

## ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### ΔΡΟΛΙΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ – ΚΙΟΥΡΤΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τα κριτήρια συμμόρφωσης και τον ποιοτικό έλεγχο που εφαρμόζεται στις κατασκευές από Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα. Στην εισαγωγή δίδεται ο ορισμός του Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (Ε.Σ.) καθώς και οι παράγοντες που δυσχεραίνουν την τυποποίηση των ελέγχων. Στη συνέχεια ακολουθούν οι αρχές σύνθεσης του μίγματος, οι απαιτήσεις του τελικού προϊόντος, οι μέθοδοι ελέγχου αυτών των απαιτήσεων και τέλος η λογική που ακολουθείται για την οργάνωση του ποιοτικού ελέγχου. Σε όλη αυτή την παρουσίαση, έχει ακολουθηθεί η οργάνωση του Ευρωπαϊκού Κανονισμού Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος (EFNARC – European Specification for Sprayed Concrete). Στο τέλος κάθε υποενότητας γίνεται μία σύγκριση του παραπάνω Κανονισμού με το ελληνικό σχέδιο προδιαγραφής για το Ε.Σ.

#### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Ε.Σ.) είναι ένα μίγμα από τσιμέντο, αδρανή και νερό διαστρωμένο πνευματικά από ένα ακροφύσιο πάνω σε μια θέση έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια πυκνή και ομοιογενής μάζα. Το Ε.Σ. ενσωματώνει διάφορα πρόσμικτα, ενώ μπορεί επίσης να περιέχει πρόσθετα ή ίνες ή και συνδυασμό αυτών. Επίσης, το Ε.Σ. μπορεί να παρασκευαστεί με δύο διαδικασίες ανάμιξης: την υγρά και την ξηρά ανάμιξη.

Διαδικασία υγρής ανάμιξης είναι μια τεχνική στην οποία τσιμέντο, αδρανή και νερό είναι επεξεργασμένα και αναμεμιγμένα μαζί πριν τροφοδοτηθούν στην ειδική μηχανή από όπου θα μεταφερθούν διαμέσου σωλήνωσης σε ένα ακροφύσιο από το οποίο το μίγμα διαστρώνεται πνευματικά και συνεχώς σε μια θέση.

Διαδικασία ξηρής ανάμιξης είναι μια τεχνική στην οποία το τσιμέντο και τα αδρανή είναι επεξεργασμένα, αναμεμιγμένα και τροφοδοτημένα στην ειδική μηχανή στην οποία το μίγμα υπόκειται σε πίεση και τροφοδοτείται στο ειδικό ακροφύσιο όπου και αναμιγνύεται με νερό λίγο πριν την εκτόξευσή του.

Σε ότι αφορά στα κριτήρια συμμόρφωσης που θα πρέπει να επιβληθούν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καθώς και στην προσπάθεια ορισμού της αντοχής του, μπορούμε να αναφέρουμε την ύπαρξη αρκετών αστάθμητων παραγόντων οι οποίοι δυσχεραίνουν τέτοιες προσπάθειες τυποποίησης. Συγκεκριμένα, η τελική αντοχή καθώς και διάφορες μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από τα εξής:

- Την απόσταση του χειριστή από την σκυροδετούμενη επιφάνεια
- Την γωνία προσπτώσεως του υλικού
- Την αναλογία νερό / τσιμέντο (W / T) που ρυθμίζεται από τον χειριστή στην έξοδο του σωλήνα
- Την ταχύτητα εξόδου του υλικού που ρυθμίζεται από τον χειριστή της μηχανής αναμίξεως και από τον αεροσυμπιεστή.

Όπως λοιπόν αντιλαμβανόμαστε η σημασία των ποιοτικών ελέγχων καθ' όλη τη διαδικασία, από την παραγωγή μέχρι και την εκτόξευση, είναι πολύ σημαντική.

## 2. ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

### 2.1 Γενικά

Για την σύνθεση του μίγματος γίνεται αναφορά σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις από τον κανονισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για την καθορισμένη και προμελετημένη σύνθεση.

### 2.2 Προμελετημένα μίγματα

Το μίγμα πρέπει να σχεδιαστεί από τον εργολάβο έτσι ώστε να αναπτύξει την απαιτούμενη αντοχή και/ή άλλες προκαθορισμένες ιδιότητες (βλέπε παρακάτω). Οι προδιαγραφές για το σκυρόδεμα πρέπει να περιλαμβάνουν και επιπλέον απαιτήσεις σε ότι αφορά τα εξής:

- Ελάχιστο ποσοστό τσιμέντου
- Μέγιστος λόγος τσιμέντου προς νερό
- Καμπτική αντοχή
- Δυσθραυστότητα (ινοπλισμένο Ε.Σ.)
- Πρώιμη αντοχή
- Μέγιστη αντοχή
- Διαπερατότητα
- Απορρόφηση νερού
- Αντοχή πρόσφυσης

### 2.3 Καθορισμένα μίγματα

Ο εργολάβος προτείνει μία συγκεκριμένη σύνθεση μίγματος η οποία με βάση την εργοταξιακή εμπειρία είναι η καταλληλότερη για την συγκεκριμένη περίπτωση. Το καθορισμένο μίγμα σχεδιάζεται με βάση την εμπειρία στα παρακάτω στοιχεία:

- Τύπος του τσιμέντου και περιεκτικότητα
- Αναλογία τσιμέντου – νερού
- Αναλογία τσιμέντου – αδρανών
- Τύπος και περιεκτικότητα ινών
- Τύπος και περιεκτικότητα αδρανών, πρόσμικτων και πρόσθετων

Στο **Ελληνικό σχέδιο** δεν γίνεται διαφοροποίηση στην προσέγγιση της σύνθεσης των μιγμάτων σε προμελετημένα και καθορισμένα.



Εικόνα 1: Χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε υπόγεια σήραγγα (Shotcrete Magazine, Fall 2000)

### 3. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΟΪΟΝ

Ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός αναφέρεται σε 8 διαφορετικές ιδιότητες που μπορούν να ελεγχθούν έτσι ώστε να αξιολογηθεί το τελικό προϊόν. Βέβαια γίνεται και η αναφορά ότι ανάλογα με το έργο και με την χρήση του Ε.Σ. δεν χρειάζεται να ελεγχθούν όλες οι ιδιότητες αλλά μόνον αυτές που έχουν προσυμφωνηθεί στην σύμβαση του έργου. Στο **Ελληνικό σχέδιο** γίνεται εκτεταμένη αναφορά μόνο στην θλιπτική αντοχή.

#### 3.1 Θλιπτική αντοχή

Οι απαιτήσεις θλιπτικής αντοχής οδηγούν σε κατηγορίες εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά τα πρότυπα του EN 206 για το κλασσικό σκυρόδεμα. Έτσι υπάρχουν οι κατηγορίες εκτοξευόμενου σκυροδέματος π.χ. C 24/30, C32/40, C44/55 έτσι όπως ορίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Χαρακτηριστική αντοχή (MPa)							
Κατηγορία αντοχής	C24/30	C28/35	C32/40	C36/45	C40/50	C44/55	C48/60
Κυλινδρικά δοκίμια <sup>1</sup>	24	28	32	36	40	44	48
Κυβικά δοκίμια <sup>2</sup>	30	35	40	45	50	55	60

Πίνακας 1: Κατηγορίες αντοχής Ε.Σ.

