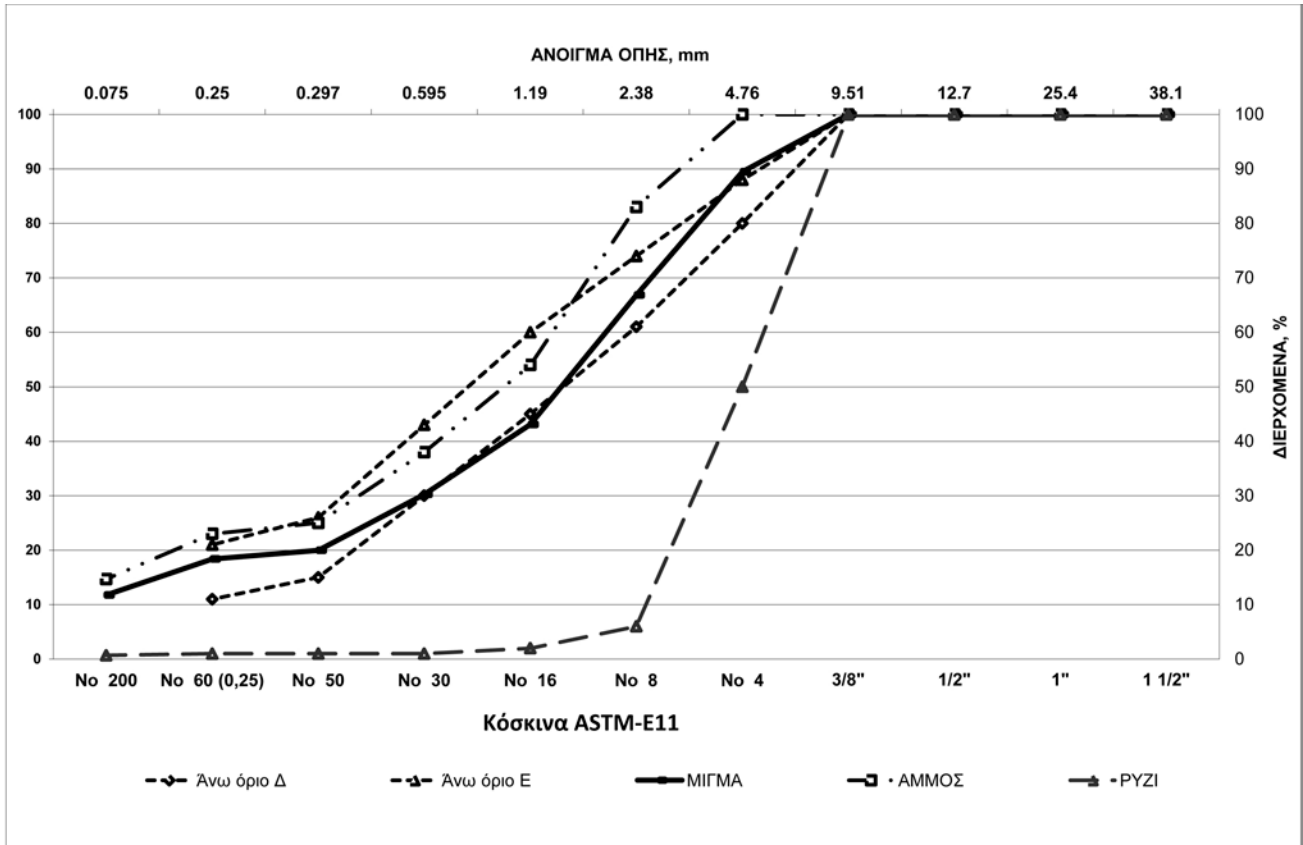
Άνοιγμα	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.25	(0.075)
Όνομασία	3/8	No4	No8	No16	No30	No50	(No60)	(No200)
Άνω όριο	100	88	74	60	43	26	21	-
Κάτω όριο	100	80	61	45	30	15	11	-

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 E. Στον επόμενο πίνακα επιλέγονται τα ποσοστά κάθε κλάσματος ώστε το μείγμα να βρίσκεται εντός της ζώνης E.

Πίνακας κοκκομετρικής σύνθεσης αδρανών σκυροδέματος

ΚΟΣΚΙΝΑ No	% ΜΙΓΜΑΤΟΣ				ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙ ΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ ΚΑΜΠΥ ΛΗΣ E	ΑΝΩ ΟΡΙΟ ΚΑΜΠΥΛ ΗΣ E
	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 4-21 δίνεται το διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης του μείγματος αδρανών μαζί με τη διαβάθμιση κάθε μείγματος και τα όρια της ζώνης E.



Σχήμα 4-21. Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών.

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

Επιλέγουμε ποσότητα τσιμέντου  $500 \text{ kg/m}^3$ . 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  $200 \text{ l}$ .

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  $0.05\text{m}$ . Βήμα προχώρησης  $2\text{m}$ . 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 2<sup>10</sup>

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:  $400 \text{ kg/m}^3$

Ο συνολικός λόγος N/Tα 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  $\text{m}^3$ .

Επιλέγουμε ποσότητα τσιμέντου 420 kg. Αυτά αντιστοιχούν σε  $420/3.1=135.5 \text{ l}$  τσιμέντο.

Επιλέγουμε λόγο N/T 0.52, οπότε η ποσότητα του νερού είναι  $0.52 \times 420 = 218.4 \text{ kg}$  ή  $218.4 \text{ l}$ .

Αναστολέας ενυδάτωσης 0.6% κβ τσιμέντου, οπότε η ποσότητά είναι:  $0.6\% \times 420 = 2.52 \text{ kg}$  ή  $2.52/1.14 = 2.2 \text{ l}$ .

Ρευστοποιητής 0.7% κβ τσιμέντου, οπότε η ποσότητα είναι:  $0.7\% \times 420 = 2.94 \text{ kg}$  ή  $2.94/1.05 = 2.80 \text{ l}$ .

Συνολική μάζα:  $420 + 218.4 + 2.52 + 2.94 = 643.86 \text{ kg}$ .

Συνολικός όγκος:  $135.5 + 218.4 + 2.2 + 2.8 = 358.9 \text{ l}$ .

Αδρανή:  $1000 - 358.9 = 641.1 \text{ l}$ . Κατανέμονται σε

Άμμο  $75\% \times 641.1 = 480.8 \text{ l}$  ή  $480.8 \times 2.70 = 1298.2 \text{ kg}$

Ρύζι  $25\% \times 641.1 = 160.3 \text{ l}$  ή  $160.3 \times 2.68 = 429.6 \text{ kg}$ .

Πίνακας. Σύνθεση σκυροδέματος σε  $\text{kg/m}^3$

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.

<sup>10</sup> Επιμέλεια από τον Αλέξανδρο Παπαγιάννη, MMM/EMΠ

(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,

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

Για αναπήδηση 10%

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

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/lit, ενυπόχουσα υγρασία 4% και 2% αντίστοιχα, και διαβάθμιση όπως στον πίνακα:

Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	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 m<sup>3</sup> μείγματος.