

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Νέοι τύποι σκυροδέματος: αυτοσυμπυκνούμενο,  
υψηλής αντοχής , ινοπλισμένο»**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ: ΣΙΛΕΒΙΣΤΑ ΜΕΛΙΣΣΑ**

**ΝΟΔΑΡΑ ΕΛΕΝΗ**

**ΦΛΟΥΔΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ - 2012**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ως αυριανοί μηχανικοί και δεδομένου την ειδικότητα που παρέχει η σχολή μας ( Έργων Υποδομής) αποφασίσαμε ως αντικείμενο της Πτυχιακής εργασίας να είναι το «σκυρόδεμα».

Η εργασία μας έχει ως αντικείμενο το σκυρόδεμα και τους νέους – εξελιγμένους τύπους του. Στοχευμένα έχουμε εστιάσει στα σκυροδέματα : **υψηλής αντοχής , αυτοσυμπικνούμενο σκυρόδεμα και ινοπλισμένο σκυρόδεμα..**

Ανάλογα με την ιδιαιτερότητα του έργου δημιουργείται η ανάγκη για την χρησιμοποίηση του κατάλληλου τύπου σκυροδέματος και αυτό είναι που μας ώθησε στην επιλογή του παρόντος θέματος.

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας κ. Μπισκίνη για την δυνατότητα που μας προσέφερε να ασχοληθούμε με τον παρόν θέμα και τους νέους ορίζοντες γνώσεων που άνοιξε για εμάς.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της Πτυχιακής εργασίας είναι η αναφορά σε νέους και εξελιγμένους τύπους σκυροδέματος. Όπως αναφέραμε πρωτίστως, έχουμε στοχεύσει στα σκυροδέματα υψηλής αντοχής , αυτοσυμπικνούμενο και ινοπλισμένο.

Σκοπός μας ήταν να προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τον κάθε τύπο σκυροδέματος , να δούμε τα πλεονεκτήματα , τα μειονεκτήματα και το πεδίο εφαρμογής του καθενός ξεχωριστά.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αναφερόμαστε εκτενώς στους ορισμούς , στις ιδιότητες και στα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, σε μια προσπάθεια να έχουμε πλήρη και σφαιρική εικόνα περί του υλικού.

Έπειτα περιγράφουμε , αναλύουμε και δίνουμε πεδία εφαρμογής του αυτοσυμπικνούμενου σκυροδέματος.

Στην συνέχεια αναφερόμαστε στις ιδιότητες και τη δομή του ινοπλισμένου σκυροδέματος με αρκετό φωτογραφικό υλικό.

Τέλος αναφερόμαστε στα σκυροδέματα υψηλής αντοχής .

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	6
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	6
1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	11
1.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ .....	26
1.4 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	31
1.5 ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	34
1.6 ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	42
2.1 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	42
2.2 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ...	50
2.3 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ.....	71
2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΡΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ ΠΑΣΤΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ – ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ .....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ .....	97
3.1 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ - ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ.....	97

3.2 ΧΡΗΣΗ ΙΝΟΠΟΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ .....	143
4.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ , ΑΝΤΟΧΕΣ - ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ .....	143
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	151
4.3 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΠΕΡΙΕΚΤΗΚΟΤΗΤΑ ΤΕΦΡΑΣ ...	153
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	160
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	163
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	164

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

### Τα πρώτα προϊστορικά ευρήματα

Το σκυρόδεμα υπό την ευρύτερη του έννοια, δηλ. ως υλικό που κατασκευάζει ο άνθρωπος με τη χρήση κάποιου συνδετικού υλικού μέσα στο οποίο προσθέτει διάφορα άλλα φυσικά υλικά που συνδέονται με τη συγκολλητική του δράση και σχηματίζουν ένα νέο στερεό υλικό, έχει ιστορία 9000 ετών.

Το αρχαιότερο γνωστό σήμερα σκυρόδεμα χρονολογούμενο από το 7000 π.Χ. βρίσκεται στη νότια Γαλιλαία, Yiftah El , Ισραήλ. Ανακαλύφθηκε το 1985 από μία μπουλντόζα στη διάνοιξη ενός δρόμου και σχηματίζει κάποιο δάπεδο. Αποτελείται από μίγμα ασβέστη με πέτρες. Ο ασβέστης όταν αναμιχθεί με νερό και άμμο δημιουργεί μία "λάσπη" - κονίαμα το οποίο ερχόμενο σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα του ατμοσφαιρικού αέρα σκληραίνει και δημιουργεί ένα στερεό σώμα. Αν το κονίαμα αυτό ανακατευτεί με πέτρες, συνδέει - συγκολλάει τις πέτρες και δημιουργεί ένα είδος σκυροδέματος.

Άλλο παλαιό εύρημα σκυροδέματος υπάρχει στις όχθες του Δούναβη στο Lepenski Vir στη Γιουγκοσλαβία και χρονολογείται από το 5600 π.Χ. Αποτελεί το δάπεδο μιας προϊστορικής καλύβας.

### Τα πρώτα ιστορικά βήματα

Στη μεγάλη πυραμίδα στην Γκίζα στην Αίγυπτο (2500 π.Χ.) οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με κάποιο κονίαμα από ασβέστη ή γύψο. Στην ίδια χώρα, στις αρχαίες Θήβες, υπάρχει τοιχογραφία με αναπαράσταση των εργασιών παρασκευής ασβεστοκονιάματος και χτισίματος με το υλικό αυτό.

Η τέχνη αυτή του χτισίματος φαίνεται ότι μεταφέρθηκε και στην αρχαία Ελλάδα όπου χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μίγματα ασβέστη για χτίσιμο και για επικάλυψη πλίνθων φτιαγμένων από πηλό και ξεραμένων στον ήλιο.

Ο Ρωμαίος συγγραφέας Vitruvius αποτελεί μία σημαντική πηγή πληροφοριών για την αρχαία Ελληνική αρχιτεκτονική και οικοδομική. Χρησιμοποιεί την ελληνική

λέξη " έ μ π λ ε κ τ ο ν " για να περιγράψει ένα "πρόδρομο" του σημερινού σκυροδέματος, υλικό που αποτελείται από ένα συνδετικό κονίαμα στο οποίο αναμιγνύονται μικρά τεμάχια λίθων.

Όλα τα κονιάματα με ασβέστη και νερό για να πήξουν και να σκληρυνθούν χρειάζεται να παραμείνουν στον αέρα (αερικά κονιάματα) για να γίνει η χημική αντίδραση της άσβεστου με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Οι αρχαίοι Έλληνες ήσαν ίσως οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν υδραυλικές κονίες δηλ. κονίες που όταν ανακατευτούν με το νερό μπορούν να πήξουν και να σκληρυνθούν τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Είναι επομένως αυτονόητο ότι τα κονιάματα και τα σκυροδέματα που παρασκευάζονται με υδραυλικές κονίες έχουν πολύ μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις χρόνιες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Τέτοια υδραυλικά κονιάματα χρησιμοποίησαν οι αρχαίοι Έλληνες τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης από τη Θήρα ή τη Νίσυρο στην Ελλάδα ή τη Δικαιαρχεία, αργότερα Pozzuoli, στην ελληνική αποικία της Ιταλίας κοντά στη Napoli (Νεάπολη). Το μίγμα αυτό έχει τη δυνατότητα να πήζει και να σκληραίνει μέσα στο νερό (υδραυλική κονία) και δε διαλύεται από νερό όπως τα ασβεστοκονιάματα. Από την άποψη αυτή το μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης είναι πολύ συγγενές με το τσιμέντο και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως "πρόδρομο" υλικό του σημερινού τσιμέντου. (Σήμερα παρασκευάζονται και έχουν ευρύτατη χρήση τσιμέντα με προσθήκη ποζολάνης, τα ποζολανικά τσιμέντα). Τέτοιο μίγμα φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε για να γίνει υδατοστεγανή δεξαμενή χωρητικότητας 600 m<sup>3</sup> στο ναό της Αθηνάς στην αρχαία Κάμιρο στη Ρόδο, καθώς και στην κατασκευή του λιμανιού του Πειραιά (Ζέα). Επίσης μίγματα ασβέστη τριμμένης ηφαιστειακής γης και μαρμαρόσκονης χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα στην κατασκευή σοβάδων, ειδικών επικαλύψεων για να αποτελέσουν την επιφάνεια για ζωγραφική (στούκο) αλλά και για "συγκόλληση σπασμένων τεμαχίων μαρμάρων" (αρχαϊκός ναός Αρτέμιδος). Τα υλικά αυτά περιγράφονται από τους αρχαίους συγγραφείς Θεόφραστο, Στράβωνα και Vitruvius, αλλά και σύγχρονους ερευνητές (Τάσιος, Μπαντέκα, Haegerman Botticher, Bulard, Ευσταθιάδης, Wilski κ.α.).

- Τριμμένα κεραμίδια ή πλίνθοι με ασβέστη κυρίως σε θαλάσσια έργα (Δειλός, Ρόδος βίλα ελληνιστικής περιόδου).
- Διάφορα άλλα υλικά, όπως τέφρες (Κόρτυς Αρκαδία), σιδερόσκονη (Αγορά Αθηνών), πρωτοξείδιο του μολύβδου (Λαυρίων).

Οι Ρωμαίοι φαίνεται ότι από το 300 π.Χ. πήραν τις γνώσεις αυτές από τους Έλληνες, πιθανότατα των Ελληνικών αποικιών της Ιταλίας, και τις ανέπτυξαν σε μεγάλο βαθμό τόσο ως προς τα ασβεστοκονιάματα (αερικά κονιάματα) όσο και ως προς τη χρήση μίγματος ασβέστη και ηφαιστειακής γης (υδραυλικά κονιάματα). Την ηφαιστειακή γη την προμηθεύονταν από το χωριό Pozzuoli κοντά στο Βεζούβιο. Το χωριό αυτό έδωσε το όνομα "Ποζολάνη" στα ηφαιστειακά υλικά αλλά και σε τεχνικά υλικά με τις ίδιες περίπου ιδιότητες (ορισμένες Ιπτάμενες Τέφρες- πυριτική παιπάλη) που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση σήμερα (Ποζολανικά τσιμέντα- ποζολανική χημική αντίδραση). Ένα από τα πρώτα σημαντικά έργα των Ρωμαίων είναι το αρχαίο Θέατρο Πομπηίας χωρητικότητας 20.000 θεατών (75 π.Χ.). Ακολουθούν πλήθος θαυμαστών από τεχνικής και αρχιτεκτονικής άποψης έργων, όπως το Κολοσσαίο (82 μ.Χ.), το Πάνθεον (123 μ.Χ.) και τα διάφορα υδραγωγεία, όπως το υδραγωγείο στη πόλη Nimes στη Γαλλία (150 μ.Χ.).

Αξιομνημόνευτο είναι το γραπτό κείμενο που περιγράφει την παρασκευή του αρχαίου αυτού τσιμέντου και ανήκει στον Vitruvius το 13 π.Χ. στο οποίο δίνονται οδηγίες στους αρχιτέκτονες για την παρασκευή κονιάματος που "πήζει τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό". Είναι επίσης γνωστό ότι οι Ρωμαίοι προσέθεταν μερικές φορές στο "σκυρόδεμα" διάφορα υλικά για να βελτιώσουν τις ιδιότητές του και τα υλικά αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως "πρόδρομα" των σήμερα χρησιμοποιούμενων "χημικών προσθέτων". Για παράδειγμα, χρησιμοποίησαν αίμα του οποίου η δράση είναι παρόμοια με εκείνη των αερακτικών προσθέτων (υλικών που εισάγουν αέρα στο σκυρόδεμα με σκοπό να βελτιώσουν την ανθεκτικότητά του στη δράση του παγετού και να αυξήσουν την εργασιμότητά του). Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσθήκη κατά την ανάμιξη τριχών αλόγου "πρόδρομο" υλικό των χρησιμοποιούμενων σήμερα πλαστικών και χαλύβδινων ινών (ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Κατά το μεσαίωνα δεν παρουσιάζεται καμία εξέλιξη. Το πρώτο ουσιαστικά βήμα για τη δημιουργία του τσιμέντου υπό τη μορφή που χρησιμοποιείται σήμερα θα μπορούσε να αποδοθεί στον Άγγλο μηχανικό John Smeaton στα μέσα του 1.700 μ. Χ . Στο μηχανικό αυτό ανατέθηκε η κατασκευή



ενός φάρου κοντά στο Plymouth , ο οποίος είχε προηγουμένως κατασκευασθεί από ξύλο και είχε δύο φορές καταστραφεί, αρχικά από πυρκαϊά και τελικά από θύελλα. Ήταν πλέον αυτονόητο ότι ο φάρος θα έπρεπε να κατασκευαστεί από πέτρα αλλά η γειννίαση με τη θάλασσα και η βραδύτητα πήξεως και σκλήρυνσης των ασβεστοκονιαμάτων δεν επέτρεπαν το ασφαλές χτίσιμο. Ο Smeaton άρχισε να ερευνά τα διάφορα υλικά και διαπίστωσε ότι τα ασβεστοκονιάματα με ασβέστη ο οποίος έχει παρασκευαστεί από το ψήσιμο ασβεστόλιθου που περιείχε άργιλο (δηλ. πυρίτιο και αργίλιο) μπορούσαν να πήξουν τόσο στον αέρα όσο-και σπουδαιότερο- μέσα στο νερό. Αυτή η παρατήρηση θεωρείται ότι αποτελεί το πρώτο σημαντικό βήμα για την παραγωγή του τσιμέντου με τη μορφή που παράγεται σήμερα. Ανάλογες εξελίξεις την ίδια εποχή αναφέρονται στη Γαλλία αποδιδόμενες στους Vicat και Lesage.

Ακολουθούν διάφορες άλλες "εφευρέσεις" με αντίστοιχα διπλώματα ευρεσιτεχνίας όπως του εφημέριου James Parker με το "Ρωμαϊκό τσιμέντο". Η συστηματικότερη όμως παρασκευή τσιμέντου αποδίδεται στον Άγγλο μηχανικό Joseph Aspdin ο οποίος έδωσε στο υλικό (για το οποίο πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας) το όνομα που και σήμερα χρησιμοποιείται "τσιμέντο Portland". Το όνομα αυτό δόθηκε γιατί το χρώμα του σκληρυμένου τσιμέντου ήταν πολύ κοντά στο χρώμα των πετρωμάτων στο Portland. Σήμερα σώζεται (σε εγκαταστάσεις Βρετανικής Τσιμεντοβιομηχανίας) ένας από τους πέτρινους κλιβάνους που χρησιμοποίησε ο γιος του Aspdin, William για την παραγωγή του τσιμέντου.

Έκτοτε η παραγωγή του τσιμέντου εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο και παρουσίασε σημαντικές εξελίξεις για να φθάσει στο σημερινό επίπεδο εξέλιξης.

Σήμερα παράγονται ετησίως σε όλο τον κόσμο πάνω από 1,5 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου και το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από το τσιμέντο αυτό υπερβαίνει τα 10 δισεκατομμύρια τόνους. Το γεγονός αυτό καθιστά το τσιμέντο και το σκυρόδεμα από τα σπουδαιότερα δομικά υλικά της εποχής μας. Για να επιτευχθεί όμως αυτό χρειάστηκε να γίνουν σημαντικές πρόοδοι κυρίως τα τελευταία 80 - 100 χρόνια όπως ο συνδυασμός του σκυροδέματος με χάλυβα για να παραλαμβάνει τις εφελκυστικές τάσεις, η χρήση προεντεταμένων χαλύβων, η χρήση ινών, μη μεταλλικού οπλισμού, χημικών πρόσθετων (ιδίως των λεγόμενων υπέρ-ρευστοποιητικών) και πολύ λεπτόκοκκων υλικών (ποζολανών).

Σήμερα παρασκευάζεται σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη από 200 MPa αλλά και σκυρόδεμα με προεπιλεγμένες ιδιότητες (χαμηλής αντοχής, υψηλής ανθεκτικότητας σε διαβρωτικές επιδράσεις του περιβάλλοντος, αυτοσυμπυκνούμενο, με αντοχή σε τριβή και κρούση και σκυρόδεμα που απορροφά αέριες ενώσεις NOx που μολύνουν το περιβάλλον).



**Εικόνα 1.** .Γέφυρα κατασκευασμένη με σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής

## 1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό υλικό που αποτελείται κατά βάση από αδρανή (χαλίκι και άμμο) ,συγκολλημένα μέσω του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού σε μονολιθική μάζα.

Τα αδρανή είναι μεν το φθινό συστατικό , αλλά έχουν πολύ ικανοποιητικές βασικές ιδιότητες όπως η μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα σε διάρκεια και περιβαλλοντικές επιδράσεις (χημικές ουσίες, υγρασία, κύκλους ζέστης και παγωνιάς, υψηλές θερμοκρασίες), σταθερότητα όγκου και υδατοστεγανότητα.

Ο τσιμεντοπολτός αποτελείται από τσιμέντο, νερό και (χημικά) πρόσμεικτα ή πρόσθετα. Ενώ έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος από τα αδρανή, στη σκληρυμένη του μορφή ο τσιμεντοπολτός δεν έχει εξίσου καλές βασικές ιδιότητες. Ο ρόλος του είναι να συνδέει τα κενά μεταξύ των αδρανών και να συνδέει τα αδρανή, μετατρέποντας τα, από σύνολο ισχυρών αλλά ασύνδετων κόκκων σε τεχνητό πέτρωμα. Επιπλέον λειτουργεί σαν λιπαντικό μεταξύ των κόκκων των αδρανών, έτσι ώστε το νωπό σκυρόδεμα να είναι μια ρευστή αλλά συνεκτική μάζα. (αποφυγή απόμειξης).

### Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος

Από τη φύση του το σκυρόδεμα είναι ανομοιογενές υλικό. Η ανομοιογένεια αυτή οφείλεται σε μικροδιαφορές στην ποιότητα των υλικών (κυρίως των αδρανών) και την αναλογία τους στο μίγμα (λόγω π.χ. απορρύθμισης των ζυγιστηρίων, του αναμικτήρα κλπ) και σε διαφορές στη διάστρωση, συμπύκνωση ή συντήρηση του σκυροδέματος από θέση σε θέση κατασκευής (π.χ. περιοχές μεγάλης ή μικρής πυκνότητας οπλισμού, επιφάνεια ή εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, κορυφή ή βάση ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος κλπ). Λόγω της ανομοιομορφίας αυτής η ποιότητα, και πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε ένα σημείο της κατασκευής,  $f_c$ , θεωρείται σαν τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται δηλ από μία πιθανοτική κατανομή, με μέσο όρο,  $f_{cm}$  και τυπική απόκλιση  $s$  .

Καθοριστικά για την ασφάλεια μιας κατασκευής είναι τα αδύνατα σημεία της.

Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,  $f_{cm}$ , αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη χαρακτηριστική

αντοχή,  $f_{ck}$ . Κατά γενικά αποδεκτή σήμερα σύμβαση, σαν χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η μικρότερη αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος (δηλ. αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το ποσοστό υποαντοχής  $p=5\%$  των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από την χαρακτηριστική αντοχή και το υπόλοιπο 95 % θα ήταν πάνω απ' αυτήν). Έτσι αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή  $f_{cm}$  και τυπική απόκλιση  $s$ , είναι :  $f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot s$  όπου ο συντελεστής  $-1,645$  αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%.