Κατά τον επιτόπου έλεγχο της θλιπτικής αντοχής του Ε.Σ. τα δοκίμια που θα συλλεχθούν πρέπει να ικανοποιούν τις τιμές του παραπάνω πίνακα πολλαπλασιασμένες με τον μειωτικό συντελεστή 0.85 για να ληφθεί υπ' όψιν η μείωση της αντοχής λόγω διαταραχής των δοκιμίων κατά την κοπή ενώ για να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση του σχήματος στην αντοχή χρησιμοποιείται ο συντελεστής 0.80 για μετατροπή από κυβικά σε κυλινδρικά δοκίμια. Οι πυρήνες που λαμβάνονται θα έχουν 50 mm διάμετρο και 100 mm ύψος. Οι διορθωμένες τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Ελάχιστη θλιπτική αντοχή (MPa)							
Κατηγορία αντοχής	C24/30	C28/35	C32/40	C36/45	C40/50	C44/55	C48/60
Πυρήνας	20.5	24	27	30.5	34	37.5	41

Πίνακας 2: Επιτόπου απαιτούμενες αντοχές

Οι τιμές του πίνακα 2 παριστάνουν τον μέσο όρο από 3 δείγματα που συλλέχθηκαν στις 28 ημέρες (κατά το **Ελληνικό σχέδιο**, από κάθε πρισματικό δείγμα αποκόπτονται 2 πυρήνες). Κανένα δοκίμιο δεν πρέπει να δώσει αντοχή μικρότερη από το 75% του μέσου όρου (ενώ για το **Ελληνικό σχέδιο** κανένα δοκίμιο δεν πρέπει να δώσει αντοχή μικρότερη από το 85% του μέσου όρου).

Εάν χρειάζεται, η ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής μπορεί να ελεγχθεί με δοκίμια που συλλέγονται σε προκαθορισμένα διαστήματα. Καλό θα είναι επίσης να ληφθεί υπόψιν και η

<sup>1</sup> Κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων διαμέτρου/ύψους: 5/10 cm προερχόμενα από πυρήνες είτε από πανέλα, είτε από την κατασκευή.

<sup>2</sup> Κυβικά δοκίμια ελάχιστης διάστασης 6 x 6 x 6 cm προερχόμενα από πανέλα.

επίδραση των εργοταξιακών συνθηκών στην διαμόρφωση της τελικής αντοχής εφαρμόζοντας τις ίδιες μεθόδους συντήρησης στα δοκίμια όπως και στην κατασκευή.

Στο **Ελληνικό σχέδιο** αναφέρονται οι θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 15 x 15 x 15 cm (και όχι 6 x 6 x 6 cm). Η αντιστοιχία συμβολισμού είναι C24/30 για τον EFNARC και C<sub>s</sub>30 για το Ελληνικό σχέδιο ενώ και οι δύο κανονισμοί χρησιμοποιούν μειωτικούς συντελεστές για την μετρούμενη αντοχή λαμβάνοντας υπόψιν τους την διαταραχή των δοκιμίων κατά την κοπή τους (0.85 της ονομαστικής αντοχής κατά τον EFNARC και 1.17 της μετρηθείσας αντοχής κατά το Ελληνικό σχέδιο). Επίσης αναφέρεται ότι αν υπάρχουν στοιχεία τυπικής αποκλίσεως *s* που έχουν προκύψει από 60 τουλάχιστον διαδοχικά δοκίμια διαφορετικών αναμιγμάτων, που έγιναν με τα ίδια υλικά, τις ίδιες εγκαταστάσεις παραγωγής και για Ε.Σ. του οποίου η χαρακτηριστική αντοχή δεν διαφέρει περισσότερο από 7 MPa από εκείνη του υπόψιν έργου, τότε η απαιτούμενη αντοχή πρέπει να έχει τουλάχιστον την τιμή που υπολογίζεται από την σχέση:

$$f_a = f_{ck} + 2.14 s$$

Αν η τιμή της τυπικής απόκλισης που αναφέρθηκε έχει προκύψει από λιγότερα των 60 δοκιμίων όχι όμως και λιγότερα των 15, τότε η τιμή αυτή πριν εισαχθεί στην ανωτέρω σχέση, πρέπει να πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή του πίνακα 3. Αν η τιμή της τυπικής απόκλισης (μετά τον πολλαπλασιασμό της με τον αντίστοιχο συντελεστή του πίνακα 3) είναι μικρότερη από 3 MPa, τότε στην παραπάνω σχέση πρέπει να εισάγεται τιμή *s* = 3 MPa.

Αριθμός δοκιμίων	Συντελεστής πολλαπλασιασμού
15	1.27
20	1.18
30	1.09
40	1.05
50	1.02
60 ή περισσότερα	1.00

Πίνακας 3: Συντελεστής διόρθωσης της τυπικής απόκλισης

Για την παραγωγή των δειγμάτων και για την εκτέλεση των δοκιμών βλέπε παρακάτω (Μέθοδοι Ελέγχου).

### 3.2 Καμπτική αντοχή

Όπου απαιτείται καμπτική αντοχή αυτή προσδιορίζεται σχεδόν μονοσήμαντα από την κατάταξη του Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος σε κατηγορίες σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 4. Έτσι η ελάχιστη καμπτική αντοχή π.χ. για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κατηγορίας C 36/45 είναι 4.2 (MPa). Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται σε δοκίμια – δοκούς διαστάσεων 7.5 x 12.5 x 60 cm που διαμορφώθηκαν από πανέλα.

Ελάχιστη καμπτική αντοχή (MPa)			
Κατηγορία σκυροδέματος	C24/30	C36/45	C44/55
Καμπτική αντοχή	3.4	4.2	4.6

Πίνακας 4: Καμπτική αντοχή σε δοκίμια εκτοξευόμενου σκυροδέματος διαστάσεων 7.5 x 12.5 x 60 cm που διαμορφώθηκαν από πανέλα.

Για την παραγωγή των δειγμάτων και για την εκτέλεση των δοκιμών βλέπε παρακάτω (Μέθοδοι Ελέγχου).