<b>Κατηγορία σκυροδέματος</b>	$F_{ck}$ , κυλινδρικό	$F_{ck}$ , κυβικό
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

**Πίνακας 1. Κατηγορίες σκυροδέματος και οι τιμές αντοχής τους.**

Έτσι δύο σκυροδέματα με διαφορετική διασπορά ή διαφορετικό έλεγχο ποιότητας και επομένως διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης,  $s$ , θεωρούνται ισοδύναμα από απόψεως ασφάλειας, αν έχουν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή,  $f_{ck}$ . Αυτό σημαίνει πως αυτό που έχει τη μεγαλύτερη διασπορά ή το χειρότερο έλεγχο ποιότητας (δηλ. τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση), θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη μέση τιμή  $f_{cm}$  και επομένως μεγαλύτερο κόστος.

Οι νεότεροι κανονισμοί ορίζουν κατηγορίες σκυροδέματος, με βάση την χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή,  $f_{ck}$ . Έτσι σύμφωνα με τον νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος οι κατηγορίες σκυροδέματος είναι αυτές του πίνακα :

όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου ( $f_{ck}$ ), ενώ ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή κύβου ( $f_{ck, cube}$ ) σε  $MPa$ , στις 28 ημέρες.

## ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### ΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι βιομηχανικό κοκκώδες υλικό με υδραυλικές ιδιότητες. Δηλαδή σκληραίνει όταν αναμιγνύεται με το νερό σχηματίζοντας προϊόντα αδιάλυτα στο νερό. Είναι γνωστό ότι το τσιμέντο αποτελεί από αρχαιότατων χρόνων εξαιρετη υδραυλική κονία με εξαιρετικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται ευρύτατα και σήμερα σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, εκτός από την βιομηχανοποιημένη διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος, καθώς εκτός από υψηλή υδραυλικότητα συνδυάζει και υψηλές αντοχές.

Παραγωγή:

Το τσιμέντο, σε αντίθεση με άλλες κόνιες, είναι βιομηχανικό προϊόν που παρασκευάζεται από τη σύγχρονη όπτηση **ασβεστόλιθου** και **αργίλου**. Η σειρά των εργασιών από την εξόρυξη των πρώτων υλών ως το τελικό προϊόν είναι η ακόλουθη :

**α)** Εξόρυξη ασβεστολιθικών πετρωμάτων και αργιλικών εδαφών χωριστά. Τα πετρώματα αυτά περνούν από σπαστήρες, ώστε να τεμαχιστούν και να αποκτήσουν διάμετρο μερικών εκατοστών.

**β)** Μετά την έξοδο τους από τους σπαστήρες γίνεται ανάμειξη των δύο υλικών. (**προομοιογενοποίηση**)

**γ)** Έπειτα αλέθονται σε τριβεία, ώστε να αποκτήσουν διάμετρο λίγων χιλιοστών. Το προϊόν της αλέσεως, λεπτόκοκκο μείγμα ασβεστολιθικής και αργιλικής άμμου, αποθηκεύεται σε σιλό και ονομάζεται **φαρίνα**.

**δ)** Το μείγμα εισάγεται στο επάνω άκρο κυλινδρικής καμίνου, η οποία περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονα της. Η θερμότητα παράγεται από καυστήρα πετρελαίου, τοποθετούμενη στο κάτω άκρο της. Η θερμοκρασία μέσα στην κάμινο είναι περίπου 600 °C στο επάνω άκρο και φτάνει στους 1500 °C στο κάτω άκρο, που είναι και το σημείο εξόδου των προϊόντων. Τα προϊόντα της οπτήσεως ονομάζονται **εκβολάδες** ή διεθνώς **klinker**. Έχουν διάμετρο λίγων εκατοστών, χρώμα μαυροπράσινο και αποτελούν, κατά κάποιο τρόπο, τα πετρώματα του τσιμέντου.

**ε)** Τα προϊόντα αυτά της οπτήσεως, οι εκβολάδες, αλέθονται και αποκτούν τη γνωστή μορφή του τσιμέντου. Το υλικό αυτό, όπως προκύπτει από την άλεση των klinker, χωρίς καμιά προσθήκη ή τροποποίηση, ονομάζεται “**τσιμέντο Πόρτλαντ**”.

#### **Τύποι τσιμέντου:**

Κάθε χώρα παγκοσμίως παρασκευάζει τσιμέντο, χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Έτσι ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, το τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστολιθική, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθο κλπ.

**Τσιμέντο Τύπου I (CEM I), Πόρτλαντ αμιγή:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ και γύψου.

**Τσιμέντο Τύπου II (CEM II), Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ - Πόρτλαντ, γύψου και πουζολάνης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης σε ποσοστά από 6-35% κατά μέγιστο.

**Τσιμέντο Τύπου III (CEM III), Σκωριακά τσιμέντα ή σκωριοτσιμέντα:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ, γύψου και σκωρίας μόνο σε ποσοστά από 36-95% κατά μέγιστο.

**Τσιμέντο Τύπου IV (CEM IV), Πουζολανικά τσιμέντα:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση Κλίνκερ -Πόρτλαντ, γύψου και πουζολάνης που μπορεί να είναι φυσική ή ψημένη, ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστούχα και πυριτική παιπάλη. Δεν μπορεί να περιέχει σκωρία.

**Τσιμέντο Τύπου V (CEM V), Σύνθετα τσιμέντα:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και σε ίσο ποσοστό πουζολάνη φυσική ή ψημένη ή πυριτική ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά από 36-50% κατά μέγιστο. Δεν μπορεί να περιέχει πυριτική παιπάλη.

Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων:

Από άποψη αντοχής τα τσιμέντα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: **35, 45 και 55**. Οι αριθμοί παριστάνουν την αντοχή των τσιμέντων σε MPa όπως προσδιορίζεται συμβατικά σύμφωνα με τον κανονισμό. Έτσι, ένα τσιμέντο: **I /35** σημαίνει ότι είναι τύπου I και συμβατικής αντοχής 35 MPa. Ο ρυθμός αυξήσεως της αντοχής του τσιμέντου επιτυγχάνεται συνήθως με αύξηση της λεπτότητας (Blaine). Ένα λεπτόκοκκο τσιμέντο (Blaine=4000 cm<sup>2</sup>/g) έχει γρηγορότερο ρυθμό αυξήσεως της αντοχής από ένα χονδροαλεσμένο τσιμέντο (Blaine=2500-3000 cm<sup>2</sup>/g). Θεωρητικά οι τύποι των τσιμέντων θα ήταν 9. Οι παραγόμενοι όμως τύποι είναι λιγότεροι γιατί είτε δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί πρακτικά εφικτοί, είτε δεν είναι απαραίτητοι στην πράξη.

## **Χρήση τσιμέντων στην Ελλάδα:**

Σήμερα στην Ελληνική αγορά, εκτός από μικρή μερίδα ειδικών τσιμέντων, χρησιμοποιούνται ευρέως τα γνωστά τσιμέντα Πόρτλαντ που συνοπτικά αναφέρονται παρακάτω:

- 1. Τσιμέντο Πόρτλαντ – I/45:** Παρουσιάζει γρήγορη ανάπτυξη αντοχών και είναι κατάλληλο για την κατασκευή σκυροδεμάτων υψηλών κατηγοριών και δομικών στοιχείων που απαιτούν γρήγορο ξεκαλούπωμα (προκατασκευή και προεντεταμένο σκυρόδεμα).
- 2. Τσιμέντο Πόρτλαντ – I/55:** Η χρήση του στο εσωτερικό είναι περιορισμένη. Οι ποιότητες και οι χρήσεις του είναι ανάλογες με το τσιμέντο I/45 με επιδόσεις καλύτερες, κυρίως στην ανάπτυξη αντοχών.
- 3. Τσιμέντο Πόρτλαντ με Πουζολάνη – II/35:** Στην αγορά είναι γνωστό με την ονομασία "κοινό τσιμέντο" ή Π 35. Χρησιμοποιείται για τα σκυροδέματα των συνήθων κατασκευών. Η ανάπτυξη των αντοχών του είναι βραδύτερη συγκριτικά με τους τύπους I, αλλά λόγω της παρουσίας ποζολανικών υλικών στη σύνθεσή του, συνεχίζονται να αυξάνονται μακροχρόνια οι αντοχές του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την αύξηση της ανθεκτικότητάς του. Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με το τσιμέντο αυτό, παρουσιάζει μειωμένη ανάπτυξη θερμοκρασιών (χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης), μειωμένη διαπερατότητα και αυξημένη ανθεκτικότητα στα θειικά άλατα, το θαλασσινό νερό και σε διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα (χρήση σε λιμενικά έργα).
- 4. Τσιμέντο Πόρτλαντ με Πουζολάνη – II/45 (ΠΥΑ 2000):** Χρησιμοποιείται κυρίως σε έργα της ΔΕΗ (φράγματα, σήραγγες). Είναι τσιμέντο ανάλογο του II/35 και έχει βελτιωμένα τα ειδικά χαρακτηριστικά και το ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών έναντι του II/35. Είναι κατάλληλο για χρήση σε λιμενικά έργα.
- 5. Τσιμέντο Πόρτλαντ ανθεκτικό στα θειικά – IV/55:** Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με το τσιμέντο αυτό, παρουσιάζει ισχυρή αντίσταση στις προσβολές από τα θειικά άλατα και το θαλασσινό νερό. Ειδικότερα, η χρήση του για σκυροδετήσεις με αυξημένο βαθμό χημικής προσβολής καθορίζεται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος.
- 6. Τσιμέντο Πόρτλαντ Λευκό – I/55:** Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η λευκότητα. Έχει ιδιότητες και επιδόσεις αντίστοιχες με αυτές του τσιμέντου I/55 και



χρησιμοποιείται στην πλακοποιία, στην κατασκευή διακοσμητικών στοιχείων, μωσαϊκών δαπέδων κλπ.

### **Κατάταξη με βάση τις ιδιότητες του:**

Δύο από τις ιδιότητες του τσιμέντου, η **ταχύτητα πήξης** και η **αντοχή σε θλίψη**, αποτελούν βασικά κριτήρια για την κατάταξη των τσιμέντων σε διάφορες κατηγορίες. Με βάση την **ταχύτητα πήξης** τα τσιμέντα διακρίνονται:

- Τσιμέντα ταχείας πήξης ή αργιλικά, στα οποία η πήξη συμπληρώνεται σε διάστημα μικρότερο της μισής ώρας. Είναι πλουσιότερα σε οξείδιο του αργιλίου ( $Al_2O_3$ )
- Συνήθη τσιμέντα, με χρόνο πήξης που κυμαίνεται μεταξύ 6-8 ωρών.
- Τσιμέντα βραδείας πήξης ή πυριτικά, στα οποία η πήξη αρχίζει μετά τις 8 ώρες. Είναι πλουσιότερα σε οξείδιο του πυριτίου ( $SiO_2$ ).

Με βάση την **αντοχή σε θλίψη** τα τσιμέντα κατατάσσονται:

- Κοινό τσιμέντο. Η αντοχή σε θλίψη του δοκιμίου είναι τουλάχιστον  $275 \text{ kg/cm}^2$
- Τσιμέντο υψηλής αντοχής. Η αντοχή σε θλίψη του δοκιμίου είναι τουλάχιστον  $400 \text{ kg/cm}^2$
- Τσιμέντο ειδικής παραγγελίας υψηλής αντοχής. Η αντοχή των τσιμέντων αυτών καθορίζεται με ειδική παραγγελία.

Ποσότητα τσιμέντου:

Η ποσότητα του τσιμέντου εξαρτάται:

- από την κατηγορία του παρασκευαζομένου σκυροδέματος
- από την ποιότητα του τσιμέντου
- από το μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου (λεπτότητα αλέσεως)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι ενδεικτικές ποσότητες ανά κατηγορία σκυροδέματος για ένα κυβικό μέτρο ( $m^3$ ) σκυροδέματος.

α/α	Κατηγορίες σκυροδέματος	Ποσότητα τσιμέντου σε Kg ανά m <sup>3</sup> σκυροδέματος
1	C 8	240 – 250
2	C 12	280 – 300
3	C 16	300 – 350
4	C 20	350 - 400

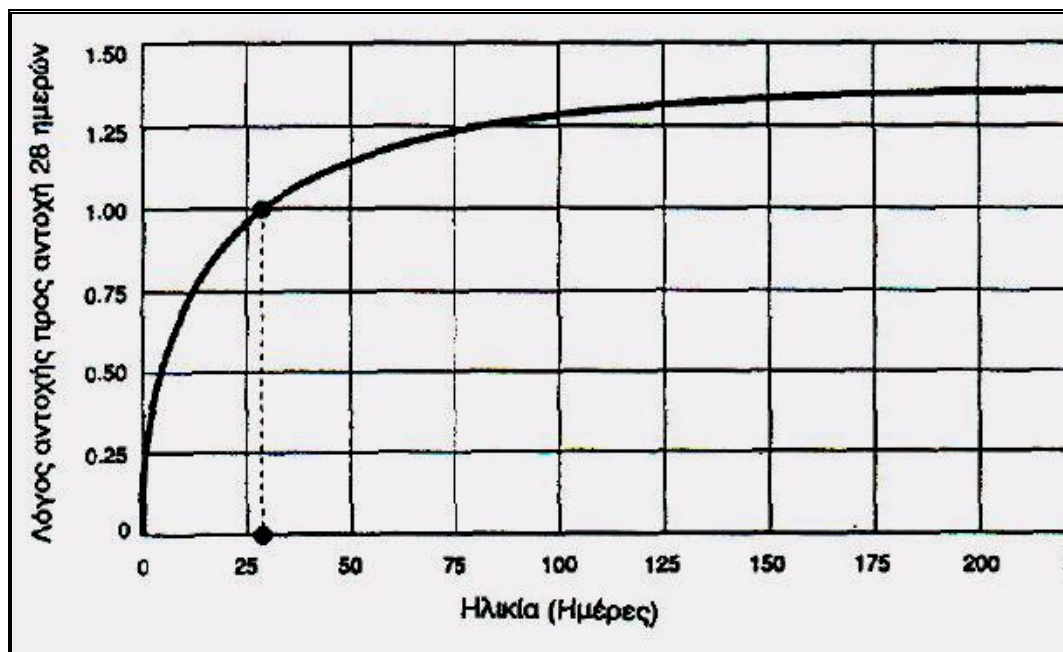
Πίνακας 2. Ποσότητα τσιμέντου ανά κατηγορία σκυροδέματος σε 1 κ.μ

Στο σκυρόδεμα πρέπει να περιέχεται η απαιτούμενη και συγχρόνως η μικρότερη δυνατή ποσότητα τσιμέντου, ώστε να είναι δυνατόν να επιτευχθεί η απαιτούμενη θλιπτική αντοχή και να προστατεύονται οι οπλισμοί από την διάβρωση.

Ενυδάτωση του τσιμέντου:

Η πήξη και η σκλήρυνση του σκυροδέματος οφείλονται αποκλειστικά στη χημική δράση μεταξύ τσιμέντου και νερού. Τα συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό ύστερα από μία σειρά περίπλοκων χημικών αντιδράσεων που διαρκούν επί χρόνια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ενυδάτωση** του τσιμέντου. Με την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό δημιουργείται μια γκριζοπράσινη πολτώδης μάζα, η τσιμεντοκονία. Για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, το μείγμα δεν φαίνεται να παρουσιάζει καμιά μεταβολή. Αργότερα όμως φαίνεται ότι αρχίζει να πήζει προοδευτικά έως ότου στερεοποιηθεί τελείως. Το φαινόμενο αυτό καλείται **πήξη της τσιμεντοκονίας** και οι χαρακτηριστικές στιγμές αλλαγής της φυσικής καταστάσεως ονομάζονται αρχή και τέλος της πήξεως. Κατά το χρονικό διάστημα ως την αρχή της πήξεως, ο τσιμεντοπολτός είναι ακόμη επιδεικτικός κατεργασίας και μεταφοράς.

Γι αυτό και ο κανονισμός ορίζει ότι η αρχή της πήξεως για τα κοινά τσιμέντα δεν πρέπει να εμφανίζεται νωρίτερα από μία ώρα από τη στιγμή ανάμιξης των δύο υλικών και το τέλος της πήξεως αργότερα από 8 ώρες. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, δηλαδή του μίγματος τσιμέντου, νερού και αδρανών υλικών, ο χρόνος ως την αρχή της πήξεως γίνεται δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος.



Εικόνα 2. Λόγος αντοχής προς αντοχή 28 ημερών.

Πρόσμικτα υλικά του τσιμέντου

Ποζολάνες

Η ονομασία ποζολάνη προήλθε από την περιοχή Pozzuoli της Ιταλίας, όπου οι Ρωμαίοι είχαν ανακαλύψει ότι το έδαφος της περιοχής παρουσίαζε υδραυλικές ιδιότητες. Γαίες της περιοχής χρησιμοποιούσαν οι Ρωμαίοι στα κονιάματα τους. Σήμερα ποζολάνες ονομάζουμε πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά, που έχουν την δυνατότητα να ενώνονται με την υδράσβεστο  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και να σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις, που με το χρόνο σκληρύνονται και αποκτούν μικρές ή μεγαλύτερες αντοχές. Η δράση αυτή οφείλεται κυρίως στο άμορφο πυριτικό υλικό των πολοζανών. Για να χρησιμοποιηθεί μια ποζολάνη για την παρασκευή τσιμέντων τύπου II ή III πρέπει να ικανοποιεί την δοκιμή δραστηριότητας που προβλέπει ο Κανονισμός, δηλαδή να παρουσιάζει συμβατική αντοχή τουλάχιστον 5 MPa. Στην Ελλάδα υπάρχουν ηφαιστιογενείς γαίες με ποζολανικές ιδιότητες σε πολλές περιοχές, όπως η Θήρα (θηραϊκή γή), η νήσος Μήλος (Μηλαϊκή γή), τα νησιά Γιαλί και Νίσυρος των Δωδεκανήσων, στο νομό Πέλλης και αλλού. Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι η

θηραϊκή Γή χρησιμοποιείται από τις ελληνικές βιομηχανίες τσιμέντου ως πρόσμικτο ποζολανικό υλικό τσιμέντου από το 1930 περίπου.

### Ιπτάμενη τέφρα

Ιπτάμενη τέφρα ονομάζουμε τα σε λεπτότατο καταμερισμό κατάλοιπα που προκύπτουν από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών και που συλλέγονται κατά την έξοδο των αερίων καύσεως από τις καπνοδόχους των ατμοηλεκτρικών σταθμών με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Η δραστικότητα των τεφρών οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{CaO}$ . Οι δύο πρώτες ενώσεις προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ το οξειδίο του  $\text{Ca}$  υδραυλικές ιδιότητες. Στην Ελλάδα ιπτάμενη τέφρα παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα και στη Μεγαλόπολη.

### Φίλλερ (Filler)

Φίλλερ ονομάζουμε υλικά, συνήθως αδρανή, σε λεπτότατο καταμερισμό. Τα φίλλερ σε μικρές ποσότητες επιδρούν ευνοϊκά στο εργάσιμο και την υδατοπερατότητα. Η δράση τους είναι κυρίως μηχανική, δηλαδή δρουν σαν λιπαντικό για το εργάσιμο και με τη διόγκωση των κόκκων παρουσία υγρασίας αυξάνουν την υδατοστεγανότητα. Σπανίως παρουσιάζουν και ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες. Αυτό όμως εξαρτάται από το αρχικό υλικό από το οποίο προέρχεται το φίλλερ.

## ΤΟ ΝΕΡΟ

### *Γενικά:*

Ένα από τα κυριότερα συστατικά του σκυροδέματος είναι το νερό. Το νερό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι πόσιμο, καθαρό και απαλλαγμένο από βλαπτικές ουσίες (οργανικά ή ανόργανα στερεά, θειικά άλατα, οξέα) σε μεγάλο ποσοστό γιατί μπορούν να βλάψουν την ποιότητα του σκυροδέματος και να προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού. Ο Ν.Κ.Τ.Σ. επιτρέπει την χρήση θαλασσινού

νερού μίξης σε άοπλο φέρων σκυρόδεμα, αν η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%.

Λόγος τσιμέντου-νερού (υδατοτσιμεντοσυντελεστής):

Είναι γνωστό ότι στην αντοχή του σκυροδέματος παίζει σπουδαίο ρόλο ο λόγος κατά βάρους του νερού προς τσιμέντο w/z. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι η άριστη αναλογία w/z κυμαίνεται μεταξύ 0,4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0,5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Επίσης παρατηρείται ότι, ενώ μια απόκλιση προς τα επάνω από το άριστο ποσοστό κατά 10% συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15% περίπου, μια ίση απόκλιση προς τα κάτω, συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30% περίπου. Είναι επομένως φρόνιμο, κατά την επιδίωξη της βέλτιστης αναλογίας νερού να παραμένει κανείς πάντοτε για λόγους ασφαλείας προς τα επάνω, παρά να κινδυνεύει η ποσότητα νερού να είναι μικρότερη της βέλτιστης με συνέπεια να υποστεί αλματώδη πτώση η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Τέλος η ποσότητα του νερού δεν πρέπει να είναι τόσο λίγη ώστε να παραβλάπτεται η καλή κατεργασία του όλου μίγματος.

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται ο μέγιστος λόγος w/z κατά μέσο όρο για κάθε ποιότητα σκυροδέματος:

<b>α/α</b>	<b>Ποιότητα σκυροδέματος</b>	<b>Μέγιστος λόγος βάρους w/z για m<sup>3</sup> σκυροδέματος</b>
1	C 8	0,70
2	C 12	0,575
3	C 16	0,485
4	C 20	0,42

**Πίνακας 3.** Μέγιστος λόγος βάρους w/z για m<sup>3</sup> σκυροδέματος ανά κατηγορία.

## ΑΔΡΑΝΗ

### Προέλευση αδρανών:

Γενικά τα αδρανή ( που ονομάζονται έτσι γιατί είναι από χημική άποψη αδρανή προς το τσιμέντο) προέρχονται απευθείας από τη φύση ή με συλλογή από ρέματα κλπ (φυσικά ή συλλεκτά) ή από θραύση πετρωμάτων (θραυστά). Για τα κοινά σκυροδέματα και τις ελληνικές συνθήκες, τα καλύτερα αδρανή προέρχονται από ασβεστολιθικά ή πυριτικά πετρώματα.

### Η μορφή των κόκκων:

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς.

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

### Αντοχή των αδρανών:

<b>Κατηγορία αδρανών</b>	<b>Μέγεθος κόκκων</b>
<b>A) Άμμος</b>	<b>Μέχρι 2,0 mm</b>
<b>B) Λεπτόκκοκα σκύρα</b> <small>Πίνακας 4. Μέγεθος κόκκων ανά κατηγορία αδρανών</small>	<b>Μέχρι 2,5 - 7 mm</b>
	<b>Μέχρι 7 - 14 mm</b>
	<b>Μέχρι 14 - 30 mm</b>
<b>Γ) Χονδρόκκοκα σκύρα</b>	<b>Μέχρι 30 - 70 mm</b>

Για την ικανοποιητική αντοχή του σκυροδέματος, το υλικό των αδρανών (δηλ. το πέτρωμα) πρέπει να έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα στο χρόνο, μικρή επιφανειακή φθορά σε κρούση, χημική αδράνεια σε σχέση με το τσιμέντο και το

νερό (και με τις ουσίες που περιέχονται σε αυτό) και σταθερότητα όγκου (π.χ. να μην διογκώνεται λόγω απορρόφησης νερού) .

Ο Ν.Κ.Τ.Σ θεωρεί σαν ικανοποιητική τιμή της αντοχής σε θλίψη του πετρώματος τα  $65 M_{Pa}$  , επειδή όμως για τις συνήθειες στην Ελλάδα κατηγορίες σκυροδέματος η αντοχή του τελευταίου ελάχιστα επηρεάζεται από την αντοχή του πετρώματος των αδρανών, ο κανονισμός επιτρέπει και την χρήση αδρανών με αντοχή πετρώματος μεταξύ  $45 M_{Pa}$  και  $65 M_{Pa}$ , εφόσον με τα αδρανή αυτά είναι δυνατή η επίτευξη της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος που έχει προδιαγραφεί. Εφόσον πληρούν την προϋπόθεση αυτή, αδρανή από μητρικό πέτρωμα με αντοχή μικρότερη και από  $45 M_{Pa}$  μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνο για την Παρασκευή σκυροδέματος που η επιφάνεια του πρόκειται να επιχρισθεί, καθότι με τέτοια αδρανή η αντοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος σε φθορά από τη χρήση και σε κρούση είναι αμφίβολη.

Γενικά για τα αδρανή υλικά:

Τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι:

- σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα
- ανθεκτικά από σκληρά πετρώματα (γρανίτες και ασβεστόλιθοι)
- καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πυλός, χημικά δραστικές ουσίες, άνθρακες).
- σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας)
- απαλλαγμένα από παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm
- καλά διαβαθμισμένα.

Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου, των σκύρων και του μίγματος αυτών πρέπει να βρίσκεται μέσα στις περιοχές που περιλαμβάνονται στα διαγράμματα που προβλέπουν οι κανονισμοί. Κάθε υλικό που παρουσιάζει κοκκομετρική σύνθεση, τέτοια ώστε η κοκκομετρική του καμπύλη να βρίσκεται εκτός από τις επιτρεπόμενες υπό των προδιαγραφών καμπύλες, ή η κοκκομετρική του καμπύλη να είναι ασυνεχής, πρέπει να απορρίπτεται ή να βελτιώνεται προτού χρησιμοποιηθεί.

Επίσης ισχύουν τα παρακάτω:

1. Τα αδρανή μέχρι 7 mm – χωρίς τσιμέντο- πρέπει να καλύπτουν το 35-45% της συνολικής ποσότητας των αδρανών

2. Ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος τα αδρανή υλικά μπορούν να προσκομίζονται στο εργοτάξιο αναμεμιγμένα ή διαβαθμισμένα.

- Προκειμένου για σκυρόδεμα C8 τα αδρανή υλικά μπορούν να είναι αμμοχάλικα ποταμού ή θραυστά λατομείου αναμεμιγμένα, αρκεί μακροσκοπικώς να είναι προφανές ότι περιέχουν και αρκετό χονδρόκοκκο υλικό.
- Προκειμένου όμως για σκυροδέματα ανώτερης ποιότητας πρέπει να προσκομίζονται σε ξεχωριστές ομάδες. Για μεν τα σκυροδέματα C12 και C16 να προσκομίζονται σε τρεις διαβαθμίσεις (άμμος, γαρμπίλι, σκύρα).
- Για δε τα σκυροδέματα C20 και άνω σε τέσσερις διαβαθμίσεις (άμμος, ριζάκι, γαρμπίλι, σκύρα).

3. Όταν χρησιμοποιούνται θραυστά αδρανή και προπαντός θραυστή άμμος καλό είναι να προστίθενται σε αυτά και άμμος ποταμών.

Αποθήκευση των αδρανών:

Τέλος η αποθήκευση των αδρανών πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε:

α) Να μην διαχωρίζονται οι κόκκοι των αδρανών, όπως π.χ. συμβαίνει όταν ένα χονδρόκοκκο αδρανές αδειάζετε από μεγάλο ύψος ή όταν αναμοχλεύεται.

β) Να αποφεύγεται η ανάμιξη διαφορετικών αδρανών, όπως π.χ. συμβαίνει όταν δύο σωροί εφάπτονται χωρίς ενδιάμεσο χώρισμα.

γ) Να αποφεύγεται η ρύπανση τους από επιβλαβείς προσμίξεις (χώμα, λύματα κ.λ.π.)



## ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### ΓΕΝΙΚΑ

Κατά κανόνα προστίθενται στο μείγμα ορισμένες χημικές ουσίες που λέγονται “πρόσθετα”, με σκοπό τη βελτίωση, μέσω φυσικοχημικής αντίδρασης, ορισμένων ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Σε σύγκριση με τα λοιπά συστατικά του σκυροδέματος, τα πρόσθετα έχουν σημαντικό, ανά μονάδα βάρους ή όγκου, κόστος.

### ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι κατηγορίες των πρόσθετων υλικών, είναι:

- **Αερατικά**, που αναπτύσσουν στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος μικροσκοπικές (0,02-0,2 mm) φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ζέστης- παγετού.
- **Πρόσθετα επιταχυντικά της πήξης**, για σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- **Πρόσθετα επιβραδυντικά της πήξης**, για σκυροδέτηση σε πολύ ζεστό καιρό.
- **Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά πρόσθετα**, για αύξηση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος είναι πιο χρήσιμα στην πράξη. Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας, που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδραση τους στην ρευστότητα του μίγματος κατά κανόνα εξαφανίζεται μετά από 20-30 min από την προσθήκη τους στο μίγμα. Για τον λόγο αυτό, αν η ανάμειξη των υλικών του σκυροδέματος γίνεται σε εργοστάσιο ετοιμού σκυροδέματος και ακολουθεί μεταφορά στο έργο σε αυτοκίνητο- αναμικτήρα, ένα μέρος ή και το σύνολο του υπερρευστοποιητικού χρειάζεται να προστίθεται στο μείγμα όχι στο εργοστάσιο παραγωγής αλλά επιτόπου το έργου, λίγο πριν τη σκυροδέτηση.

## 1.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ , από 01/04/01 τα τσιμέντα που κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα,

**EN 197-1 : Τσιμέντο Μέρος-1 :** " *Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα* " και  
**EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος-2 :** " *Αξιολόγηση συμμόρφωσης* "

τα οποία έχουν υιοθετηθεί σαν Ελληνικά Πρότυπα από τον ΕΛΟΤ<sup>2</sup> .

<sup>1</sup> Η απόφαση είναι αποτέλεσμα της εντολής M114 της ΕΕ προς την CEN και της Ευρωπαϊκής οδηγίας Δομικών Κατασκευών CPD 89/106.

<sup>2</sup> Ο ΕΛΟΤ και ειδικότερα η επιτροπή ΤΕ-51 "Τσιμέντο και Δομικοί Άσβεστοι" έχουν εκδώσει τα αντίστοιχα ελληνικά πρότυπα **ΕΛΟΤ EN 197-1** και **ΕΛΟΤ EN 197-2** , τα οποία είναι διαθέσιμα από τα τέλη Οκτωβρίου 2000.

### ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ - ΣΤΟΧΟΙ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Το τσιμέντο, ως υλικό που διέπεται από την CPD 89/106, όπως και άλλα δομικά υλικά, θα πρέπει να πληρεί ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις, όσον αφορά τις ιδιότητές του και τη σταθερότητα παραγωγής του.

Στην σύνταξη των εν λόγω προτύπων συμπεριελήφθησαν και κωδικοποιήθηκαν όλα τα κοινής αποδοχής και ευρείας χρήσης τσιμέντα, που παράγονται στις χώρες μέλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοινής ορολογίας για όλους τους μελετητές - χρήστες - κατασκευαστές δομικών έργων της ΕΕ.

Η ποιότητα του τσιμέντου, σε αντίθεση με άλλα υλικά, πιστοποιείται με το αυστηρότερο σύστημα αξιολόγησης συμμόρφωσης, με ανεξάρτητη εξωτερική δειγματοληψία, από ανεξάρτητο αναγνωρισμένο φορέα πιστοποίησης.

## ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ

Κάθε χώρα παγκοσμίως παρασκευάζει τσιμέντο, χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Έτσι ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, το τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα - πυριτική ή ασβεστολιθική, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθο κλπ.

Γι' αυτό το λόγο, το πρότυπο προβλέπει μεγάλο αριθμό προϊόντων τσιμέντου, τα οποία όμως δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη σε κάθε χώρα μέλος, λόγω των ιδιαιτεροτήτων στις πρώτες ύλες και στο κλίμα αυτών.

Το πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει σε γενική μορφή τους εξής τύπους τσιμέντου :

ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

**Πίνακας 5. Βασικοί τύποι τσιμέντου**

Το είδος και το ποσοστό των συστατικών του τσιμέντου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, σύμφωνα με το πρότυπο, καθορίζουν τους τύπους και τα 27 προϊόντα τσιμέντου που αναλυτικά αναφέρονται στον Πίνακα.

Επίσης το πρότυπο προδιαγράφει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη σε κονίαμα πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1 *Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου - Μέρος 1 : Προσδιορισμός αντοχών.*

Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής των 28 ημερών χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη

κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N , R (Πίνακας 6).

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή στη θλίψη MPa				Αρχικός χρόνος πήξης	Διόγκωση (Διαστολή)
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες			
32,5 N	-	≥16.0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥10.0	-				
42,5 N	≥10.0	-	≥42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥20.0	-				
52,5 N	≥20.0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥30.0	-				

Πίνακας 6. Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές

Η συμμόρφωση των τσιμεντών ως προς τα όρια αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο.

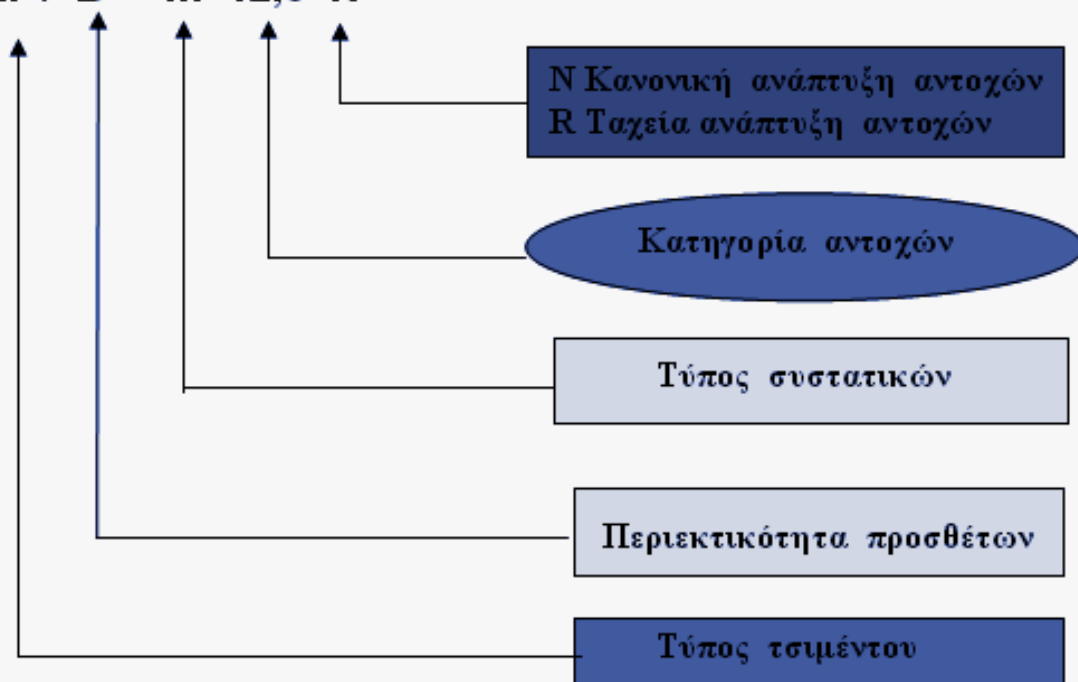
Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμεντών, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, καθορίζεται από:

- τον κύριο τύπο τσιμέντου,
- το ποσοστό clinker,
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού,
- την κατηγορία αντοχής,
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής,

όπως παραστατικά φαίνεται στη εικόνα 3.

Σχήμα 1: Ονοματολογία Τσιμέντων ΕΛΟΤ EN 197-1

**CEM II / B - M 42,5 N**



Εικόνα 3. Ονοματολογία Τσιμέντων

Οι διαφορές στις κατηγορίες αντοχών του υφισταμένου ελληνικού κανονισμού ΠΔ 244/80 και του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

**Πίνακας : Διαφορές αντοχών ΠΔ 244/80 και ΕΛΟΤ EN 197-1**

ΠΔ 244/80		ΕΛΟΤ EN 197-1	
Κατηγορία Αντοχών	ΟΡΙΑ ΑΝΤΟΧΩΝ (N/mm <sup>2</sup> )	Κατηγορία Αντοχών	ΟΡΙΑ ΑΝΤΟΧΩΝ (N/mm <sup>2</sup> )
35	25-45	32,5	32,5-52,5
45	35-55	42,5	42,5-62,5
55	≥ 45	52,5	≥ 52,5

Πίνακας 7. Διαφορές αντοχών

## ΕΝΑΡΞΗ ΙΣΧΥΟΣ - ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ

Τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 197-1 και ΕΛΟΤ EN 197-2 έχουν τεθεί σε ισχύ με Υπουργική απόφαση (ΦΕΚ 917 Β / 17-07-01) που προέβλεπε μεταβατική περίοδο μέχρι 31/12/01 για την προσαρμογή του κατασκευαστικού κλάδου σε αυτά.

Στην μεταβατική αυτή περίοδο οι ποιότητες που διατίθενταν από την Ελληνική Τσιμεντοβιομηχανία ήταν σύμφωνες είτε με το πρότυπο ΕΛΟΤ 197-1 είτε και με το ΠΔ 244/80.

Παράλληλα ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος τροποποιείται για να συμπεριλάβει στις διατάξεις του τα νέα προϊόντα τσιμέντου και μέσα στη μεταβατική περίοδο θα πρέπει να γίνουν οι απαιτούμενες αλλαγές (συμβάσεις, τιμολόγια, μελέτες σύνθεσης, κλπ.).

## ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟ ΣΤΑ ΘΕΙΙΚΑ

Για τα έργα που απαιτείται χρήση τσιμέντου ανθεκτικού στα θειικά, παραμένει σε ισχύ το ΠΔ 244/80, διότι ο τύπος αυτός δεν προβλέπεται στα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα.

## 1.4 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων

Τα συμβατικά δοκίμια, με τα οποία θα γίνονται οι έλεγχοι συμμορφώσεως, καθώς και τα δοκίμια του έργου θα είναι κυβικά ακμής 15 cm ή κυλινδρικά διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm. Για τους ελέγχους συμμορφώσεως θα χρησιμοποιούνται για το ίδιο έργο δοκίμια της ίδιας μορφής και διαστάσεων, με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στη Μελέτη Συνθέσεως. Στην περίπτωση του εργοστασιακού έτοιμου σκυροδέματος που η Μελέτη Συνθέσεως του έχει γίνει στο εργοστάσιο, η μορφή και οι διαστάσεις των δοκιμίων θα προδιαγραφόνται. Για το ίδιο έργο απαγορεύεται η λήψη διαφορετικών δοκιμίων και η σύγκριση της αντοχής τους μετά από πολλαπλασιασμό με συντελεστές αναγωγής.