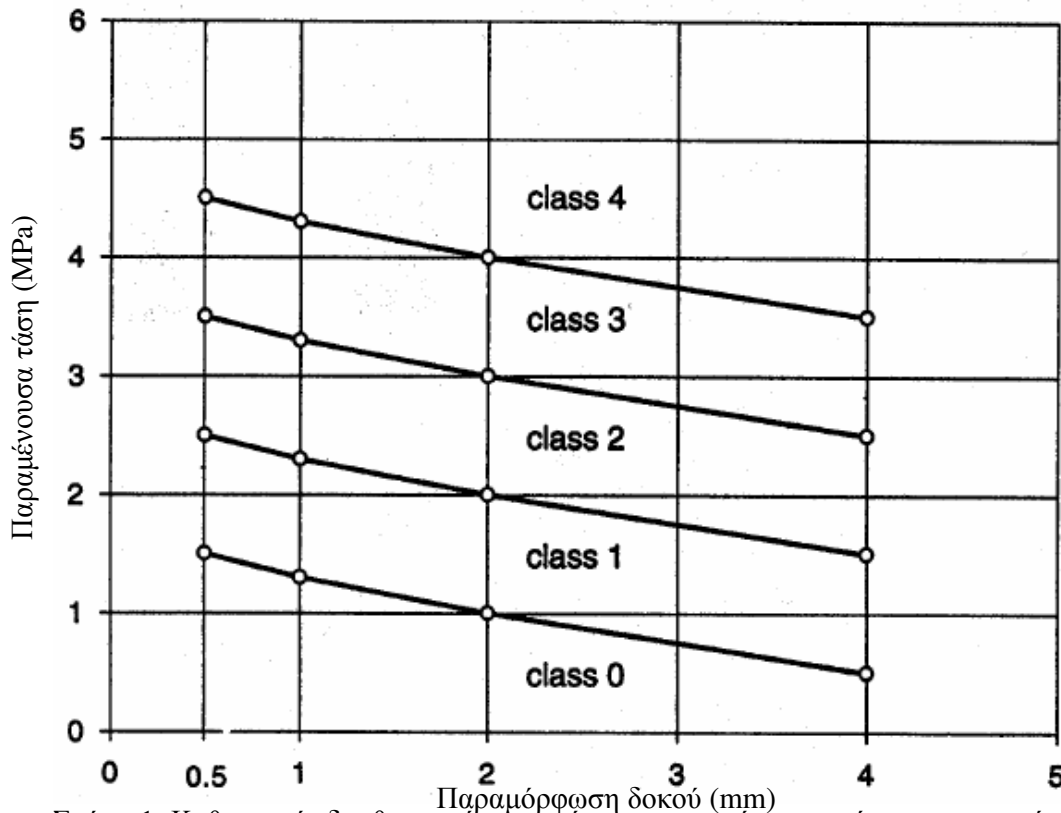
### 3.3 Δυσθραυστότητα (Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα)

Για τις ανάγκες προσδιορισμού της δυσθραυστότητας ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός προτείνει αυτή να εκφραστεί είτε σαν κατηγορία παραμένουσας αντοχής μέσω δοκιμών αντοχής σε κάμψη στα τρίτα σε δοκούς διαστάσεων 7.5 x 12.5 x 60 cm είτε σαν κατηγορία απορρόφησης ενέργειας μέσω δοκιμών σε διαξονική κάμψη πλακών διαστάσεων 60 x 60 x 10 cm. Οι δύο δοκιμές δεν δίνουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

➤ Έλεγχος παραμένουσας αντοχής (αντοχή σε κάμψη).

Υπάρχουν πέντε κατηγορίες παραμένουσας αντοχής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οι οποίες ορίζονται στο σχήμα 1 και στον πίνακα 5 που ακολουθούν με βάση την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης της δοκού. Ο πίνακας δίνει τα ακριβή όρια μεταξύ των πέντε κατηγοριών σε σχέση με την τάξη παραμόρφωσης που επιβάλλεται. Για την κατηγοριοποίηση του Ε.Σ. σε τουλάχιστον δύο από τις τρεις δοκούς που ελέγχονται η καμπύλη θα πρέπει να βρίσκεται πάνω από το όριο της κατηγορίας. Επίσης, σε καμία δοκό η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης δεν πρέπει να πέσει κάτω από το όριο της προηγούμενης κατηγορίας (με εξαίρεση την κατηγορία 1).

Η διαφοροποίηση σε τάξεις παραμόρφωσης δίνει την δυνατότητα στον σχεδιαστή να προσδιορίσει την παραμόρφωση που απαιτείται να επιβληθεί στον έλεγχο παραμένουσας αντοχής. Σε επίπεδο σχεδιασμού, η απόκλιση από τα όρια μιας τάξης μπορεί να εκφραστεί σε όρους ισοδύναμης γωνιακής στροφής ή ονομαστικού πλάτους ρωγμής δοκού φορτιζομένης στο μέσο της (π.χ. 1 mm αντιστοιχεί σε γωνία 0.25° ή σε ονομαστικό πλάτος 0.67 mm).



Σχήμα 1: Καθορισμός δυσθραυστότητας μέσω κατηγοριών παραμένουσας αντοχής για ινοπλισμένα εκτοξευόμενα σκυροδέματα.

Τάξη παραμόρφωσης	Παραμόρφωση δοκού (mm)	Παραμένουσα τάση (MPa) ανά κατηγορία			
		1	2	3	4
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Χαμηλή	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Κανονική	2	1.0	2.0	3.0	4.0
Υψηλή	4	0.5	1.5	2.5	3.5

Πίνακας 5

➤ Έλεγχος απορρόφησης ενέργειας

Για την περίπτωση ινοπλισμένων εκτοξευόμενων σκυροδεμάτων, μέσω της απορρόφησης ενέργειας, δίνονται 3 κατηγορίες σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 6.

Καθορισμός δυσθραυστότητας	Απορρόφηση ενέργειας για παραμόρφωση πλάκας μέχρι 25 mm (Joule)
a	500
b	700
c	1000

Πίνακας 6

Για την παραγωγή των δειγμάτων και για την εκτέλεση των δοκιμών βλέπε παρακάτω (Μέθοδοι Ελέγχου).

### 3.4 Μέτρο ελαστικότητας

Όταν το μέτρο ελαστικότητας (σε θλίψη, εφελκυσμό ή κάμψη) επηρεάζει την ικανότητα ή απαιτούμενη συμπεριφορά της κατασκευής, πρέπει να γίνεται επαλήθευση του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας. Εάν υπάρχουν απαιτήσεις για θερμική συστολή και διαστολή, θα πρέπει να καθορίζονται από τον σχεδιαστή.

### 3.5 Αντοχή πρόσφυσης

Εάν υπάρχουν απαιτήσεις για την αντοχή πρόσφυσης, οι τιμές που δίδονται στον πίνακα 7 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπόστρωμα από σκυρόδεμα ή βράχο.

Τύπος σκυροδέματος	Ελάχιστη αντοχή πρόσφυσης (MPa) προς το σκυρόδεμα	Ελάχιστη αντοχή πρόσφυσης (MPa) προς τον βράχο
Με δομικές λειτουργίες	0.5	0.1
Χωρίς δομικές λειτουργίες	1.0	0.5

Πίνακας 7

Οι τιμές του πίνακα 7 παριστάνουν τον μέσο όρο από 3 δείγματα που συλλέχθηκαν στις 28 ημέρες. Κανένα δοκίμιο δεν πρέπει να δώσει αντοχή μικρότερη από το 75% του μέσου όρου.

Για την παραγωγή των δειγμάτων και για την εκτέλεση των δοκιμών βλέπε παρακάτω (Μέθοδοι Ελέγχου).