Αντοχές κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος 15×30cm σε MPa	≤9,2	12,8	18,4	25,4	≥39,5
Συντελεστές πολλαπλασιασμού για αναγωγή αντοχής κυλίνδρου σε αντοχή κύβου 20×20×20cm	1,30	1,25	1,22	1,18	1,14

\*Για ενδιάμεσες τιμές γίνεται γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 8. Σχέση αντοχών μεταξύ κυβικού και κυλινδρικού δοκιμίου.

### Οδηγίες λήψεως δοκιμίων σκυροδέματος:

Για την παρασκευή των δοκιμίων σκυροδέματος του έργου, ισχύουν οι διατάξεις του άρθρου 13 του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος - 97 (ΦΕΚ 315/Β/17-4-97) και των Προδιαγραφών ΣΚ-303 και ΣΚ-350 του Υπουργείου Δημοσίων Έργων. Υπομνηστική παράθεση των κυριότερων διατάξεων των συνηθέστερων περιπτώσεων, που αφορούν τα συμβατικά κυβικά δοκίμια, που εφαρμόζονται σχεδόν αποκλειστικά στην πράξη, περιλαμβάνεται περιληπτικά στα επόμενα. Τα συμβατικά δοκίμια που προορίζονται για τους ελέγχους συμμορφώσεως, θα είναι για ολόκληρο το έργο όλα των αυτών διαστάσεων, κυβικά

15 \* 15 \* 15cm., λαμβανόμενα με χυτοσιδηρές μήτρες. Ο αριθμός των δοκιμίων που απαιτείται για κάθε διαστρωμένο τμήμα, είναι, ανά ημέρα έξι (6) για ποσότητα σκυροδέματος μέχρι 150 m<sup>3</sup>, ή δώδεκα (12) δοκίμια για ποσότητα σκυροδέματος μεγαλύτερη των 150 m<sup>3</sup>. Αριθμός δοκιμίων μικρότερος των έξι (6) ή των δώδεκα (12) αντίστοιχα, δεν επιτρέπει την εφαρμογή των Κριτηρίων Συμμορφώσεως Α και Β αντίστοιχως, που προβλέπει ο Κ.Τ.Σ. Υποδεικνύεται η λήψη και έβδομου ή δέκατου τρίτου δοκιμίου, που θα καλύψει την περίπτωση καταστροφής ή τραυματισμού ή εμφανών ελαττωμάτων ενός από τα υπόλοιπα έξι ή δώδεκα. Στις περιπτώσεις που απαιτείται έλεγχος δοκιμίων και σε ηλικίες μικρότερες των 28 ημερών, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερος αριθμός δοκιμίων. Από κάθε αυτοκίνητο (βαρέλα) δεν επιτρέπεται η λήψη περισσότερων του ενός δοκιμίων, εκτός εάν το τμήμα που διαστρώνεται απαιτεί λιγότερα από έξι (6) αυτοκίνητα σκυροδέματος. Στην περίπτωση αυτή πρέπει μεταξύ της λήψεως του πρώτου και του δεύτερου δοκιμίου από το ίδιο αυτοκίνητο να έχει διαστρωθεί όγκος σκυροδέματος τουλάχιστον 1m<sup>3</sup>. Κατ' εξαίρεση, για ημερήσια ποσότητα σκυροδέματος μικρότερη των 20m<sup>3</sup> ισχύουν οι απαιτήσεις του άρθρου 13.3.10 του Κ.Τ.Σ. και εφαρμόζεται το Κριτήριο Συμμορφώσεως Ε (Κ.Τ.Σ. -13.6.5). Συνοπτικά, θα λαμβάνονται τότε τρία δοκίμια από κάθε αυτοκίνητο, από ένα (εάν δεν υπάρχει δεύτερο) ή δύο τυχαία αυτοκίνητα, που καθένα τους θα θεωρείται ότι αποτελεί ξεχωριστή παρτίδα.

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για την παρασκευή δοκιμίων δεν πρέπει να ανήκει στο αρχικό 15 έως 20% του όγκου του σκυροδέματος του αυτοκινήτου (βαρέλας) που εκφορτώνεται, ούτε στο τελευταίο 15 έως 20%. Αν χρησιμοποιηθεί υπερρευστοποιητικό, η λήψη του δοκιμίου θα γίνεται μετά την ανάμειξη του. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της λήψεως του σκυροδέματος και της παρασκευής του δοκιμίου, δεν πρέπει να ξεπερνά τα 15 λεπτά της ώρας. Οι μήτρες πριν από τη χρήση τους πρέπει να έχουν λαδωθεί ελαφρά με ορυκτέλαιο. Για κάθιση σκυροδέματος μέχρι 50 mm, η συμπύκνωση γίνεται με δονητή, αμέσως μετά από το πλήρες γέμισμα της μήτρας. Για μεγαλύτερη κάθιση γίνεται με τη ράβδο συμπυκνώσεως. Στη δεύτερη περίπτωση (της ράβδου), κάθε μήτρα γεμίζεται με τη σέσουλα (όχι μυστρί, γιατί διαφεύγει το λεπτό υλικό) σε δύο στρώσεις (μισή και μισή κάθε φορά) και κάθε στρώση συμπυκνώνεται ιδιαίτερα. Η συμπύκνωση κάθε στρώσεως απαιτεί 25 χτυπήματα με την σχετική ράβδο.

Η ράβδος συμπυκνώσεως είναι Φ16, μήκους 60 cm., με στρογγυλεμένα άκρα. Κατά τη συμπύκνωση της κατώτερης στρώσης η ράβδος πρέπει να εισχωρεί μέχρι



τον πυθμένα της μήτρας. Η συμπύκνωση θα γίνεται αμέσως μετά την τοποθέτηση του σκυροδέματος στη μήτρα και χωρίς διακοπή μεταξύ 1ης και 2ης στρώσης. Μετά τη συμπύκνωση επιπεδώνεται η τελική επιφάνεια και αριθμείται το δοκίμιο. Τα δοκίμια πρέπει να παραμείνουν στη σκιά, μέσα στις μήτρες, χωρίς χτυπήματα, δονήσεις, ξήρανση τουλάχιστον 20 ώρες και όχι περισσότερο από 32 ώρες. Μετά την αφαίρεση τους από τις μήτρες τα δοκίμια μεταφέρονται το ταχύτερο δυνατόν στο δημόσιο ή αναγνωρισμένο ιδιωτικό εργαστήριο όπου θα θραυστούν. Σε περίπτωση που προβλέπεται σημαντική καθυστέρηση παραδόσεως στο εργαστήριο, τα δοκίμια πρέπει να διατηρηθούν συσκευασμένα μέσα σε υγρή άμμο, πριονίδια κ.λπ. για τη διατήρηση της υγρασίας τους. Κρούσεις και δονήσεις κατά τη μεταφορά και αποκλίσεις από τη θερμοκρασία συντηρήσεως ( $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ ), πρέπει να αποφεύγονται.

Για κάθε δοκίμιο, επιβάλλεται η αναγραφή του αριθμού του δελτίου αποστολής και του αριθμού κυκλοφορίας του αυτοκινήτου (ή αντίστροφα του αριθμού δοκιμίου επί του δελτίου αποστολής), καθώς και της ώρας λήψεως του. Είναι σκόπιμη η ζύγιση των δοκιμίων για τον προσδιορισμό του πραγματικού ειδικού βάρους του υπ' όψη σκυροδέματος, με το οποίο θα γίνει ο υπολογισμός του όγκου της ποσότητας που προσκομίστηκε, εκ του βάρους του περιεχομένου κάθε αυτοκινήτου - βαρέλας.

## 1.5 ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### *Ανάμιξη σκυροδέματος*

Τα αδρανή υλικά και το τσιμέντο πρέπει να μετριοούνται σε βάρος και το νερό σε βάρος ή όγκο. Τα στερεά πρόσθετα σε σκόνη πρέπει να μετριοούνται σε μέρη βάρους και τα υγρά πρόσθετα σε μέρη βάρους ή όγκου. Μέτρηση των αδρανών σε όγκο επιτρέπεται μόνο σε μικρά έργα (άρθρο 13.4).

Στην περίπτωση αυτή θα ισχύουν τα ακόλουθα:

- α) Η απαιτούμενη αντοχή θα υπερβαίνει τη χαρακτηριστική κατά  $12 \text{ MPa}$  αν χρησιμοποιούνται θραυστά αδρανή και  $14 \text{ MPa}$  αν χρησιμοποιούνται φυσικά αδρανή
- β) Η ποσότητα του αναμίγματος θα αντιστοιχεί σε ακέραιο αριθμό σάκων τσιμέντου.
- γ) Τα δοχεία μετρήσεως των κλασμάτων (άμμου, γαρμπιλιού, σκύρων) θα έχουν σημαδευτεί στο κατάλληλο ύψος που θα προκύψει αφού οι ποσότητες κλασμάτων του πρώτου αναμίγματος ζυγιστούν και τοποθετηθούν μέσα στα δοχεία.

Ο αναμικτήρας πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Παραρτήματος Β του Σχεδίου Προτύπου ΕΛΟΤ 346. Απαγορεύεται η χρήση αναμικτήρων κονιάματος για οποιαδήποτε ποιότητα σκυροδέματος. Ο χρόνος αναμίξεως είναι εκείνος που αναγράφεται στις προδιαγραφές του αναμικτήρα. Οποσδήποτε όμως δεν θα είναι μικρότερος από 1 min. Ο χρόνος αναμίξεως μετρίεται μετά την εισαγωγή όλων των υλικών στον αναμικτήρα. Μικρότερος ελάχιστος χρόνος αναμίξεως επιτρέπεται όταν:

- α) Ο αναμικτήρας είναι βιαίας αναμίξεως, οι δε προδιαγραφές του προβλέπουν μικρότερο χρόνο.
- β) Ο έλεγχος ομοιομορφίας που έγινε σύμφωνα με το Παράρτημα Β του Σχεδίου Προτύπου ΕΛΟΤ 346 έχει αποδείξει ότι μικρότερος χρόνος είναι ικανοποιητικός.

Τα αδρανή θα μετριοούνται με ακρίβεια 3% του βάρους τους, το τσιμέντο με ακρίβεια 2% του βάρους του, το νερό με ακρίβεια 2% και τα πρόσθετα με ακρίβεια 3% του βάρους ή του όγκου τους ανάλογα με το αν είναι σε σκόνη ή σε μορφή υγρού. Τα υλικά του σκυροδέματος θα μπαίνουν στον αναμικτήρα με τις αναλογίες που προβλέπονται στη Μελέτη Συνθέσεως αφού οι αναλογίες άμμου και νερού διορθωθούν ανάλογα με τη φυσική υγρασία των αδρανών. Ο έλεγχος της υγρασίας των αδρανών και οι σχετικές διορθώσεις πρέπει να γίνονται πριν από κάθε σκυροδέτηση. Δεν πρέπει να γίνεται φόρτωση του αναμικτήρα αν το προηγούμενο

ανάμειγμα δεν έχει αποφορτωθεί. Απαγορεύεται η προσθήκη υλικών στο μίγμα (όπως στεγανοποιητικών ή άλλων προσθέτων) μετά την απομάκρυνσή του από τον αναμικτήρα. Σε έτοιμο σκυρόδεμα που μεταφέρεται με αυτοκίνητο – αναδευτήρα επιτρέπεται μόνο η προσθήκη υπερρρευστοποιητικού, που θα συνοδεύεται από επανανάμιξη του μίγματος για 3 min.

### *Μεταφορά σκυροδέματος*

Κατά τη μεταφορά του μέχρι τη διάστρωση, το σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από τη βροχή ή την πρόσμιξή του με ξένα υλικά και δεν πρέπει να χάνει την ομοιογένειά του. Αν η μεταφορά γίνεται με αυτοκίνητο ή αυτοκίνητο - αναδευτήρα ισχύουν όσα αναφέρονται στην παράγραφο 2 του Σχεδίου Προτύπου ΕΛΟΤ 346 για το έτοιμο σκυρόδεμα. Αν χρησιμοποιείται αντλία, αυτή δεν πρέπει να μεταβάλλει την ομοιογένεια και την εργασιμότητα του μίγματος.

### *Διάστρωση σκυροδέματος*

Η εκφόρτωση πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση τελικής διαστρώσεως, ώστε να αποφεύγεται η μετακίνηση του σκυροδέματος με φτυάρια ή τσουγκράνες. Απαγορεύεται η μετακίνηση με τον δονητή. Αν η εκφόρτωση δεν είναι δυνατόν να γίνει στη θέση διαστρώσεως, θα χρησιμοποιούνται για την ενδιάμεση μεταφορά αντλίες, κεκλιμένα επίπεδα, μεταφορικές ταινίες ή άλλα μέσα που δεν προκαλούν απόμιξη του μίγματος. Απαγορεύεται η ελεύθερη πτώση του σκυροδέματος από ύψος μεγαλύτερο των 2,5 μέτρων. Σ αυτή την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλοι σωλήνες που θα κατεβάζουν το σκυρόδεμα μέχρι τη θέση διαστρώσεως ή θα ανοίγονται παράθυρα στον ξυλότυπο σε ενδιάμεσα ύψη. Απαγορεύεται η διάστρωση ολόσωμων πλακών σε δύο στρώσεις (στάρωμα) εφόσον το πάχος των πλακών δεν υπερβαίνει τα 60 cm. Αν το πάχος μιας πλάκας είναι μεγαλύτερο από 60 cm θα τηρούνται όσα αναφέρονται στην υπάρχουσα νομοθεσία.

Το σκυρόδεμα θα διαστρώνεται στο έργο με την κάθιση που προβλέπεται στη Μελέτη Συνθέσεως. Όταν όμως οι ανάγκες του έργου το απαιτούν, ο Επιβλέπων ή η Υπηρεσία μπορεί να μεταβάλει την κάθιση προσαρμόζοντας τις αναλογίες των υλικών σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται στη Μελέτη Συνθέσεως. Η κάθιση του σκυροδέματος πρέπει να μετριέται πριν από τη διάστρωση σε δείγμα που θα

παίρνεται μετά την αποφόρτωση του ενός τρίτου περίπου του αναμίγματος ή του ενός τρίτου του φορτίου του, αυτοκινήτου, αν πρόκειται για έτοιμο σκυροδέμα (εργοταξιακό ή εργοστασιακό). Η τιμή της καθίσεως θα προκύπτει ως μέσος όρος των μετρήσεων δύο δοκιμών που θα γίνονται σε ποσότητες σκυροδέματος προερχόμενες από το ίδιο αρχικό δείγμα. Η τιμή αυτή, προκειμένου περί εργοταξιακού σκυροδέματος, δεν πρέπει να διαφέρει από την κάθιση της Μελέτης Συνθέσεως ή την κάθιση που έχει διαμορφωθεί επιτόπου του έργου ο Επιβλέπων με κατάλληλη προσαρμογή των αναλογιών της Μελέτης Συνθέσεως περισσότερο από το ένα τέταρτό της. Η κάθιση του έτοιμου εργοστασιακού σκυροδέματος πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια της κατηγορίας καθίσεως του. Αν η τιμή που μετρήθηκε βρίσκεται έξω από αυτά τα όρια, γίνονται ακόμη δύο δοκιμές σε νέο δείγμα και υπολογίζεται ο μέσος όρος των τεσσάρων μετρήσεων. Οι τέσσερις μετρήσεις πρέπει να γίνουν σε διάστημα 15 min. Αν πρόκειται για έτοιμο σκυροδέμα, του οποίου η αποφόρτωση καθυστέρησε, από υπαιτιότητα του αγοραστή, περισσότερο από μισή ώρα το εργοστάσιο δεν ευθύνεται για τη μειωμένη κάθιση.

Ο Επιβλέπων ή η Υπηρεσία έχει το δικαίωμα να μη δεχτεί ανάμιγμα ή φορτίο έτοιμου σκυροδέματος, το οποίο έχει κάθιση μεγαλύτερη από εκείνη που αναφέρεται στους κανονισμούς. Ο Επιβλέπων ή η Υπηρεσία μπορεί να δεχτεί ανάμιγμα ή φορτίο έτοιμου σκυροδέματος με κάθιση μικρότερη από εκείνη που αναφέρεται στους κανονισμούς, αν αυτή αποκατασταθεί επιτόπου με την προσθήκη υπερρρευστοποιητικού. Η δαπάνη του υπερρρευστοποιητικού βαρύνει το εργοστάσιο. Ο Επιβλέπων ή η Υπηρεσία μπορούν να απαιτήσουν την επιτόπου αύξηση της εργασιμότητας του φορτίου έτοιμου σκυροδέματος πέραν της τιμής της παραγγελίας .

Η αύξηση της εργασιμότητας θα γίνεται μόνο με υπερρευστοποιητικό. Η δαπάνη του υπερρευστοποιητικού βαρύνει τον αγοραστή. Αν στο μίγμα υπάρχει αερακτικό, το ποσοστό αέρα δεν πρέπει να διαφέρει από το αντίστοιχο ποσοστό της Μελέτης Συνθέσεως ή το ποσοστό για έτοιμο σκυροδέμα, περισσότερο από 1%. Ο έλεγχος του ποσοστού αέρα θα γίνεται σύμφωνα με τη Μέθοδο Ελέγχου ΣΚ-311 και με την ίδια διαδικασία που γίνεται και ο έλεγχος της καθίσεως . Εφόσον πρόκειται να διαστρωθεί στο έδαφος ένα οπλισμένο δομικό στοιχείο, με οπλισμό στην κάτω επιφάνειά του (π.χ. μια πλάκα θεμελιώσεως), το έδαφος θα πρέπει να καλύπτεται με μια ισοπεδωτική στρώση σκυροδέματος μέσου πάχους τουλάχιστον 50 mm.

*Συμπύκνωση σκυροδέματος*

Η συμπύκνωση του σκυροδέματος πρέπει να γίνεται με δονητή. Όταν το σκυρόδεμα έχει μεγάλη κάθιση (μεγαλύτερη από 20 cm) και το πάχος του στοιχείου που διαστρώνεται είναι μικρό, τότε, μετά από έγκριση του Επιβλέποντα ή της Υπηρεσίας η δόνηση μπορεί να παραλειφθεί και να γίνει τακτοποίηση του μίγματος με σανίδα ή ράβδο. Το είδος του δονητή (εσωτερικός δονητής, δονητής ξυλοτύπου, δονητής επιφάνειας κλπ.) και ο αριθμός των δονητών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τη μορφή του στοιχείου που σκυροδετείται με τη διαδικασία διαστρώσεως, προδιαγράφεται δε στη σύμβαση του έργου. Όταν το πάχος του στοιχείου του σκυροδέματος είναι μεγάλο, η διάστρωση πρέπει να γίνεται σε στρώσεις με πάχος όχι μεγαλύτερο από 60 cm. Η επιφάνεια των στρώσεων πρέπει να διαμορφώνεται κατά τη διάστρωση οριζόντια και όχι να οριζοντιοποιείται με το δονητή. Κάθε στρώση πρέπει να διαστρώνεται όσο το σκυρόδεμα της προηγούμενης στρώσεως είναι πλαστικό.

Οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών θέσεων του δονητή θα είναι ίσες με 1,5 A περίπου, όπου A η ακτίνα ενέργειας του δονητή. Κατά τη δόνηση το στέλεχος του δονητή θα εισχωρεί στην υποκείμενη στρώση κατά 5 cm περίπου. Απαγορεύεται η δόνηση σιδηροπλισμού, του οποίου ένα τμήμα βρίσκεται ήδη βυθισμένο σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.

Η εξωτερική δόνηση με δονητή ξυλοτύπου ή επιφάνειας μπορεί να εφαρμοστεί, μόνον όταν η ακαμψία και η ευστάθεια του ξυλοτύπου ή του σιδηροτύπου το επιτρέπουν. Επαναδόνηση του σκυροδέματος επιτρέπεται μόνο όταν το σκυρόδεμα είναι αρκετά πλαστικό, ώστε το δονητικό στέλεχος, όταν ταλαντώνεται, να μπορεί να βυθίζεται στο σκυρόδεμα με το δικό του βάρος, δηλαδή χωρίς να πιέζεται από το χειριστή.

### *Συντήρηση σκυροδέματος*

Η συντήρηση είναι υποχρεωτική για κάθε έργο. Αρχίζει αμέσως μετά τη διάστρωση και πρέπει να διαρκεί για χρονικό διάστημα που εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και τις ειδικές απαιτήσεις του έργου. Το χρονικό αυτό διάστημα δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερο από επτά (7) ημέρες για την πρώτη φάση συντηρήσεως. Η συντήρηση πρέπει να δημιουργεί τις συνθήκες θερμοκρασίας

και υγρασίας που θα επιτρέψουν να ενυδατωθεί το μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου του μίγματος. Η απαραίτητη υγρασία για τη συντήρηση εξασφαλίζεται:

α) Με μεθόδους που απαγορεύουν ή επιβραδύνουν την εξάτμιση νερού του μίγματος, όπως ο ψεκασμός με ειδικά υγρά που σχηματίζουν επιφανειακή μεμβράνη, η επικάλυψη με λινάτσες, άμμο, αδιάβροχα φύλλα κλπ.

β) Με μεθόδους που αντικαθιστούν το νερό που εξατμίζεται, όπως κατάβρεγμα, πλημμύρισμα κλπ.

Αν στη σύμβαση του έργου δεν αναφέρεται διαφορετικά και αν δεν προβλέπεται παγετός, η συντήρηση θα γίνεται ως εξής: Αμέσως μετά το τέλος της διαστρώσεως όλες οι ελεύθερες επιφάνειες του σκυροδέματος θα σκεπάζονται με λινάτσες. Οι λινάτσες θα διατηρούνται υγρές ολόκληρο το 24ωρο και για επτά τουλάχιστον ημέρες. Σ αυτό το διάστημα η κυκλοφορία του προσωπικού και κάθε άλλη εργασία αναγκαία για τη συνέχιση του έργου θα γίνεται πάνω στις λινάτσες. Η ίδια μέθοδος και για το ίδιο χρονικό διάστημα θα εφαρμόζεται και στις κατακόρυφες επιφάνειες, μετά την απομάκρυνση του ξυλοτύπου τους. Αν οι λινάτσες απομακρυνθούν πριν από τη συμπλήρωση 14 ημερών από τη διάστρωση, για το χρονικό διάστημα από τις 7 μέχρι τις 14 ημέρες, το σκυρόδεμα θα διαβρέχεται μέχρι κορεσμού της επιφάνειάς του δύο φορές την ημέρα και από τις 14 μέχρι τις 28 ημέρες μια φορά την ημέρα.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου συντηρήσεως και η εν γένει πρόοδος της σκληρύνσεως ελέγχεται με δοκίμια, τα οποία παραμένουν δίπλα στο έργο και συντηρούνται όπως αυτό (δοκίμια του έργου). Οι αντοχές αυτών των δοκιμών δεν θα λαμβάνονται υπόψη στους ελέγχους συμμορφώσεως. Η διαβροχή λίγης ώρας και γενικά η διαβροχή που δεν συνεχίζεται ολόκληρο το 24ωρο δεν θεωρείται ικανοποιητική συντήρηση για τις μικρές ηλικίες του σκυροδέματος. Εφαρμόζεται μόνο μετά το τέλος της φάσεως της κύριας συντηρήσεως.

## 1.6 ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

*Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά.*

Σε οδοστρώματα μεγάλης και βαριάς κυκλοφορίας, σε κρηπιδότοιχους λιμενικών έργων, σε επενδύσεις αγωγών, σηράγγων κλπ, όπου ρέει νερό με φερτές ύλες, καθώς και σε άλλες παρόμοιες περιπτώσεις, πρέπει η επιφάνεια του σκυροδέματος να έχει αντοχή σε φθορά από κρούσεις και τριβές. Για να επιτευχθεί αυτό, ο Ν.Κ.Τ.Σ απαιτεί χονδρόκοκκα αδρανή (κοκκομετρική καμπύλη στο κάτω μισό της υποζώνης Δ), περιεκτικότητα σε τσιμέντο τουλάχιστον  $350 \text{ kg/m}^3$ , κατηγορία σκυροδέματος τουλάχιστον C20/25, χαμηλή περιεκτικότητα νερού (τέτοια ώστε αν δεν χρησιμοποιείται υπερρευτοποιητικό η κάθιση να είναι το πολύ 50mm) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εξίδρωση, και τέλος συντήρηση για 14 ημέρες.

*Σκυρόδεμα μικρής υδατοπερατότητας :*

Η διαπερατότητα της μάζας του σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον όγκο των τριχοειδών πόρων και των κενών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Επομένως, σε κατασκευές όπου απαιτείται αυξημένη υδατοστεγανότητα, όπως υδατόπυργοι ή υδατοδεξαμενές, τοίχοι και δάπεδα υπογείων που βρίσκονται κάτω από τον υπόγειο ορίζοντα κλπ, χρειάζεται καλή συμπύκνωση του σκυροδέματος, μείγμα αδρανών με λίγα κενά και κυρίως μικρός λόγος νερού προς τσιμέντο. Για τον σκοπό αυτό ο Ν.Κ.Τ.Σ καθορίζει κοκκομετρική καμπύλη αδρανών κοντά στη μέση γραμμής της υποζώνης Δ, λόγο W/Z το πολύ 0,58 και ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου  $350 \text{ kg/m}^3$  για μέγιστο κόκκο 1" ή 31,5, ή το πολύ 0,50 και ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου  $400 \text{ kg/m}^3$  για μέγιστο κόκκο ½" ή 16. Οι απαιτήσεις αυτές δίνουν περιεκτικότητα σε νερό  $200 \text{ kg/m}^3$ . Τέλος η συντήρηση χρειάζεται να διαρκεί 14 ημέρες.

*Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε χημικά ή σε θαλασσινό νερό.*

Χημικές ουσίες διαλυμένες σε νερό μπορεί να διεισδύσουν στο εσωτερικό του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού μέσω των τριχοειδών πόρων και των κενών, και να διαλύσουν κάποια συστατικά του, ή να τα προσβάλλουν χημικά, παράγοντας προϊόντα διαλυτά ή που καταλαμβάνουν μεγαλύτερο από τον αρχικό όγκο, προκαλώντας την σταδιακή αποσύνθεση του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα μπορεί να προστατευτεί από τέτοιες χημικές επιδράσεις με περιορισμό του όγκου των τριχοειδών πόρων και των κενών του τσιμεντοπολτού, δηλ με μείωση του λόγου W/Z και επιμήκυνση του χρόνου συντήρησης( σε 14 μέρες κατά τον Ν.Κ.Τ.Σ) και με χρήση τσιμέντου ανθεκτικού στα θειικά ιόντα ( τύπου IV) εφόσον υπάρχουν τέτοια.

Ο Ν.Κ.Τ.Σ απαιτεί κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ, για μείωση των κενών του μίγματος των αδρανών. Περαιτέρω, για σκυρόδεμα που έρχεται σε επαφή με νερό με σημαντική περιεκτικότητα σε δραστικές χημικές ουσίες, ή με εδάφη κορεσμένα με νερό που περιέχει τέτοιες ουσίες ο ίδιος κανονισμός (Ν.Κ.Τ.Σ.) βάζει τις απαιτήσεις του. Η περιεκτικότητα του νερού ή του εδάφους σε μία από τις ουσίες που θεωρούνται βλαβερές καθορίζει τον βαθμό προσβολής του σκυροδέματος, ο οποίος με τη σειρά του καθορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο λόγο W/Z , την ελάχιστη απαιτούμενη περιεκτικότητα σε τσιμέντο και τον τύπο του τσιμέντου. Αν υπάρχουν ταυτόχρονα στην ίδια στήλη βαθμού προσβολής δύο ή περισσότερες χημικές ουσίες, και μάλιστα στο πάνω τέταρτο (ή για το pH στο κάτω τέταρτο) του διαστήματος των ορίων προσβολής της στήλης αυτής, τότε οι επιδράσεις τους θεωρούνται πως αθροίζονται, φέρνοντας το συνολικό βαθμό προσβολής στον αμέσως δυσμενέστερο του πίνακα. Οι ελάχιστες ποσότητες τσιμέντου του πίνακα ισχύουν για μέγιστο κόκκο αδρανών 31,5 ή 1". Για αδρανή με μέγιστο κόκκο 63 ή 1 ½, ο όγκος των κενών του μίγματος των αδρανών είναι μικρότερος και η απαίτηση σε τσιμέντο μειώνεται κατά 30 kg/m<sup>3</sup>. Αντίστοιχα για μέγιστο κόκκο 16 ή ½" η απαίτηση σε τσιμέντο αυξάνεται κατά 30 kg/m<sup>3</sup>.



Για σκυρόδεμα μέσα στην θάλασσα υπάρχουν αυστηρότερες απαιτήσεις :

Μέγιστη τιμή του λόγου  $W/Z = 0,48$  και ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο  $400 \text{ kg/m}^3$ . Παρά δε την υψηλή περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού σε θειικά, δεν συνίσταται η χρήση τσιμέντου τύπου IV, καθότι αυτό αυξάνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα, τα οποία προκαλούν διάβρωση του χάλυβα.

*Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε παγετό:*

Όταν παγώνει, το νερό των τριχοειδών πόρων διαστέλλεται, τείνοντας να διαρρήξει το σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Ένας τρόπος να αποφευχθεί το ενδεχόμενο διάρρηξης είναι να δημιουργηθούν μέσα στην μάζα του τσιμεντοπολτού μικροσκοπικές φυσαλίδες (0,02-0,2mm) όπου θα διοχετεύεται το νερό των τριχοειδών πόρων όταν αυτό διαστέλλεται λόγω παγετού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση αερατικών προσθέτων.

Έτσι, στις περιοχές της χώρας όπου η θερμοκρασία πέφτει συχνά κάτω απ το μηδέν, ο Ν.Κ.Τ.Σ και το πρότυπο ΕΛΟΤ 515 απαιτούν τη χρήση αερατικών προσθέτων ανεπίχριστα σκυροδέματα ανωδομών και σε όλα τα σκυροδέματα που διαστρώνονται το χειμώνα ( το σκυρόδεμα είναι πιο ευπρόσβλητο στον παγετό σε νεαρή ηλικία, προτού δηλ αναπτυχθεί σημαντικά η αντοχή του). Η ποσότητα του αερατικού πρέπει να είναι τέτοια που να δημιουργείται συνολικός όγκος φυσαλίδων αέρα στο σκυρόδεμα ίσος με 6% του όγκου του σκυροδέματος για μέγιστο κόκκο αδρανών 8 ή 3/8", με 4,5% για μέγιστο κόκκο 16 ή 1/2" , 3,5% για μέγιστο κόκκο 31,5 ή 1" και 3% για μέγιστο κόκκο 63 ή 1 1/2". Η παρουσία φυσαλίδων στη μάζα του σκυροδέματος μειώνει τη αντοχή του. Για να εξουδετερωθεί η μείωση αυτή πρέπει να μειωθεί ο λόγος  $W/Z$  δηλ. για την ίδια κάθιση να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, γεγονός που αυξάνει το κόστος του σκυροδέματος επιπλέον του κόστους του αερατικού.

Σκυρόδεμα που διαστρώνεται μέσα στο νερό:

Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται από τον Ν.Κ.Τ.Σ ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο  $350 \text{ kg/m}^3$  και λόγος  $W/Z$  το πολύ 0,60. Έτσι υπάρχει κάποιο περιθώριο για την περίπτωση που ένα μέρος του τσιμέντου θα ξεπλυθεί από την επαφή με το νερό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### 2.1 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα στις μέρες μας αποτελεί το δομικό υλικό παγκοσμίως που χρησιμοποιείται ευρύτατα λόγω της ευκολίας παραγωγής του και της ευκολίας διάστρωσης του στα δομικά στοιχεία των κατασκευών. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που λαμβάνουν χώρα κατά την διάστρωσή του είναι και η συμπύκνωση, η διαδικασία που αποσκοπεί στο να απομακρυνθεί ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί στο εσωτερικό της μάζας του υλικού κατά την παραγωγή και διάστρωση του. Για τη συμπύκνωση του σκυροδέματος στις κατασκευές συνήθως γίνεται δόνηση του νωπού σκυροδέματος κατά την χύτευση. Το παραπάνω βήμα αποτελεί σημαντικό στάδιο της κατασκευής καθώς με τη συμπύκνωση το πορώδες του σκυροδέματος περιορίζεται δραστικά ώστε έτσι να έχουμε αυξημένες αντοχές και συνεπώς αυξημένη ανθεκτικότητα στο χρόνο. Τα τελευταία χρόνια με τη χρήση του νέου Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού υπαγορεύεται η χρησιμοποίηση πυκνότερου οπλισμού στα δομικά στοιχεία που έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται δυσχερής η χρησιμοποίηση δονητή και τη δημιουργία κενών (φωλιές) στα δομικά στοιχεία λόγω ελλιπούς συμπύκνωσης τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια. Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο στοιχείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι κατά τη διαδικασία της δόνησης δημιουργούνται υψηλά επίπεδα θορύβου που συνεπάγονται ανθυγιεινές συνθήκες εργασίας, αδυναμία επικοινωνίας μεταξύ των εργαζομένων που έχει ως επακόλουθο πληθώρα κακοτεχνιών και κίνδυνο εργατικού ατυχήματος.

**Όλα τα παραπάνω που αναφέρθηκαν οδήγησαν στη δημιουργία ενός νέου είδους σκυροδέματος που ονομάστηκε Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (Self Compacting Concrete) με το οποίο επιτυγχάνεται η βέλτιστη συμπύκνωση του σκυροδέματος σε μια κατασκευή χωρίς την χρήση δονητών.**

Το ΑΣΣ είναι εκείνο το σκυρόδεμα που σε νωπή κατάσταση έχει την ικανότητα να τοποθετείται στους ξυλότυπους και να διέρχεται μέσα από τον οπλισμό μόνο με τη δύναμη της βαρύτητας χωρίς τη χρήση δονητών μάζας ή άλλης εξωτερικής ενέργειας ενώ συνάμα διατηρεί την ομοιογένειά του.

Η τεχνολογία του ΑΣΣ εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 1983 από τον Okamura ο οποίος έθεσε τις βάσεις για ένα σκυρόδεμα υψηλών

προδιαγραφών για μεγάλα και ποιοτικά έργα όπου θα έχει αυξημένες αντοχές και μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο. Οι έρευνες για τις θεμελιώδεις αρχές και κανονισμούς που διέπουν το ΑΣΣ κατατέθηκαν από τους Ozawa και Mackawa στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο. Την πρώτη του εμφάνιση στην Ευρώπη το ΑΣΣ την κάνει στις αρχές της δεκαετίας του 1990 στις χώρες της Σκανδιναβίας και ειδικά σε προκατασκευασμένα στοιχεία.

## **ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ**

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ΑΣΣ πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του EN 206. Τα υλικά θα είναι κατάλληλα για τη χρήση που προορίζονται στο σκυρόδεμα και δεν πρέπει να περιέχουν επιβλαβή συστατικά σε ποσότητες που μπορεί να είναι επικίνδυνες για την ποιότητα, την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ή τη διάβρωση του οπλισμού.

**A) Τσιμέντο:** Γενικώς χρησιμοποιούνται όλοι οι τύποι τσιμέντου που συμμορφώνονται με το Πρότυπο EN 197 και έχουν αποδειχθεί κατάλληλα για την παραγωγή ΑΣΣ. Μια τυπική δοσολογία είναι 350-450 kg τσιμέντου ανά κυβικό μέτρο ενώ δοσολογίες πάνω από 500 kg μπορεί να προκαλέσουν συρρίκνωση. Αντίθετα δοσολογίες λιγότερες των 350 kg είναι συμβατές μόνο αν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πυριτική παιπάλη, ποζολάνες, ιπτάμενη τέφρα κ.α. Ανάλογα με τον τύπο τσιμέντου όπως και στο δονούμενο σκυρόδεμα έχουμε και διαφορετικές συνθέσεις ΑΣΣ.

**B) Αδρανή:** Τα αδρανή θα συμμορφώνονται με το πρότυπο EN 12620. Το μέγιστο μέγεθος των αδρανών εξαρτάται από την εφαρμογή και συνήθως είναι μικρότερο από 20 mm. Βέβαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι συνήθεις ποιότητες άμμου σκυροδέματος (θραυστές, ποταμίσιες, πυριτικές, ασβεστολιθικές). Όσον αφορά τη μορφή τα θραυστά αδρανή βελτιώνουν την αντοχή ενώ τα ποταμίσια τη ρευστότητα του ΑΣΣ.

**Γ) Νερό:** Το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή σκυροδέματος θα συμμορφώνεται με το Πρότυπο EN 1008 που έχει αποδειχθεί κατάλληλο για την παραγωγή ΑΣΣ.

**Δ) Πρόσθετα:** Οι υπερρευστοποιητές είναι θεμελιώδεις συστατικό του ΑΣΣ για την εξασφάλιση κατάλληλης εργασιμότητας. Όταν κρίνεται αναγκαίο μπορούν να προστεθούν και άλλοι τύποι προσθέτων όπως ρυθμιστές ιξώδους (viscosity modifying agents VMA) για την αντίσταση σε απόμιξη, αερακτικά για τη βελτίωση της αντίστασης σε ψύξη-απόψυξη, επιβραδυντές για τη ρύθμιση της πήξης κ.α. Είναι αυτονόητο ότι για τις ιδιότητες του προσθέτου θα πρέπει να παρέχονται από τον προμηθευτή πλήρη στοιχεία.

**Ε) Πρόσμικτα:** Χρησιμοποιούνται πρόσμικτα τύπου I ( αδρανή filler, χρωστικές) και πρόσμικτα τύπου II ( ιπτάμενες τέφρες, πυριτική παιπάλη, σκωρία υφικαμίνων) τα οποία βελτιώνουν την εργασιμότητα και κανονικοποιούν την περιεκτικότητα στο τσιμέντο έτσι ώστε να μειώνεται η θερμότητα ενυδάτωσης.

**ΣΤ) Ίνες:** Όπως και στο δονούμενο σκυρόδεμα έτσι και στο ΑΣΣ μπορούν να χρησιμοποιούνται ίνες για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του. Οι συνήθεις ίνες είναι από χάλυβα ή από πολυμερή. Για τη βελτίωση της καμπτικής αντοχής και της ενέργειας θραύσεως χρησιμοποιούνται οι χαλύβδινες ίνες ενώ αντίθετα οι πολυμερείς ίνες χρησιμοποιούνται για τη μείωση της απόμιξης ή της πλαστικής συρρίκνωσης και της ανθεκτικότητας σε πυρκαγιά.