### 3.6 Διαπερατότητα

Όταν απαιτείται η χρήση υδατοστεγανούς εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η μέγιστη τιμή διείσδυσης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 7031 είναι 50 mm και η μέση τιμή πρέπει να είναι μικρότερη από τα 20 mm.

Εναλλακτικά, η υδατοστεγανότητα μπορεί να προσδιορισθεί μετρώντας την διαπερατότητα του υλικού. Το Ε.Σ. θεωρείται υδατοστεγανές όταν ο συντελεστής διαπερατότητας είναι μικρότερος από  $10^{-12}$  m/s.

### 3.7 Αντοχή σε παγετό

Για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που υπόκειται σε εναλλαγή ψύξης και απόψυξης σε μέτρια κορεσμένο περιβάλλον χωρίς αλάτι (EN 206) δεν χρειάζεται να γίνει κάποιος έλεγχος για αντοχή. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που υπόκειται σε πιο δυσμενείς συνθήκες (EN 206) πρέπει να εκπληρώνει τις απαιτήσεις για αντοχή σε παγετό όπως δίδονται στα:

- SS 137244 ή ASTM C 672 για αντίσταση στην δημιουργία αλάτων ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης.
- ASTM C666 για αντίσταση σε εναλλαγή πάγου – απόψυξης.

## 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

### 4.1 Προδιαγραφές δοκιμαστικών πανέλων

Το υλικό των πανέλων που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι μη απορροφητικό (με ελάχιστο πάχος 4 mm για χαλύβδινα φύλλα και 18 mm για κοντραπλακέ). Οι ελάχιστες διαστάσεις είναι 600 x 600 mm για εκτόξευση με το χέρι και 1000 x 1000 mm για εκτόξευση με ρομπότ. Το πάχος της εκτόξευσης εξαρτάται από τα δοκίμια που χρειάζεται να παραχθούν, αλλά δεν πρέπει να είναι λιγότερο από 100 mm. Επίσης, πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την αποφυγή παγίδευσης του ανακλώμενου σκυροδέματος μέσα στο πάνελο (όπως χρησιμοποιώντας λοξότμητες πλευρές).

Τα πάνελα πρέπει να τοποθετηθούν κάθετα και να ψευκαστούν με τον ίδιο εξοπλισμό, τεχνική, πάχος στρώσης ανά πέρασμα, απόσταση ψευκασμού, κλπ όπως στο πραγματικό έργο. Επίσης, ο χειριστής πρέπει να είναι το ίδιο άτομο.

Το δείγμα πρέπει να συντηρηθεί με τις ίδιες ακριβώς μεθόδους που θα συντηρηθεί η πραγματική κατασκευή. Τα δείγματα θα πρέπει να τιτλοδοτηθούν για μελλοντική αναγνώριση (μείγμα, τοποθεσία, ημερομηνία, χειριστής).

Το πάνελο δεν πρέπει να μετακινηθεί πριν περάσουν 18 ώρες από την εκτόξευση. Η συντήρηση πρέπει να συνεχιστεί για 7 ημέρες ή μέχρι να συλλεχθούν όλα τα δοκίμια.

Η πυρηνοληψία των δοκιμών πρέπει να γίνει σύμφωνα με το EN 7034, αλλά πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 125 mm από την παρειά (με εξαίρεση την κοπή των δοκών που χρησιμοποιούνται για την καμπτική αντοχή).

Κατά τη μεταφορά στο εργαστήριο δοκιμών, τα πάνελα ή τα δοκίμια πρέπει να συσκευαστούν έτσι ώστε να προστατεύονται από μηχανικές βλάβες και απώλεια υγρασίας.

Το **Ελληνικό σχέδιο** αναφέρει ότι οι συνθήκες συντήρησης πρέπει να είναι κάλυψη με διπλή λινάτσα που διατηρείται όσο το δοκίμιο είναι μέσα στο δοκιμαστικό πανέλο. Σε αυτό το σημείο θεωρούμε πιο ορθολογική την διατύπωση του EFNARC όπου τονίζεται ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες συνθήκες συντήρησης με την κατασκευή. Επίσης αναφέρεται ότι τα δοκίμια πρέπει να παραμείνουν στα πανέλα για τουλάχιστον 24 ώρες (και όχι 18) και το πολύ για 3 ημέρες.

Επίσης στο **Ελληνικό σχέδιο** γίνεται εκτεταμένη αναφορά στον τρόπο κοπής των πυρήνων από τα δοκιμαστικά πανέλα καθώς και στις ιδιότητες του οργάνου που χρησιμοποιείται για την κοπή. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερα όταν οι πυρήνες κόβονται σε πρώιμες ηλικίες η πολύ καλή κατάσταση του μηχανήματος κοπής έχει μεγάλη σημασία.



Εικόνα 2: Παραγωγή δοκιμαστικών πανέλων (Shotcrete Magazine, Fall 2000)

#### 4.2 Θλιπτική αντοχή και πυκνότητα

Ο έλεγχος θλιπτικής αντοχής γίνεται με βάση το EN 4012 σε πυρήνες που έχουν ληφθεί είτε από δοκιμαστικά πανέλα είτε απευθείας από την κατασκευή. Η ελάχιστη διάμετρος τους είναι 50 mm και ο λόγος ύψος/διάμετρος μεταξύ 1 και 2. Τα αποτελέσματα δοκιμών από πυρήνες με λόγο ύψος / διάμετρος διάφορο του 2 πρέπει να μετατραπούν σε ισοδύναμες αντοχές κυλίνδρων, χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 8.

Λόγος ύψος/διάμετρος πυρήνα	Συντελεστής ισοδύναμου κυβικού δοκιμίου	Συντελεστής ισοδύναμου κυλινδρικού δοκιμίου
2.00	1.15	1.00
1.75	1.12	0.97
1.50	1.10	0.95
1.25	1.07	0.93
1.10	1.03	0.89
1.00	1.00	0.87
0.75	0.88	0.76

Πίνακας 8: Συντελεστές μετατροπής ισοδύναμων κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων

Εναλλακτικά, η θλιπτική αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί από κύβους που έχουν κοπεί από τα δοκιμαστικά πανέλα. Οι ελάχιστες διαστάσεις είναι 60 x 60 x 60 mm και τα δείγματα ελέγχονται σύμφωνα με το EN 4012.



Η πυκνότητα προσδιορίζεται ζυγίζοντας το δείγμα μέσα και έξω από το νερό σύμφωνα με το EN 6275 ( μέθοδος μεταβολής στάθμης νερού).

Συνιστώμενες ηλικίες δοκιμίων 7 και 28 ημέρες.