<b>Οι ενδεικτικές αναλογίες υλικών ΑΣΣ είναι :</b>
<b>Λόγος νερού / πούδρα : 0,80 – 1,10 κατ' όγκον.</b>
<b>Συνολική ποσότητα λεπτού υλικού : 160 – 240 lt (400 – 600 Kg) / m<sup>2</sup></b>
<b>Περιεκτικότητα χονδροκκοκων αδρανών : 28 – 35 % του συνολικού όγκου του μείγματος</b>
<b>Ποσότητα νερού : Δεν υπερβαίνει τα 200 lt/m<sup>3</sup></b>
<b>Περιεκτικότητα άμμου : Ισορροπεί τον όγκο των υπόλοιπων συστατικών.</b>

Πίνακας 9. Οι ενδεικτικές αναλογίες υλικών ΑΣΣ

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ-ΔΙΑΣΤΡΩΣΗ - ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Τα μέσα παραγωγής που χρησιμοποιούνται στο συμβατικό σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο ΑΣΣ. Η ανάμιξη των συστατικών όπως τα

αναφέραμε πιο πάνω μπορεί να γίνουν είτε σε συγκρότημα παραγωγής είτε σε μπετονιέρες. Στον κάδο ανάμιξης αρχικά γίνεται έκγχυση το 90 % του νερού που χρειάζεται, τοποθετούνται τα συστατικά και στη συνέχεια το υπόλοιπο νερό, ο υπερρευστοποιητής και το πρόσμικτο τροποποιητικό του ιξώδους. Πριν τη σκυροδέτηση θα πρέπει να γίνεται ανάδευση του ΑΣΣ για 3-5 λεπτά σε πλήρη ταχύτητα και όταν προστεθούν οι υπερρευστοποιητές ανάμιξη για τουλάχιστον 1 min/m<sup>3</sup> και όχι λιγότερο από 7 min. Οι αποστάσεις χύτευσης είναι : κατακόρυφη πτώση μικρότερη από 5 μέτρα και οριζόντια εξάπλωση μικρότερη από 10 μέτρα από το σημείο εκκένωσης. Η άκρη του σωλήνα εξόδου του ΑΣΣ συνίσταται να είναι βυθισμένη μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος που έχει ήδη διαστρωθεί. Επιπλέον για ύψος στήλης νωπού ΑΣΣ πάνω από 3 μέτρα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και η υδροστατική πίεση στο σχεδιασμό των καλουπιών. Υψηλές πιέσεις εντός του ιστού των μηχανημάτων άντλησης του σκυροδέματος προκαλούν απώλειες στην εργασιμότητα του ΑΣΣ και για αυτό η πίεση στη άντληση πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. ***Τέλος επειδή το ΑΣΣ ξηραίνεται γρηγορότερα από το δονούμενο σκυρόδεμα γιατί υπάρχει λίγο έως καθόλου νερό εξίδρωσης στην επιφάνεια πρέπει όταν γίνεται η σκυροδέτηση ΑΣΣ σε κλιματολογικές συνθήκες που ευνοούν την ταχεία εξάτμιση του νερού να αρχίζει η συντήρηση του ΑΣΣ το συντομότερο δυνατό.***

## **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει οι βάσεις για το ΑΣΣ τέθηκαν στην Ιαπωνία και είναι απολύτως φυσικό τα πρώτα παραδείγματα και εφαρμογές να προέρχονται από εκεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι **βάσεις αγκύρωσης των κύριων καλωδίων της γέφυρας Akashi - Kaikyo** η οποία παραδόθηκε στην κυκλοφορία τον Απρίλιο του 1998. Στη συγκεκριμένη γέφυρα χρησιμοποιήθηκαν 290.000 m<sup>3</sup> ΑΣΣ και αντίστοιχα ο χρόνος κατασκευής μειώθηκε κατά 20% από 2,5 σε 2 χρόνια. Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η **κατασκευή δεξαμενών αποθήκευσης φυσικού αερίου σε υγρή μορφή** τον Ιούνιο του 1998 από την Osaka Gas Company. Χρησιμοποιήθηκαν 12.000 m<sup>3</sup> ΑΣΣ που είχε ως φυσικό επακόλουθο την μείωση του χρόνου κατασκευής ( από 22 μήνες σε 18 μήνες ) και τον μειωμένο αριθμό εργατών σκυροδέματος ( από 150 άτομα σε 50 άτομα).



Εικόνα 4. Γέφυρα Akashi-Kaikyo( Απρίλιος 1998)

Ένα άλλο παράδειγμα όπου είχαμε ευρεία χρήση ΑΣΣ είναι η γέφυρα Ritto που αποτελεί τμήμα αυτοκινητόδρομου διπλής κατευθύνσεως (ένα τμήμα για Τόκιο και ένα για Οζάκα αντίστοιχα). Η συγκεκριμένη γέφυρα προκειμένου να πληρεί τις αυστηρές προδιαγραφές της JSCE (Japan Society Of Civil Engineers) και τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς καθώς το μέγιστο ύψος κολώνας έφτανε τα 103,5 μέτρα χρησιμοποίησε ΑΣΣ. Πληρούσε τα κριτήρια για υψηλές αντοχές, ανθεκτικότητα στο χρόνο και ευκολία σκυροδέτησης παρά την ιδιομορφία του έργου.



Εικόνα 5.Γέφυρα Ritto (Shiga Prefecture Nature Park)



Σχήμα Κολώνας Γέφυρας

Εκτός όμως από τα παραπάνω ευρεία χρήση έχουμε και **στα προκατασκευασμένα στοιχεία** όπου ένα τυπικό παράδειγμα εταιρείας είναι το **Consolis Group** . Αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές προκατασκευασμένων στοιχείων με εργοστάσια σε 11 χώρες, 5000 εργαζόμενους και ετήσιο κύκλο εργασιών 618 εκατομμύρια ευρώ. Από την ετήσια κατασκευή 1,800,000 m<sup>3</sup> σκυροδέματος τα 120,000 m<sup>3</sup> είναι ΑΣΣ. Παρόλο που τα συστατικά για την παρασκευή ΑΣΣ είναι 15 % -20 % ακριβότερα το τελικό κόστος είναι 5% - 15 % λιγότερο από ότι στο συμβατικό σκυρόδεμα. Έτσι η συγκεκριμένη εταιρεία χρησιμοποιεί το ΑΣΣ για κατασκευή κολώνων, δοκών και τοιχείων καθώς και για κατασκευή τεχνητών υφάλων που βυθίζονται στη θάλασσα και αποτελούν καταφύγιο για ψάρια και άλλους οργανισμούς (Spenncon AS, Trondheim).

Ένα άλλο πρόσφατο έργο όπου χρησιμοποιήθηκε ΑΣΣ είναι στη Βαρσοβία, την πρωτεύουσα της Πολωνίας. Δίπλα στον κεντρικό σιδηροδρομικό σταθμό κατασκευάστηκε **κτίριο υψηλών προδιαγραφών** που περιλαμβάνει εστιατόρια, εμπορικό κέντρο, υπόγειο πάρκινγκ 1800 θέσεων, ξενοδοχείο, κινηματογραφικές αίθουσες και χώρους εκθέσεων. Χαρακτηριστικό είναι ότι συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 212,000 m<sup>3</sup> σκυροδέματος εκ των οποίων τα 4,800 m<sup>3</sup> θα είναι

ΑΣΣ . Το ΑΣΣ χρησιμοποιήθηκαν μάλιστα για την κατασκευή τοίχων που το πάχος τους φθάνει τα 150 cm.



Εικόνα 6. Βαρσοβία –Πολωνία ( Ιούνιος 2005)



Εκτός όμως από όλα τα παραπάνω το ΑΣΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί **για την επισκευή ενός δομικού στοιχείου**. Είναι σύνηθες το ενδεχόμενο κατά την διάρκεια ξεκαλουπώματος ενός δομικού στοιχείου με αρκετά πυκνό οπλισμό το σκυρόδεμα να μην έχει περάσει από τα σίδερα είτε επειδή έχουμε πολύ πυκνό οπλισμό, είτε λόγω κακής δόνησης ή και για πολλούς άλλους λόγους. Οι επισκευές που γίνονται με επισκευαστικά κονιάματα δεν προσφέρουν πάντα το ιδεατό αποτέλεσμα με συνέπεια το δομικό στοιχείο να μην είναι ανθεκτικό σε εξωτερικούς παράγοντες και σε σεισμική διέγερση.

Το ΑΣΣ μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση **βλάβης υποστυλωμάτων, δοκών και πλακών**. Στα υποστυλώματα η πιο συνηθισμένη βλάβη είναι η θραύση του σκυροδέματος σε μια διατομή από θλίψη και διάτμηση καθώς και ο λυγισμός του οπλισμού. Για την επισκευή του υποστυλώματος κατασκευάζεται μανδύας από οπλισμένο σκυρόδεμα ο οποίος περιβάλλει το παλιό υποστυλώμα. Για να αντιμετωπίσουμε τη συστολή ξήρανσης του νέου σκυροδέματος χρησιμοποιούμε ειδικά πρόσμικτα. Με το ΑΣΣ όμως και τη χρήση του σε τέτοιες συνθήκες καθυστερεί η ξήρανση και βελτιώνεται η αντοχή και η δομή των πόρων του σκυροδέματος .

## 2.2 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Το σκυρόδεμα αποτελεί σήμερα το πλέον διαδεδομένο παγκοσμίως δομικό υλικό, λόγω της ευκολίας παραγωγής του και κυρίως της ευκολίας διάστρωσής του στα διάφορα δομικά στοιχεία των κατασκευών. Χαρακτηρίζεται όμως και από μία ιδιαιτερότητα, μοναδική μεταξύ όλων των υλικών δόμησης : η ποιότητα του σκυροδέματος που παραγγέλνουμε και παραλαμβάνουμε όταν έρχεται η βαρέλα στο έργο, δεν μας εγγυάται ταυτόχρονα ότι το σκυρόδεμα μετά τη διάστρωσή του θα εξακολουθήσει να έχει την ίδια ποιότητα: ένα σκυρόδεμα C20/25 που παραγγέλνουμε, παραλαμβάνουμε και ελέγχουμε σύμφωνα με τον ΚΤΣ-97 δεν μας εγγυάται ότι και μετά τη διάστρωσή του θα εξακολουθήσει να ανήκει στην ίδια κατηγορία. Αυτό, γιατί πέρα των διαφορετικών συνθηκών συντηρήσεως μεταξύ του έργου και των συμβατικών δοκιμών (βάση των οποίων χαρακτηρίζουμε το σκυρόδεμα) και της πιθανής κι ελπίζουμε αποφευκτέας - περίπτωσης της προσθήκης επιτόπου νερού από το συνεργείο, μετά τη χύτευση ακολουθεί η συμπύκνωση του σκυροδέματος, η διαδικασία δηλαδή εκείνη που αποσκοπεί στο να απομακρυνθεί ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί στο εσωτερικό της μάζας του υλικού κατά την παραγωγή και τοποθέτησή του. Η σημασία της συμπύκνωσης στη διαμόρφωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος είναι πολύ σημαντική, γιατί κατά αυτό τον τρόπο περιορίζεται το πορώδες του σκυροδέματος, παράγων καθοριστικός τόσο για την ανάπτυξη των αντοχών του σκυροδέματος, όσο και για την αύξηση της ανθεκτικότητάς του στο χρόνο.

Ο συνηθέστερος τρόπος συμπύκνωσης του σκυροδέματος στις κατασκευές είναι με δόνηση του νωπού σκυροδέματος κατά την χύτευση. Η διαδικασία αυτή όμως προκαλεί καθυστερήσεις στην κατασκευή, που συνεπάγονται με την σειρά τους αύξηση του κόστους κατασκευής. Επίσης, η δόνηση δημιουργεί εξαιτίας του υψηλού θορύβου ανθυγιεινές συνθήκες εργασίας και έλλειψη επικοινωνίας μεταξύ των εργαζομένων, αυξάνοντας συνεπώς τον κίνδυνο κακοτεχνιών και εργατικού ατυχήματος, ενώ είναι γνωστά και τα προβλήματα που ανακύπτουν στους εργαζομένους λόγω της φυσικής καταπόνησης που υφίστανται. Από την άλλη μεριά, το όλο και αυξανόμενο ποσοστό οπλισμών που υπαγορεύει ο ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός δυσκολεύει τη διαδικασία της δόνησης και συχνά οδηγεί

στο φαινόμενο δημιουργίας κενών (φωλιές) τόσο στην επιφάνεια αλλά και κυρίως, στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων. Τα κενά αυτά, αποτελέσματα της ελλιπούς συμπύκνωσης, αποτελούν ένα τοπικό σημείο πιθανής αστοχίας του σκυροδέματος, ενώ υποβιβάζουν την ποιότητα του υλικού και κατά συνέπεια την ποιότητα ολόκληρης της κατασκευής.

Τα προβλήματα που ανακύπτουν από τη χρήση δονητών μάζας κατά την συμπύκνωση του σκυροδέματος και ο υποβιβασμός της ποιότητας του διαστρωμένου υλικού λόγω ελλιπούς συμπύκνωσης ήταν οι αιτίες που οδήγησαν στη δημιουργία ενός νέου είδους σκυροδέματος που ονομάστηκε «αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα» (Self-compacting concrete). Με τον όρο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) ονομάζουμε το σκυρόδεμα εκείνο που σε νωπή κατάσταση έχει την ικανότητα να τοποθετείται στους ξυλοτύπους και να διέρχεται μέσα από τον οπλισμό, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ομοιογένειά του .

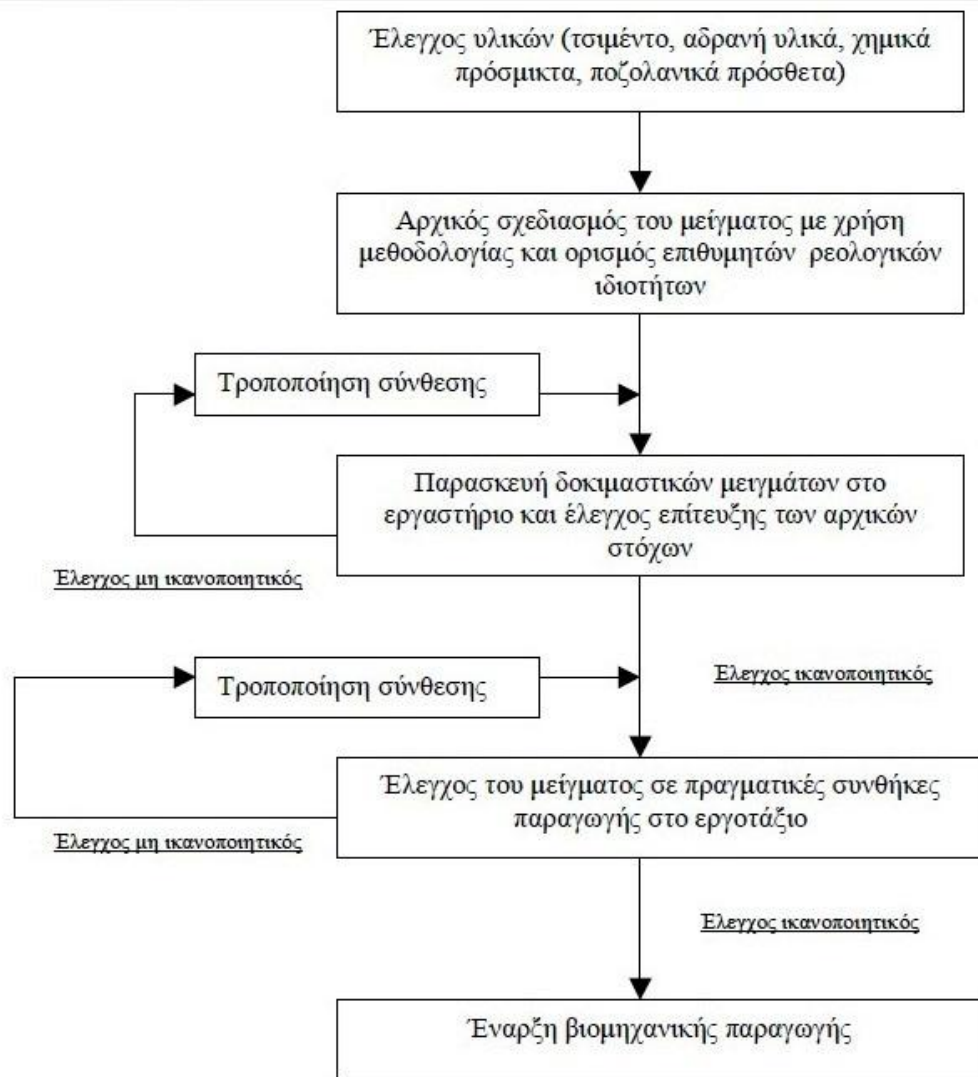
Η τεχνολογία του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στην Ιαπωνία από τον καθηγητή Okamura, ενώ τη δεκαετία του 1990 άρχισε η παρασκευή του και σε ευρωπαϊκές χώρες, κυρίως στη Σκανδιναβία και στην Ολλανδία. Μέχρι σήμερα , εθνικούς κανονισμούς για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα , έχουν θεσπίσει πολλές χώρες, τόσο εκτός Ευρώπης (ΗΠΑ, Καναδάς) όσο και εντός των Ευρωπαϊκών συνόρων (Σουηδία, Γερμανία, Γαλλία, Αυστρία κ.α). Ειδικότερα στην Ευρώπη, με τη συγκεκριμένη τεχνολογία έχει ασχοληθεί η RILEM , ενώ το Φεβρουάριο του 2002 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Σκυροδέματος (EFNARC) προχώρησε στη σύνταξη σχετικών οδηγιών . Τον Μάιο του 2005 κυκλοφόρησαν στο δικτυακό τόπο της EFNARC και οι Ευρωπαϊκές προδιαγραφές για το σχεδιασμό μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Σε εθνικό επίπεδο, το Ινστιτούτο Οικονομίας των Κατασκευών (Ι.Ο.Κ.) έχει κυκλοφορήσει τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ) για Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα .

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι βασικές λειτουργικές ιδιότητες του νωπού αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος είναι η ικανότητα πλήρωσης (filling ability), η αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών - απόμειξη (segregation resistance) καθώς και η ικανότητα

εισχώρησης μεταξύ των οπλισμών (passing ability). Προκειμένου να ικανοποιηθούν και οι τρεις ανωτέρω απαιτήσεις, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη ρεολογία της τσιμεντόπαστας κατά το σχεδιασμό του μείγματος. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για τον κατ' αρχήν σχεδιασμό ενός μείγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, τα όποια αποτελέσματα όμως πρέπει πάντα να επαληθεύονται με δοκιμαστικά μείγματα πριν τεθούν σε παραγωγή. Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται τα βασικά στάδια του σχεδιασμού ενός μείγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι η περιεκτικότητά του σε πολύ λεπτά υλικά τα οποία ορίζονται ως το άθροισμα της μάζας του τσιμέντου, της μάζας των ποζολανικών προσθέτων (πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων) και της παιπάλης που προέρχεται από την άμμο (ασβεστολιθικό ή πυριτικό φίλλερ). Με τον όρο φίλλερ χαρακτηρίζονται τα διερχόμενα από το κόσκινο των 0,075 mm (ή των 0,125 mm) στην Ευρώπη, ενώ στην Ιαπωνία για τον αντίστοιχο προσδιορισμό χρησιμοποιείται το κόσκινο των 0,090 mm.