Η αναφορά ελέγχου θα πρέπει να περιέχει:

- Την ταυτότητα του δοκιμίου
- Την περιεκτικότητα σε υγρασία του δοκιμίου
- Τις διαστάσεις του δοκιμίου
- Τις συνθήκες συντήρησης και την ηλικία του δοκιμίου
- Το μέγιστο φορτίο και τη θλιπτική αντοχή (προσέγγιση 0.5 MPa)
- Την πυκνότητα του δοκιμίου (προσέγγιση 10 kg/m<sup>3</sup>)
- Εμφάνιση του δοκιμίου (εάν είναι ασυνήθιστη)
- Παρατηρήσεις (εάν υπάρχουν)

Στο **Ελληνικό σχέδιο** γίνεται εκτεταμένη αναφορά στον τρόπο κοπής των πυρήνων από τα δοκιμαστικά πανέλα καθώς και στις ιδιότητες του οργάνου που χρησιμοποιείται για την κοπή. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερα όταν οι πυρήνες κόβονται σε πρώιμες ηλικίες η πολύ καλή κατάσταση του μηχανήματος κοπής έχει μεγάλη σημασία. Προτείνεται η κοπή πυρήνων με ονομαστική διάμετρο 100 mm και λόγο ύψος/διάμετρος = 1 (χωρίς να δίδεται η δυνατότητα επιλογής των διαστάσεων του δοκιμίου) η οποία μετριέται κοντά στο μέσον του ύψους τους επί δύο καθέτων διευθύνσεων με ακρίβεια ±0.5 mm.

Στην συνέχεια γίνεται εκτεταμένη αναφορά στα κριτήρια που θα πρέπει να ικανοποιούν τα δοκίμια, κριτήρια που θυμίζουν πολύ τα αντίστοιχα για το έγχυτο σκυρόδεμα, σε αντίθεση με την περίπτωση του EFNARC που αναφέρει απλά τον μέσο όρο αντοχής των δοκιμίων (Πίνακας 2). Αναλυτικά η διαδικασία έχει ως εξής:

- Για κάθε μέρα σκυροδέτησης ή ανά 50 m<sup>3</sup> (όποιο οδηγεί στον μεγαλύτερο αριθμό δειγματοληψιών) θα λαμβάνεται ένα πρισματικό δοκίμιο.
- Για τους ελέγχους συμμόρφωσης θα αποκόπτονται ζεύγος πυρήνων από κάθε πρισματικό δοκίμιο για κάθε ηλικία που απαιτεί έλεγχο αντοχής σε θλίψη. Ο μέσος όρος της αντοχής των 2 πυρήνων κάθε ηλικίας θα αποτελεί μία τιμή  $x_i$ .
- Μετά την συμπλήρωση 6 διαδοχικών δειγματοληψιών, οι τιμές  $x_i$  αξιολογούνται με βάση το κριτήριο συμμορφώσεως που δίδεται παρακάτω.
- Οι ανωτέρω δειγματοληψίες θα πρέπει να πυκνώνονται ώστε στο σύνολο των σκυροδετήσεων να εξασφαλίζεται ακέραιος αριθμός εξάδων.
- Για έργα που διαρκούν λιγότερο από 6 ημέρες και είναι λιγότερο από 300 m<sup>3</sup> θα λαμβάνονται συνολικά 3 πρισματικά δοκίμια.
- Τα κριτήρια συμμόρφωσης είναι τα εξής:

$$\bar{x}_6 \geq f_{ck} + 1.6s \quad \text{Πρώτος κανόνας αποδοχής}$$
$$x_i \geq f_{ck} - 2MPa \quad \text{Δεύτερος κανόνας αποδοχής}$$

όπου:  $\bar{x}_6$  = μέσος όρος 6 διαδοχικών  $x_i$

$x_i$  = αντοχή κάθε συμβατικού δοκιμίου

$f_{ck}$  = η χαρακτηριστική αντοχή των 28 ημερών εκτός εάν ο μελετητής έχει ορίσει χαρακτηριστική αντοχή πρώιμης ηλικίας

$s$  = η τυπική απόκλιση των 6 διαδοχικών δειγματοληψιών

- Εκτός από τον έλεγχο των δοκιμίων από πανέλα το **Ελληνικό σχέδιο** προτείνει κάθε 500 m<sup>2</sup> (το περισσότερο) να λαμβάνεται μία τριάδα δοκιμίων από το ίδιο το έργο με την διαδικασία της πυρηνοληψίας (δεύτερο επίπεδο ελέγχου ποιότητας). Τα κριτήρια συμμόρφωσης για αυτά τα δοκίμια είναι τα εξής:

$$\bar{x}_3 \geq f_{ck}$$

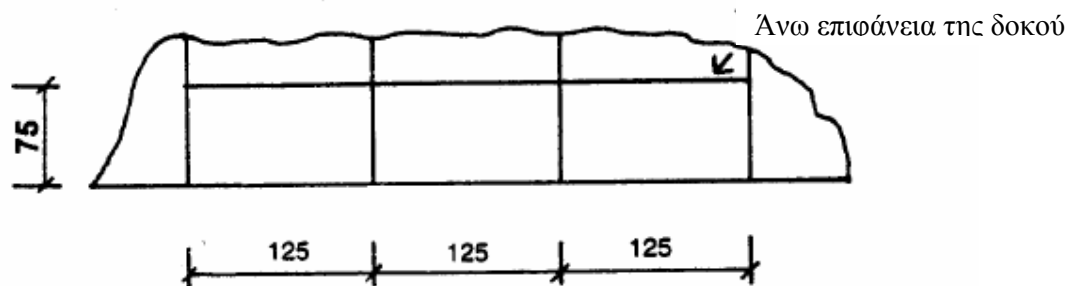
$$x_i \geq 0.85f_{ck}$$

- Σε όλους τους παραπάνω ελέγχους οι μετρηθείσες αντοχές  $x_i$  πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή διόρθωσης 1.17 (αντίστοιχα στον EFNARC πολλαπλασιάζονται οι τιμές των αντοχών κυλίνδρου με 0.85).
- Στην περίπτωση που στους παραπάνω ελέγχους ένα δοκίμιο δεν ικανοποιεί τον δεύτερο κανόνα αποδοχής, με δαπάνη του κατασκευαστή λαμβάνονται 3 πυρήνες από την αντίστοιχη θέση του έργου και ο μέσος όρος αυτών αντικαθιστά την υπό αμφισβήτηση τιμή  $x_i$ .
- Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται ο πρώτος (ή και ο δεύτερος) κανόνας αποδοχής, από την περιοχή του έργου που προέρχονται τα αμφισβητούμενα δοκίμια και από τις 6 θέσεις που αντιστοιχούν στις δειγματοληψίες των πρισματικών δοκιμίων, λαμβάνονται ανά θέση 3 πυρήνες των οποίων οι μέσοι όροι αντικαθιστούν τις υπό αμφισβήτηση τιμή  $x_i$ .
- Εάν και πάλι δεν ικανοποιείται κάποιος κανόνας αποδοχής, θα πρέπει να προταθούν οι αναγκαίες διορθωτικές ενέργειες στην έκταση που απαιτεί η ασφάλεια του έργου.
- Όταν η διαστασεολογία της κατασκευής δεν επιτρέπει την λήψη πυρήνων, ο μελετητής με την συνεργασία μηχανικού ειδικευμένου στην τεχνολογία του Ε.Σ. θα πρέπει να υποδείξει άλλη κατάλληλη μέθοδο επανελέγχου και αξιολόγησης του υπό αμφισβήτηση τμήματος του έργου.

### 4.3 Καμπτική και παραμένουσα αντοχή

➤ Προετοιμασία δοκιμής

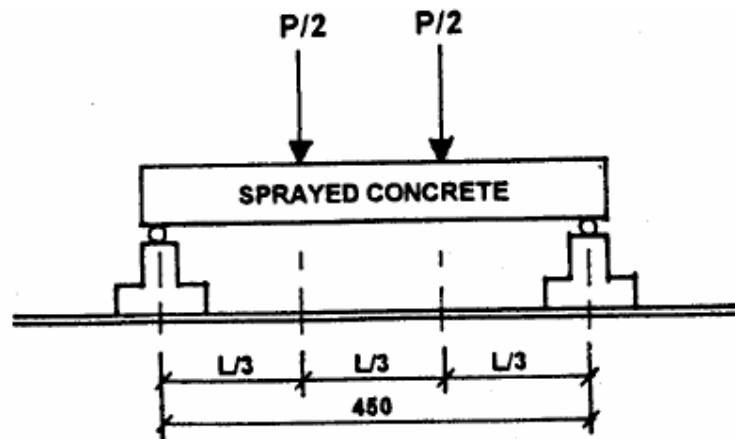
Ο έλεγχος καμπτικής και παραμένουσας αντοχής γίνεται σε δοκούς διαστάσεων 75 x 125 x 600 mm που έχουν αποκοπεί από τα δοκιμαστικά πανέλα. Οι δοκοί ελέγχονται υπό φόρτιση στα τρίτα του ανοίγματος των 450 mm. Τα πρισματικά δοκίμια πρέπει να φυλαχτούν σε νερό για τουλάχιστον τρεις ημέρες και να υποβληθούν άμεσα σε δοκιμή. Οι δοκοί αποκόπτονται από την άκρη των πανέλων και η φόρτιση επιβάλλεται στην εσωτερική παρειά των αποκομμένων δοκών (άνω επιφάνεια της δοκού). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το δοκιμαστικό πανέλο σε κάτοψη καθώς και οι διατομές των αποκομμένων δοκών. Η δοκιμή κανονικά γίνεται στις 28 ημέρες.



Σχήμα 2

Η φόρτιση γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3 και θα πρέπει να γίνει κατάλληλη προετοιμασία ώστε να μετρηθούν καμπτικές παραμορφώσεις στο μέσο της δοκού. Ο ρυθμός παραμόρφωσης στο μέσο του ανοίγματος πρέπει να είναι  $0.25 \pm 0.05$  mm/min μέχρι την τιμή

0.5 mm. Στη συνέχεια ο ρυθμός επιβολής παραμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί σε 1 mm/min. Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης πρέπει να καταγράφεται συνεχώς. Η δοκιμή σταματά όταν επιτευχθεί μία παραμόρφωση ανοίγματος 4 mm.



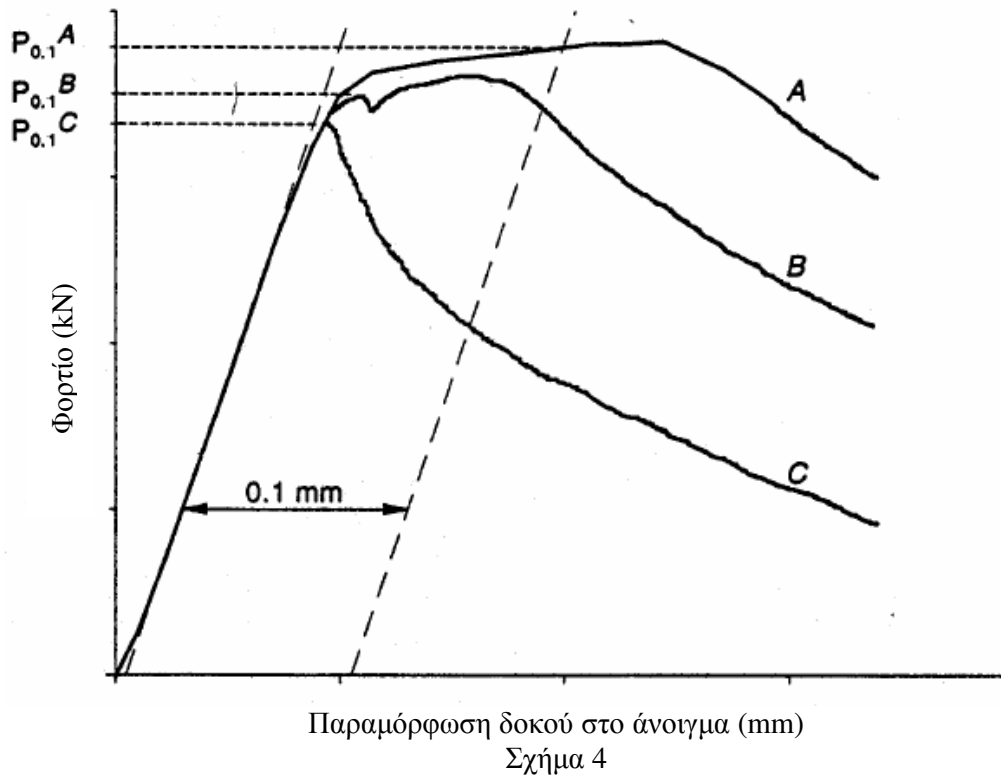
Σχήμα 3

➤ Προσδιορισμός της καμπτικής αντοχής

Η καμπτική αντοχή μπορεί να εκτιμηθεί από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης (Σχήμα 4) ως ακολούθως. Το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης προσδιορίζεται με βάση τα δεδομένα που έχουμε μέχρι το 50% του μέγιστου φορτίου. Αφού προσδιοριστεί το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα, μετατοπίζεται παράλληλα κατά 0.1 mm και στο σημείο που τέμνει την καμπύλη ορίζεται το σημείο  $P_{0.1}$ . Η καμπτική αντοχή υπολογίζεται ως ισοδύναμη ελαστική εφελκυστική αντοχή:

$$\text{Καμπτική αντοχή (MPa)} = P_{0.1} \times L / b \times d^2$$

- όπου  $P_{0.1}$  ορίζεται παραπάνω (σε N)  
L το άνοιγμα της δοκού (450 mm)  
b το πραγματικό πλάτος της δοκού (125 mm)  
d το πραγματικό ύψος της δοκού (75 mm)



Η αναφορά ελέγχου θα πρέπει να περιέχει τα εξής:

- Συνθήκες συντήρησης και ηλικία δοκιμίου
- Ρυθμός επιβολής παραμόρφωσης
- Καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης
- Υπολογισμένη καμπτική αντοχή

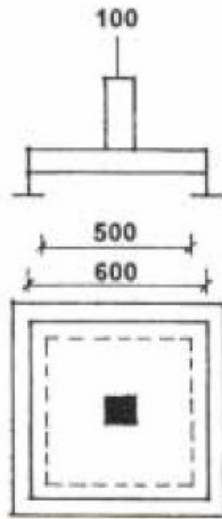
➤ Προσδιορισμός παραμένουσας αντοχής – κατηγορίας

Η κατηγορία παραμένουσας αντοχής εκτιμάται από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης (άνοιγμα) χρησιμοποιώντας τιμές καμπτικής παραμόρφωσης μεταξύ 0.5 και 1, 2 ή 4 mm ανάλογα με τη τάξη παραμόρφωσης (βλέπε πίνακα 5 και σχήμα 1).