Η σύνθεση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρέπει να ελέγχεται αυστηρά όχι μόνο κάθε φορά που αλλάζει ο τύπος του τσιμέντου ή η πηγή των αδρανών υλικών όπως συμβαίνει με τα συμβατικά μείγματα, αλλά και κάθε φορά που αλλάζει η παρτίδα της χρησιμοποιούμενης άμμου, ακόμη και αν αυτή προέρχεται από το ίδιο λατομείο. Το ΑΣΣ είναι πολύ ευαίσθητο στην περιεκτικότητα του μείγματος σε λεπτά υλικά (φίλλερ) και οποιαδήποτε αλλαγή στο λεπτόκοκκο κλάσμα της άμμου (διερχόμενα από το κόσκινο των 0.125 mm) θα επιφέρει αξιοσημείωτες αλλαγές στη συμπεριφορά του ΑΣΣ.



Εικόνα 7. Βασικά σημεία σχεδιασμού.

Σύμφωνα με τον κανονισμό της EFNARC, η ποσότητα του λεπτού υλικού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 400-600 κιλών στο κυβικό μέτρο, προκειμένου το νωπό σκυρόδεμα να έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες. Όταν παρά την προσθήκη των πολύ λεπτών υλικών εξακολουθεί να υπάρχει κίνδυνος απόμειξης, προστίθεται και μία μικρή ποσότητα προσθέτου ρυθμιστικού του ιξώδους (viscosity modifying agent, VMA) προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντίσταση του μείγματος σε απόμειξη. Η ποσότητα του απαιτούμενου προσθέτου για τη ρύθμιση του ιξώδους αυξάνεται, όσο μειώνεται η ποσότητα των λεπτών υλικών. Μάλιστα είναι δυνατή η Παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αποκλειστικά με προσθήκη VMA, χωρίς ανάλογη αύξηση των λεπτών υλικών, τα μείγματα αυτά όμως χαρακτηρίζονται από

χαμηλότερη ανθεκτικότητα στο χρόνο συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα .

Γενικά ο σχεδιασμός των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων βασίζεται στο τρίπτυχο: λεπτά υλικά-ισχυρός υπερρρευστοποιητής-ρυθμιστής ιξώδους, σε συνδυασμό με υψηλή δόση τσιμέντου και χαμηλή ποσότητα νερού.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα διαφοροποιείται από τα αντίστοιχα συμβατικά σκυροδέματα λόγω των ιδιοτήτων του σε νωπή κατάσταση. Τα βασικά χαρακτηριστικά του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ικανότητα πλήρωσης (filling ability), η αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών-απόμειξη (segregation resistance) καθώς και η ικανότητα εισχώρησης μεταξύ των οπλισμών (passing ability). Λόγω της απουσίας διεθνώς αναγνωρισμένων κανονισμών για το ΑΣΣ δεν υπάρχουν θεσμοθετημένες μέθοδοι ελέγχου των παραπάνω ιδιοτήτων. Είναι μάλιστα πολλές φορές συνηθισμένο μία από τις ανωτέρω ιδιότητες να μπορεί να μετρηθεί με περισσότερες από μία διαφορετικές συσκευές και μεθοδολογίες, γεγονός που επιφέρει σύγχυση. Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται οι εναλλακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των βασικών ιδιοτήτων του ΑΣΣ καθώς και οι οριακές τιμές αποδοχής.

Ιδιότητα	Δοκιμή	Μονάδες μέτρησης	Εύρος μονάδων	
			ελάχιστο	μέγιστο
Ικανότητα πλήρωσης (filling ability)	Μέτρο εξάπλωσης	mm	550	850
	Χρόνος $T_{50}$ στο μέτρο εξάπλωσης	sec	<2	5
	Συσκευή V-funnel	sec	<8	25
	Orimet	sec	0	5
Ικανότητα διέλευσης (passing ability)	Συσκευή L-box	(h2/h1)	0.80	1.0
	Συσκευή U-box	(h2-h1)mm	0	30
	Συσκευή Fill-box	%	90	100
	Συσκευή J-ring	mm	0	10
Αντίσταση στο διαχωρισμό (segregation resistance)	Συσκευή GTM test	%	0	15
	Χρόνος $T_{5min}$ στη συσκευή V-funnel	sec	0	+3

Πίνακας 10. Κριτήρια αποδοχής των ιδιοτήτων νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος .

Προκειμένου να χαρακτηριστεί ένα μείγμα ως αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα πρέπει να ικανοποιούνται και οι τρεις ανωτέρω ιδιότητες, ανεξαρτήτως του τρόπου (μεθόδου) με τον οποίο θα μετρηθούν.

Η ικανότητα πλήρωσης του μείγματος (filling ability) εκτιμάται συνήθως με βάση το μέτρο εξάπλωσης. Για τη μέτρηση αυτή χρειάζεται ένας συνηθισμένος κώνος καθίσεως (κώνος Abrams) μία μεταλλική επιφάνεια διαστάσεων τουλάχιστον 900x900mm. Ο κώνος γεμίζεται σε μία στρώση και στη συνέχεια ανασηκώνεται αφήνοντας το σκυρόδεμα να εξαπλωθεί. Λόγω της ρευστότητας του ΑΣΣ σχηματίζεται μία επιφάνεια στρογγυλή («πίτα»). Το μέτρο εξάπλωσης ισούται με το μέσο όρο δύο κάθετων μεταξύ τους διαμέτρων της πίτας αυτής. Η δοκιμή εξάπλωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 8.



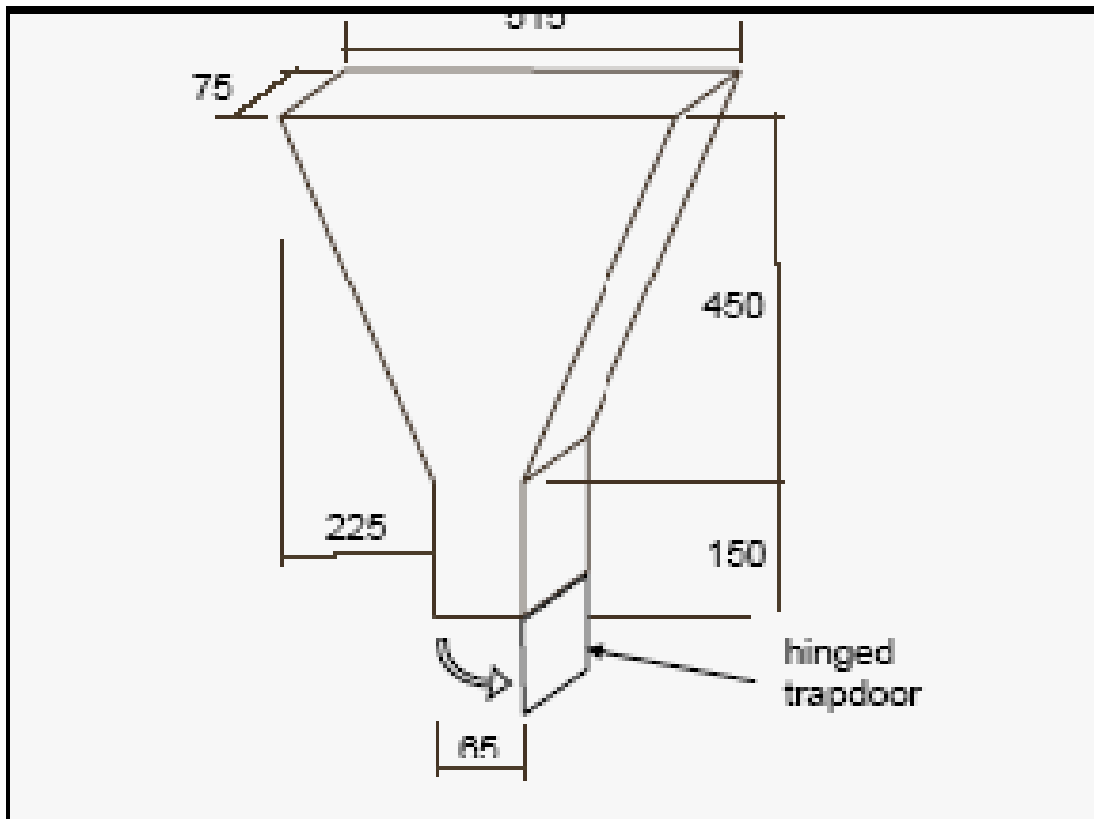
Εικόνα 8. Συσκευή μέτρησης του μέτρου εξαπλώσεως αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

Μία δευτερογενής ένδειξη της ικανότητας ροής του ΑΣΣ είναι και ο χρόνος T50, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να εξαπλωθεί το μείγμα σε διάμετρο 50 mm. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Brite-EuRam χρόνος 3-7 sec είναι αποδεκτός για εφαρμογές έργων πολιτικού μηχανικού, ενώ για κτιριακές κατασκευές χρειάζονται 2-5 sec.

Η αντίσταση του μείγματος στο διαχωρισμό των υλικών του μετριέται συνήθως με τη συσκευή Vfunnel (εικόνα 9). Πρόκειται για ένα κάδο σχήματος V και χωρητικότητας περίπου 12 λίτρων σκυροδέματος ο οποίος είναι κλειστός στο κάτω άκρο του με μία θυρίδα. Ο κάδος γεμίζεται με το ΑΣΣ και στη συνέχεια η θυρίδα ανοίγει, αφήνοντας το περιεχόμενο να αδειάσει σε ένα κουβά. Μετράμε το χρόνο που απαιτείται για να αδειάσει το δοχείο από τη στιγμή που ανοίγουμε τη θυρίδα. Ο χρόνος αυτός πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6-12 δευτερολέπτων, σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Στη συνέχεια ξαναγεμίζουμε το δοχείο με το σκυρόδεμα που έχει αδειάσει στον κουβά και αφού περάσουν 5 λεπτά, ξανοίγουμε τη θυρίδα και μετράμε εκ νέου το χρόνο εκκένωσης. Πιθανή απόμειξη του μείγματος θα έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση του χρόνου αυτού. Η αύξηση του χρόνου εκκένωσης τη

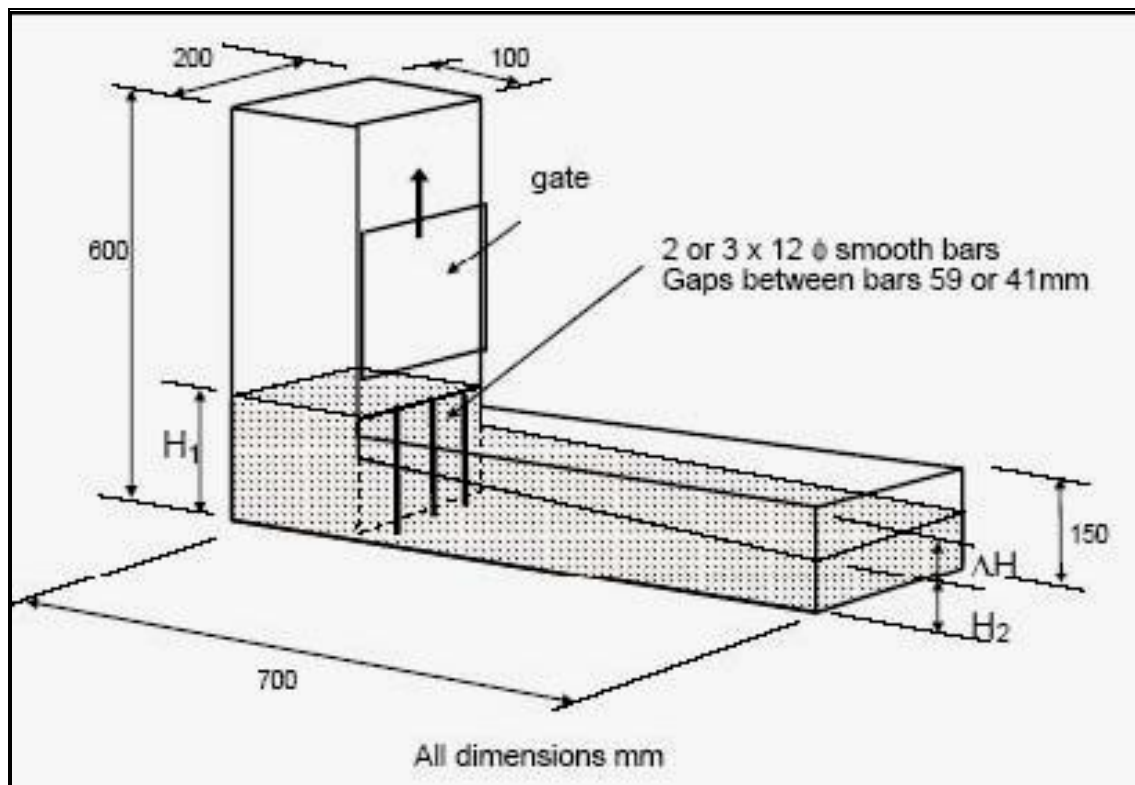


δεύτερη φορά δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3 δευτερόλεπτα. Σύμφωνα όμως με νεώτερες μελέτες, η μέτρηση αυτή δεν αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση.



Εικόνα 9. Συσκευή V-funnel για τη μέτρηση της ροής και της αντίστασης του μείγματος στο διαχωρισμό των συστατικών του.

Η ικανότητα διεύθυνσης του ΑΣΣ δια μέσου των οπλισμών μετρείται στο εργαστήριο με τη συσκευή L-box. (εικόνα 10). Πρόκειται για ένα κουτί σχήματος L ο κατακόρυφος και ο οριζόντιος κλάδος του οποίου επικοινωνούν με μία συρόμενη θυρίδα. Μπροστά από την έξοδο του κατακόρυφου κλάδου υπάρχουν τρία κάθετα σίδερα  $\Phi 12\text{mm}$  σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους. Αφού γεμίσει ο κατακόρυφος κλάδος με το ΑΣΣ, ανοίγουμε τη θυρίδα και αφήνουμε το μείγμα να περάσει δια μέσου των οπλισμών στον οριζόντιο κλάδο. Όταν το σκυρόδεμα σταματήσει να ρέει, μετράμε με ένα μέτρο τα ύψη  $H_1$  και  $H_2$ , στα άκρα του οριζοντίου τμήματος. Ο λόγος  $H_2/H_1$  πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 0.80.



Εικόνα 10. Συσκευή L-Box για τη μέτρηση της ικανότητας διέλευσης του σκυροδέματος μεταξύ των οπλισμών.

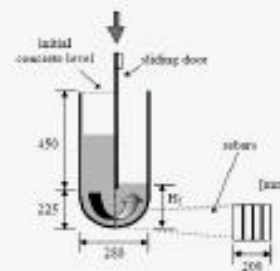
Δοκιμή Εξάπλωσης (Slump Test)



Δοκιμή με δακτύλιο J (J-Ring Test)



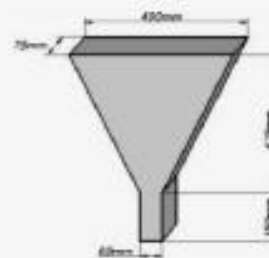
Δοκιμή με δοχείο U (U-Box Test)



Δοκιμή με δοχείο L (L-Box Test)



Δοκιμή με χοάνη V (V-Funnel Test)



Δοκιμή αντίστασης στην απόμειξη με κόσκινο (Sieve segregation resistance Test)



Πίνακας 11. Δοκιμές για το ΑΣΣ

## ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ.

Το ΑΣΣ δεν είναι παρά ένα σκυρόδεμα με βελτιωμένα ρεολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία απορρέουν από τον προσεκτικό σχεδιασμό του μείγματος, τη μεγαλύτερη περιεκτικότητά του σε λεπτά υλικά και την χρήση των κατάλληλων προσθέτων. Τα γνωρίσματά του αυτά επιφέρουν ριζικές αλλαγές στον κατασκευαστικό τομέα αυξάνοντας την παραγωγικότητα, μειώνοντας τους κινδύνους εργατικών ατυχημάτων, βελτιώνοντας τις συνθήκες εργασίας και υγιεινής των τεχνιτών και τελευταίο, αλλά και πλέον σημαντικό, βελτιώνοντας την ποιότητα των κατασκευών αφού το νέο υλικό δεν έχει ανάγκη εξωτερικής συμπύκνωσης. Το ΑΣΣ είναι συνήθως ακριβότερο τουλάχιστον κατά 10-20% σε σχέση με το αντίστοιχο συμβατικό σκυρόδεμα της ίδιας κατηγορίας αντοχής. Αν λάβουμε όμως υπόψη και τους προαναφερθέντες παράγοντες, τότε υπολογίζεται ότι το κόστος ανά κυβικό μέτρο διαστρωμένου ΑΣΣ κυμαίνεται στο 98%-102% του αντίστοιχου συμβατικού σκυροδέματος, ανάλογα πάντα με την περίπτωση.

Παρά τα εμφανή πλεονεκτήματά του, το ΑΣΣ μέχρι σήμερα έχει τύχει περιορισμένης αποδοχής από τον τεχνικό κόσμο της χώρας. Κάποιες από τις μεγάλες εταιρίες σκυροδέματος (Interbeton και ET Beton) έχουν εφαρμόσει τον καινοτόμο αυτό τύπο σκυροδέματος σε αρκετές περιπτώσεις, ενώ η Lafarge Beton πρόκειται σύντομα να κυκλοφορήσει στην Ελληνική αγορά το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με την ονομασία Agilia. Σε εργαστηριακό επίπεδο έχει παρασκευαστεί ΑΣΣ με ελληνικά υλικά από τους συγγραφείς της εργασίας. Στην προαναφερόμενη εργασία παρασκευάστηκε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα τόσο με ασβεστολιθικά, όσο και με πυριτικά αδρανή. Οι αναλογίες των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με πυριτικά αδρανή παρουσιάζονται στον Πίνακα 12, ενώ οι αναλογίες των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

	NCC-S	NCC-V	NCC1-S	NCC2-S	SCC	SCC-L	SCC-V	SCC1-S	SCC2-S
Filler	-	-	-	-	300	330	-	-	-
Αμμος θραυστή	389	384	385	406	380	990	1094	960	1008
Αμμος φυσική	583	576	540	565	475	-	-	-	-
Γαρμ/λι	972	959	760	795	790	530	825	725	751
Τσιμ/το	350	380	430	350	350	350	380	430	350
Πυρ. παιπάλη	-	-	21.5	20	-	-	-	21.5	20
Νερό	205	220	206	215	205	205	220	206	203.5
Υπερ/τής	1.6%	0.65%	2.4%	1%	2.6%	1.64%	3.76%	2.8%	2.4%
VMA	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-
Κάθιση	16 cm	13 cm	19 cm	20 cm	-	-	-	-	-
Εξάπλωση					82 cm	66 cm	77 cm	80 cm	77.5
L-box					0.87	0.80	0.83	0.82	0.80
H2/H1									
V-funnel					11.16 sec	9 sec	8.68 sec	6.75 sec	8.66 sec

\*\*\* Υπερ/τής: lt/100 Kg λεπτού υλικού

Πίνακας 12. Αναλογίες μείξεως (Kg/m<sup>3</sup>) και ρεολογικά χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος με πυριτικά αδρανή

	NCC-20	NCC-22	SCC-19	SCC-21	SCC-L
Filler	-	-	330	330	330
Αμμος θραυστή	990	990	990	990	990
Γαρμ/λι	860	860	530	530	530
Τσιμ/το	350	350	350	350	350
Νερό	205	205	205	205	205
Υπερ/τής	1.65%	1.65%	2.57%	2.42%	1.64%
VMA	-	-	-	-	-
Κάθιση	150 mm	140 mm	-	-	-
Εξάπλωση			720 mm	670 mm	66 cm
L-box			0.85	0.81	0.80
H2/H1					
V-funnel			6.76 sec	8.00 sec	9 sec

\*\*\* Υπερ/τής: lt/100 Kg λεπτού υλικού

Πίνακας 13. Αναλογίες μείξεως (Kg/m<sup>3</sup>) και ρεολογικά χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή.