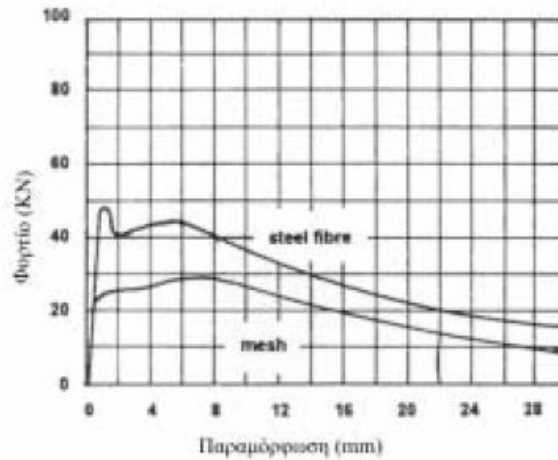
Στην περίπτωση που κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται η σχέση φορτίου – παραμόρφωσης συνιστάται η κατηγοριοποίηση κάθε δοκού να γίνεται μετατρέποντας τις καμπτικές τάσεις που ορίζουν τα όρια των κατηγοριών (πίνακας 5) σε αντίστοιχες τιμές φορτίου χρησιμοποιώντας τις πραγματικές διαστάσεις της δοκού και σχεδιάζοντας αυτές τις τιμές (ενωμένες με ευθείες γραμμές) στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης (όπως στο σχήμα 1, με την διαφορά ότι στον άξονα των τεταγμένων θα υπάρχουν οι τιμές για το φορτίο που επιβάλλεται).

➤ Δοκιμή πλάκας – κατηγοριοποίηση σε τάξεις ενεργειακής απορρόφησης

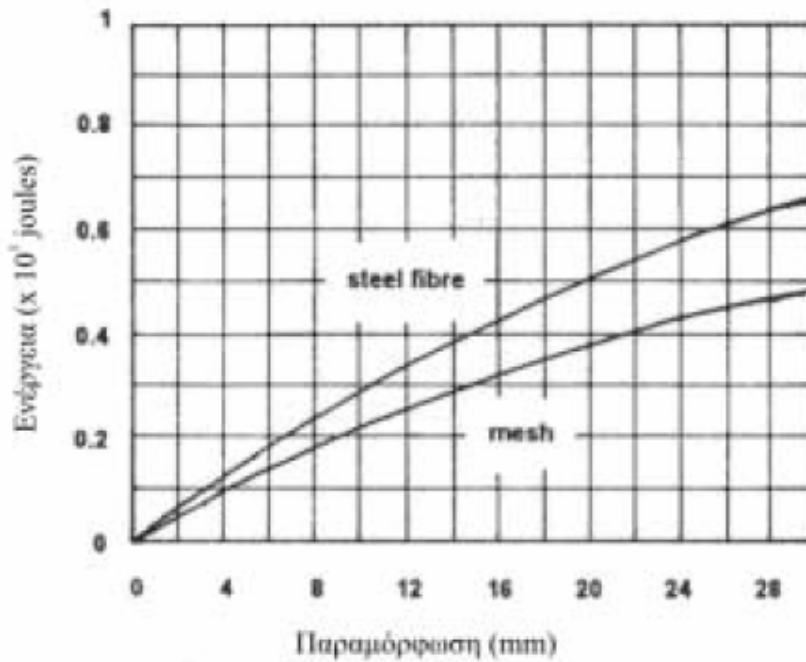
Περίληπτικά δίδονται τρία σχήματα (5, 6 και 7) ένα με την διάταξη δοκιμής πλακός και δύο με τις καμπύλες: φορτίου - παραμόρφωσης και ενέργειας - παραμόρφωσης.



Σχήμα 5: Διάταξη δοκιμής πλακός για καθορισμό δυσθραυστότητας μέσω απορρόφησης ενέργειας.



Σχήμα 6: Παράδειγμα καμπύλων φορτίου - παραμόρφωσης για δοκιμή πλακός.



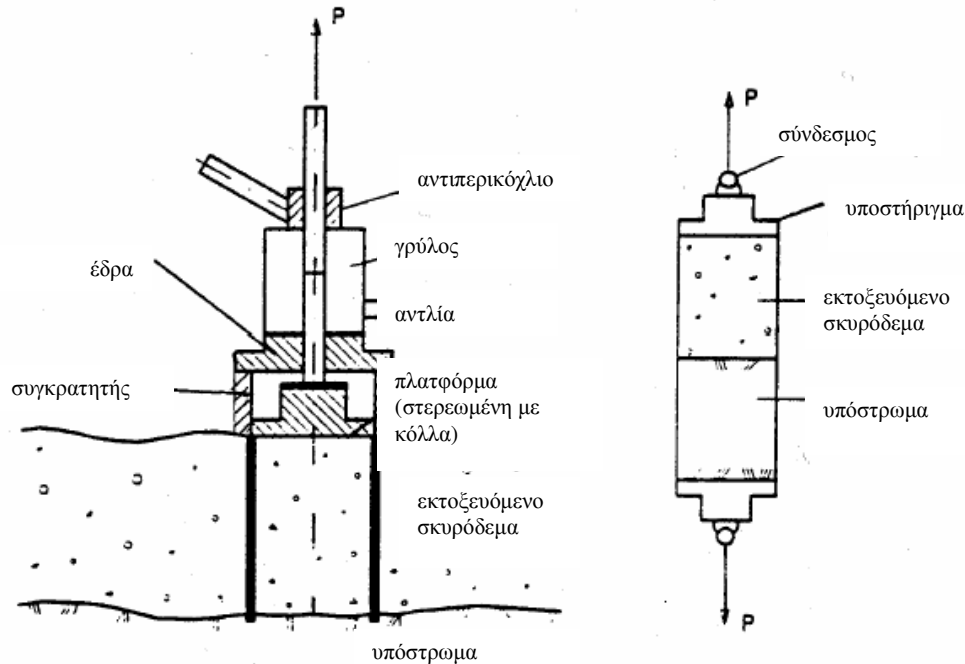
Σχήμα 7: Παράδειγμα καμπύλων ενέργειας - παραμόρφωσης για δοκιμή πλακός

#### 4.4 Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας

Ο προσδιορισμός γίνεται με βάση το πρότυπο EN 6784.

#### 4.5 Προσδιορισμός αντοχής πρόσφυσης

Ο προσδιορισμός γίνεται είτε μέσω της δοκιμής πυρήνα σύμφωνα με το πρότυπο EN 1542, είτε μέσω της δοκιμής εφελκυσμού με διατάξεις παρόμοιες των σχημάτων που ακολουθούν. Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου πρέπει να είναι μεταξύ 1.0 – 3.0 MPa / min. Η διάμετρος του πυρήνα πρέπει να είναι μεταξύ 50 – 60 mm.



Σχήμα 8: Πειραματικές διατάξεις για τον προσδιορισμό της αντοχής πρόσφυσης

##### ➤ Διαπερατότητα

Ο έλεγχος γίνεται με βάση το πρότυπο EN 7031.

## 5. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

### 5.1 Γενικά

Η παραγωγή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να υπόκειται σε μια σειρά από διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου. Με τον όρο ποιοτικό έλεγχο εννοούμε έναν συνδυασμό από ενέργειες και αποφάσεις που λαμβάνονται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι προκαθορισμένες απαιτήσεις.

Υπάρχουν τρεις τύποι ελέγχου:

- i. Περιορισμένος
- ii. Κανονικός
- iii. Εκτεταμένος

Η επιλογή του τύπου ελέγχου γίνεται από τον σχεδιαστή και βασίζεται στον τύπο του έργου και στις επιπτώσεις πιθανής αστοχίας.

Δεν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για την οργάνωση του ελέγχου για τους δύο πρώτους τύπους, ενώ για τον τρίτο απαιτείται η σύνταξη οργανογράμματος η οποία γίνεται από εξειδικευμένο στη διασφάλιση ποιότητας μηχανικό.

## 5.2 Προκαταρκτικές δοκιμές

Η σύνθεση του Ε.Σ. προσδιορίζεται στη φάση της κατασκευής με δοκιμές όπου ελέγχονται οι απαιτούμενες ιδιότητες, όπως για παράδειγμα:

Νωπό σκυρόδεμα

- Απαίτηση σε νερό, εργασιμότητα, ικανότητα άντλησης
- Ικανότητα εκτόξευσης, ποσοστό ανακλώμενου υλικού
- Πυκνότητα
- Δοσολογία επιταχυντή

Σκληρυμένο σκυρόδεμα

- Θλιπτική αντοχή στις 7 και 28 ημέρες
- Καμπτική αντοχή
- Παραμένουσα αντοχή
- Περιεκτικότητα ιών
- Πρόσφυση

Η επιλογή των παραπάνω δοκιμών γίνεται με βάση το είδος του έργου και τη χρήση του Ε.Σ. Στην περίπτωση του εκτεταμένου ελέγχου εφαρμόζεται το σύνολο των δοκιμών.

## 5.3 Συχνότητα δοκιμών

Οι δοκιμές που γίνονται χωρίζονται σε ελέγχους παραγωγής και ελέγχους συμμόρφωσης. Οι έλεγχοι παραγωγής γίνονται με βάση το πρότυπο EN 206, ενώ οι έλεγχοι συμμόρφωσης είναι αυτοί που αναφέρθηκαν παραπάνω (θλιπτική, καμπτική και παραμένουσα αντοχή, απορρόφηση ενέργειας, αντοχή πρόσφυσης, περιεκτικότητα ιών και πάχος στρώσης).

Η συχνότητα των δοκιμών καθορίζεται ανάλογα με την κατάταξη του ποιοτικού ελέγχου όπως φαίνεται και στον πίνακα 9.

Τύπος ελέγχου	Περιορισμένος	Κανονικός	Εκτεταμένος
Θλιπτική αντοχή	500	250	100
Καμπτική αντοχή		500	250
Τιμή παραμένουσας αντοχής		1000	500
Απορρόφηση ενέργειας		1000	500
Αντοχή πρόσφυσης		500	250
Περιεκτικότητα ιών		250	100
Πάχος στρώσης	50	25	10
m <sup>2</sup> ανάμεσα σε διαδοχικές δοκιμές			

Πίνακας 9: Συχνότητα δοκιμών για την υποστήριξη του ποιοτικού ελέγχου

## 5.4 Έλεγχος ευθυγράμμισης

Ο έλεγχος ευθυγράμμισης είναι απαραίτητος για να εξασφαλισθεί ομοιομορφία σε ότι αφορά το πάχος του Ε.Σ. και την κατανομή του στην παλιά επιφάνεια. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με τη χρήση ραμμάτων, μεταλλικών λωρίδων, μετρητών πάχους, ή άλλων συμβατικών εργαλείων.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από την βιβλιογραφία αλλά και από κάποια μικρά άρθρα – σχολιασμούς πάνω στο Ελληνικό σχέδιο προδιαγραφής για το εκτοξευόμενο προκύπτει μία αμφισβήτηση πάνω στα κριτήρια συμμόρφωσης που θέτει το σχέδιο, ιδιαίτερα στο πρώτο επίπεδο ελέγχου (Κριτήρια συμμόρφωσης 1 και 2). Συγκεκριμένα από ελέγχους που έχουν γίνει στην πράξη, σε κάθε εργοτάξιο εμφανίζονται υψηλές τιμές τυπικής απόκλισης λόγω των ιδιαιτεροτήτων του Ε.Σ. που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή αλλά και λόγω της αδυναμίας ελέγχου της ποσότητας προστιθέμενου επιταχυντή. Ως εναλλακτική λύση προτείνονται καλύτερα τα κριτήρια συμμόρφωσης για δείγματα από Ε.Σ. που έχει ήδη τοποθετηθεί (δεύτερο επίπεδο ελέγχου), τα οποία είναι πιο κοντά και στην λογική του EFNARC, αφού προτείνουν αφενός την σύγκριση του μέσου όρου 3 δοκιμίων με την κατηγορία αντοχής και αφετέρου την σύγκριση κάθε δοκιμίου με το 85% της αντοχής της αντίστοιχης κατηγορίας (έναντι 75% για τον EFNARC)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **European Specification for Sprayed Concrete**, EFNARC 1996, [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)
2. **Σχέδιο Προδιαγραφής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**, Ενημερωτικό δελτίο Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αύγουστος 2000
3. **Το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα σε Έργα Επεμβάσεων**, Στέφανος Δρίτσος, Αφιέρωμα στο δελτίο του Συλλόγου Πολιτικών Μηχανικών Νο 321
4. **Σχολιασμός του σχεδίου Προδιαγραφής Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος και σχετικές προτάσεις με βάση δεδομένα ελέγχου ποιότητας από την επίβλεψη εφαρμογών εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην Αθήνα**, Μ.Δ. Μιχαηλίδης, Κ.Ι. Κουτσοπιάς, Χημικοί μηχανικοί
5. **Shotcrete guides and specifications**, D.R. Morgan, Shotcrete Magazine, Fall 2005
6. **Ευρωπαϊκός Κανονισμός Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος: Απαιτήσεις, Οδηγίες και έλεγχοι**, Α.Γ. Σακελλαρίου Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
7. **Application and testing of Shotcrete according to the Austrian Guideline on Sprayed concrete**, Wolfgang Kusterle, Shotcrete Magazine, Fall 2000