Για την παρασκευή όλων των μειγμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο πόρτλαντ Ι42.5R, εκτός των μειγμάτων NCC-22 και SCC-21 που παρασκευάστηκαν με ΙΙ32.5N. Κατά περίπτωση, σε ορισμένα μείγματα χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθικό ή πυριτικό φίλλερ και πυριτική παιπάλη. Παράλληλα εξετάστηκε και η δυνατότητα παρασκευής

αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αποκλειστικά με χρήση ρυθμιστού του ιξώδους (VMA). Οι θλιπτικές αντοχές παρουσιάζονται στους πίνακες 14 και 15 για τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με πυριτικά και ασβεστολιθικά αδρανή αντίστοιχα.

	NCC-S	NCC-V	NCC1-S	NCC2-S	SCC	SCC-L	SCC-V	SCC1-S	SCC2-S
$f_{c2days}$ (MPa)	25,4	25,8	43,9	30,6	32,4	26,8	25	39,9	29,9
$f_{c28days}$ (MPa)	52,0	49,8	69,7	48,0	60,7	53,2	51	68,3	47,3
$E_c$ (Gpa)	31,1	29	36,2	33,9	32,5	-	30,2	36,3	34,9
$f_{ct,sp}$ (Mpa)	2,6	2,2	2,6	3,1	2,8	-	2,9	3.1	2.8

Πίνακας 14. Μηχανικά χαρακτηριστικά συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με πυριτικά αδρανή

	NCC-20	NCC-22	SCC-19	SCC-21	SCC-L
$f_{c2days}$ (MPa)	27,05	18,35	33,9	20,95	26,8
$f_{c7days}$ (MPa)	36,25	27,65	47,15	30,95	-
$f_{c28days}$ (MPa)	43,80	37,75	57,45	43,70	53,2

Πίνακας 15. Μηχανικά χαρακτηριστικά συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή .

Στην εικόνα 11 παρουσιάζονται τα τμήματα των κυλινδρικών δοκιμίων που προέκυψαν μετά τη μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως. Είναι φανερό ότι σε κανένα μείγμα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος δεν παρατηρήθηκε απόμειξη ή ελλιπής συμπύκνωση.

Αντιθέτως η δομή όλων των ΑΣΣ είναι παρόμοια με αυτή των αντίστοιχων συμβατικών μειγμάτων ή βελτιωμένα.

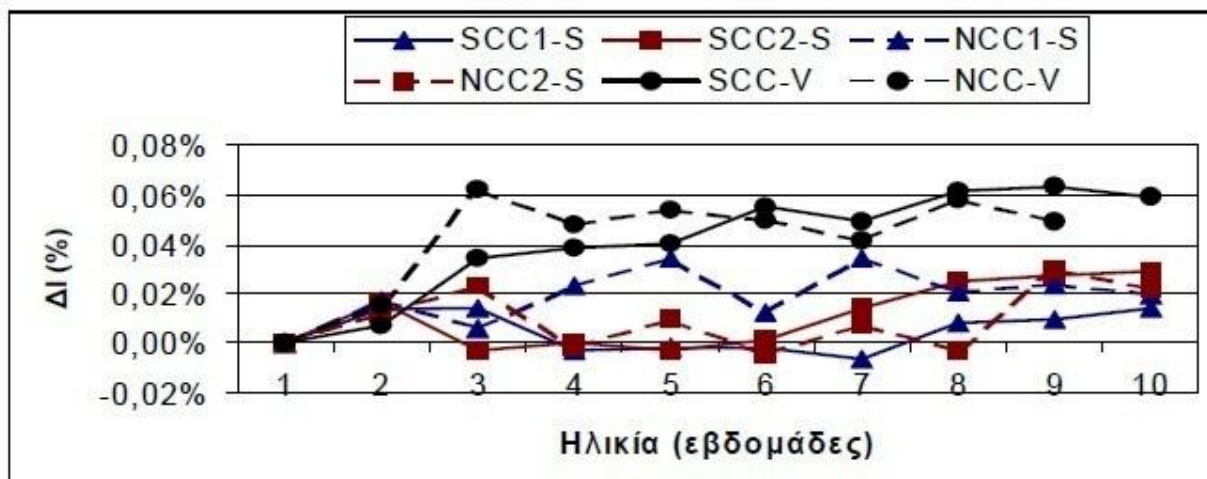


Εικόνα 11.

Παράλληλα με τις μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων των μειγμάτων διενεργήθηκαν και μετρήσεις χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας στο χρόνο, προκειμένου να αποκτηθεί μία πληρέστερη εικόνα της συμβολής των νέων σκυροδεμάτων στη βελτίωση της ποιότητας των κατασκευών. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν η συστολή ξηράνσεως των μειγμάτων, η υδατοπερατότητά τους καθώς και η αντίστασή τους σε ενανθράκωση .

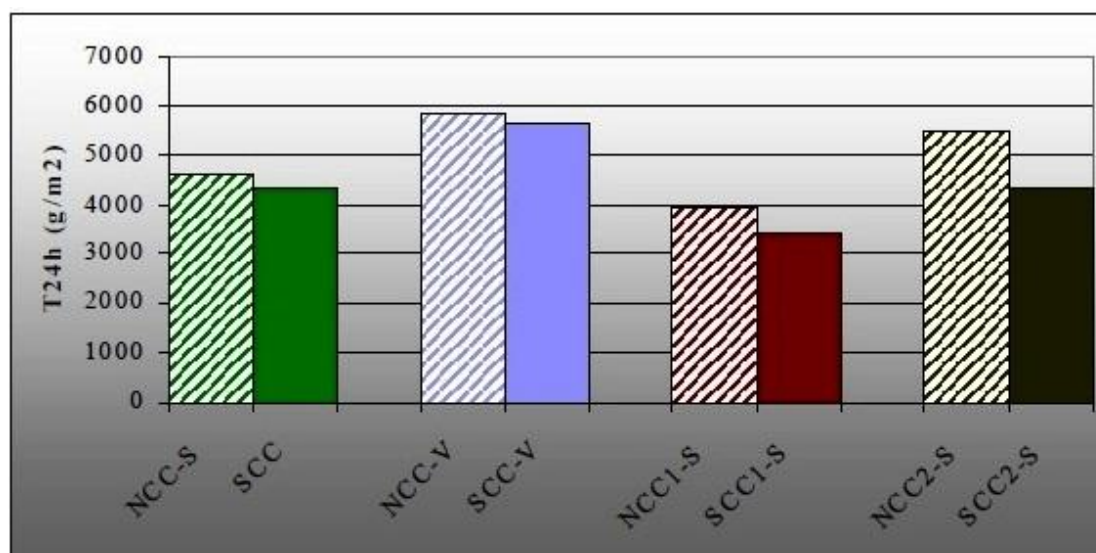
Η συστολή ξηράνσεως μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40x40x160mm. Τα δοκίμια παρέμειναν σε θάλαμο συντηρήσεως μέχρι την ηλικία των 7 ημερών και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε χώρο του εργαστηρίου με RH = 50-60% και T=20±2 °C. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν μέχρι την ηλικία των 3 μηνών και τα αποτελέσματα (μέσος όρος τριών μετρήσεων) παρουσιάζονται στο εικόνα 12.





Εικόνα 12. Συστολή ξηράνσεως παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων

Η υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων μετρήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό της RILEM TC 116. Τα δοκίμια παρέμειναν στο θάλαμο συντηρήσεως για 28 ημέρες. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε ξηραντήριο με θερμοκρασία 65°C όπου και παρέμειναν μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε στην ηλικία των 60 ημερών και τα αποτελέσματα (μέσος όρος δύο μετρήσεων) παρουσιάζονται στην εικόνα 13.

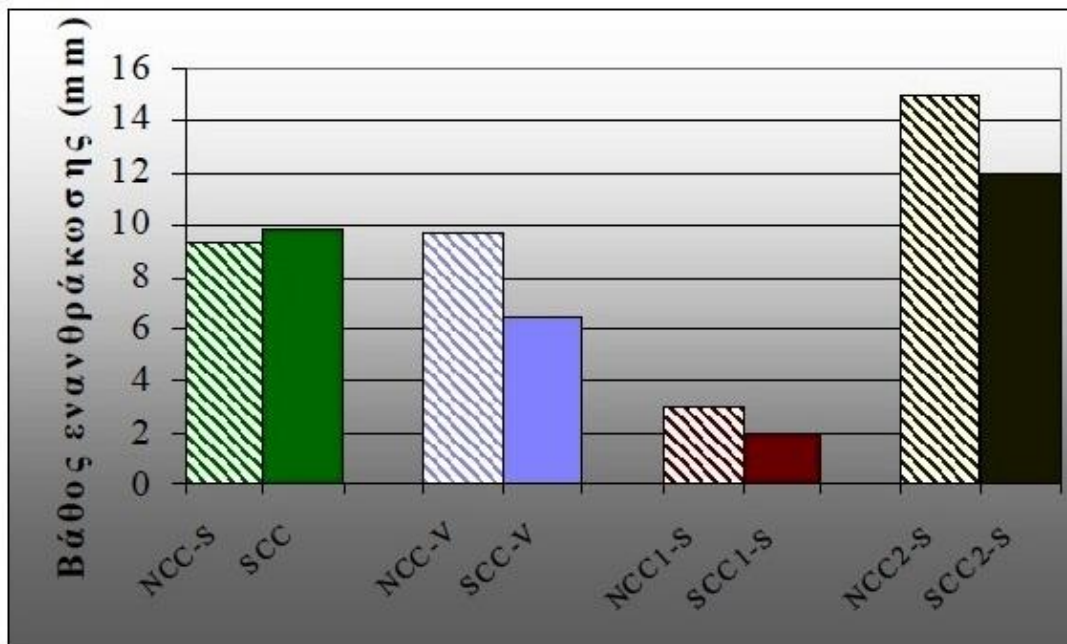


Εικόνα 13. Υδατοαπορροφητικότητα συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων

Η αντίσταση στην ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 63x100 mm. Τα δοκίμια παρέμειναν για 7 ημέρες στο χώρο του εργαστηρίου



(RH=50%, T=20°C ) και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (RH=65%, T=20°C, CO<sub>2</sub>=10%). Τα δοκίμια παρέμειναν στον ανωτέρω θάλαμο για πέντε εβδομάδες και κατόπιν, αφού θραύστηκαν σε διάρρηξη, οι δύο πλευρές κάθε δοκιμίου ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινολοφθαλείνης. Οι τιμές του βάθους ενανθράκωσης (μέσος όρος τεσσάρων δοκιμίων) παρουσιάζονται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14. Βάθος ενανθράκωσης συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων

Τα μείγματα που παρασκευάστηκαν -συμβατικά και ΑΣΣ- ανήκουν ανά δύο στην ίδια κατηγορία αντοχής. Εξετάστηκαν μείγματα που ανήκουν στις κατηγορίες C25/30 έως και C45/55. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ της θλιπτικής αντοχής που αναπτύσσουν τα ΑΣΣ και αυτής που αναπτύσσουν τα συμβατικά μείγματα. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα παρατηρούμε ελαφριά αύξηση της αντοχής των ΑΣΣ, αυτή όμως δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να τοποθετεί το μείγμα σε άλλη κατηγορία αντοχής. Εκεί όπου φαίνεται η σημαντική διαφορά υπέρ των ΑΣΣ είναι στις μετρήσεις της ανθεκτικότητας. Σε κάθε περίπτωση τα ΑΣΣ παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας στο χρόνο. Η βελτίωση των ΑΣΣ κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15% σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά σκυροδέματα, ανάλογα με το είδος του μείγματος και τη μετρούμενη ιδιότητα. Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση του, το ΑΣΣ δεν έχει τύχει μέχρι σήμερα ευρείας αποδοχής. Ένας από τους βασικούς λόγους για αυτό

είναι η ευαισθησία του μείγματος στην παρουσία υγρασίας και στη διακύμανση τόσο της τελευταίας, όσο και της περιεκτικότητας σε λεπτά υλικά. Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες σχεδιασμού μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Η πρώτη προσπάθεια παρουσίασης μεθόδου σχεδιασμού μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) έγινε από τον καθηγητή Okamura το 1995 και ονομάστηκε «Γενική μέθοδος». Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μελέτη των χαρακτηριστικών αυτοσυμπύκνωσης σε κονίαμα. Αφού εξαχθούν τα πρώτα συμπεράσματα και καθορισθούν οι αναλογίες των βασικών υλικών καθώς και του απαιτούμενου υπερρευστοποιητή, ξεκινούν δοκιμαστικές συνθέσεις κονιαμάτων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μέχρι σήμερα ένα αξιόπιστο εργαλείο για το σχεδιασμό μειγμάτων ΑΣΣ. Βασικό της μειονέκτημα είναι η αποκλειστική χρήση τσιμέντου Πόρτλαντ καθώς και η απουσία πρόβλεψης χρήσης λεπτόκοκκων υλικών. Επίσης δεν γίνεται καμία αναφορά στην επίτευξη συγκεκριμένης κατηγορίας αντοχής.

Νέες μεθοδολογίες παρουσιάστηκαν στη συνέχεια, πολλές από αυτές στηριζόμενες στη γενική μέθοδο και στη διεξαγωγή αρχικών δοκιμαστικών συνθέσεων σε κονιάματα. Παρά τα γενικά ικανοποιητικά αποτελέσματα όμως οι περισσότερες χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένους περιορισμούς στην εφαρμογή τους, (όπως τη χρήση ειδικού προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή, την απουσία πρόβλεψης για χρήση ιπτάμενων τεφρών ή πυριτικής παιπάλης, τη χρήση συγκεκριμένων σταθερών που έχουν προκύψει μετά από πειράματα σε αδρανή υλικά συγκεκριμένης χώρας, τη χρήση μεγάλων ποσοτήτων τσιμέντου) ενώ αρκετές είναι ιδιαίτερα δύσχρηστες. Όλες οι ανωτέρω μέθοδοι έχουν επιβεβαιωθεί στην πράξη οδηγώντας στην παρασκευή μειγμάτων με ιδιαίτερα υψηλές αντοχές (άνω των 40-50 MPa στις 28 ημέρες), γεγονός που από μόνο του δεν αφήνει περιθώρια για οποιαδήποτε σκέψη χρήσης τους στην ελληνική αγορά.

Στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης στην Ξάνθη αναπτύχθηκε από τον Επίκουρο Καθηγητή Κ.Κ. Σίδηρη, η «**Ολιστική Μέθοδος Σχεδιασμού και Ελέγχου Διακύμανσης Πρώτων Υλών μειγμάτων Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος**» (ΣΧΕΔιΠΥ), η οποία βασίζεται στην κατά αρχήν μελέτη των ιδιοτήτων αυτοσυμπύκνωσης σε κονιάματα. Η προαναφερόμενη μέθοδος (ΣΧΕΔιΠΥ) επιτρέπει τον κατά αρχήν σχεδιασμό μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος χωρίς περιορισμούς, π.χ. στη χρήση της ποσότητας και του είδους του τσιμέντου, στη χρήση των λεπτών υλικών ή των ποζολανικών προσμείκτων, στην κατηγορία

θλιπτικής αντοχής. Παράλληλα αποτελεί και ένα αξιόπιστο εργαλείο ελέγχου της ποιότητας του μείγματος στο εργοστάσιο παρασκευής σκυροδέματος, εφόσον ελέγχει την διακύμανση της ποιότητας των πρώτων υλών, όπως την μεταβολή της υγρασίας ή /και της κοκκομετρίας των αδρανών υλικών. Η μέθοδος ΣχΕΔιΠΥ χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για την παρασκευή άνω των σαράντα διαφορετικών μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων διαφορετικών κατηγοριών αντοχής με διαφορετικά υλικά (τσιμέντα, αδρανή υλικά, λεπτόκοκκα υλικά και χημικά πρόσμεικτα) της ελληνικής αγοράς.

## ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ο προσδιορισμός και η σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με βάση τη μέθοδο σχεδιασμού (ΣχΕΔιΠΥ) φαίνεται, στην απλουστευμένη μορφή της, στο διάγραμμα στην εικόνα 15 :



Εικόνα 15. Βασικά στάδια σχεδιασμού μείγματος ΑΣΣ.

Η μεθοδολογία που προτείνεται στην εικόνα 20 παρουσιάζεται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

*ΒΗΜΑ 1ο: Υπολογισμός του  $\beta_p$*

Όπως φαίνεται από την εικόνα 20 θα πρέπει να οριστούν οι ρεολογικές ιδιότητες του προς σχεδιασμό μείγματος. Αυτό αφορά στα παρακάτω:

- Είδος του τσιμέντου (τύπος, αντοχή, προέλευση)
- Είδος λεπτών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν (φίλλερ, πυριτική παιπάλη κλπ)
- Εύρεση  $\beta_p$

Εφόσον προσδιοριστούν οι δύο πρώτες παράμετροι, ξεκινά η διαδικασία υπολογισμού της τιμής του  $\beta_p$ . Η τελευταία ορίζεται ως ο λόγος των όγκων  $V_w/V_p$  (Water/Powder), για τον οποίο κατά την εκτέλεση της δοκιμής του κώνου εξάπλωσης θα παρατηρείται μηδενική εξάπλωση.

Η τιμή του  $\beta_p$  εξαρτάται μόνο από το σύνολο των λεπτών υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Για το σκοπό αυτό επιβάλλεται ο επαναπροσδιορισμός της σε περίπτωση αλλαγής του τύπου του τσιμέντου ή/και προσθήκης διαφορετικών λεπτόκοκκων υλικών (π.χ. φίλλερ ή πυριτική παιπάλη).

Ορισμοί

Λεπτά Υλικά (Powder)

Υλικά τα οποία περνούν από το κόσκινο των 0,125 mm. (συμπεριλαμβάνεται το αντίστοιχο κλάσμα των λεπτών υλικών της άμμου, η ποσότητα φίλλερ, η πυριτική παιπάλη κλπ).

Πάστα (Paste)

Το άθροισμα του τσιμέντου, των λεπτών υλικών, του νερού και του αέρα. Κονίαμα (Mortar) Το άθροισμα της πάστας και των αδρανών, ο μέγιστος κόκκος των οποίων είναι μικρότερος των 4 mm.

$V_w, \rho_w$

Ο όγκος του νερού και ειδικό βάρος νερού αντίστοιχα.

$V_p, \rho_p$

Ο όγκος των λεπτών υλικών και ειδικό βάρος λεπτών υλικών αντίστοιχα.

$V_s, \rho_s$

Ο όγκος της άμμου και ειδικό βάρος άμμου αντίστοιχα.

### *ΒΗΜΑ 2ο: Υπολογισμός συστατικών κονιάματος.*

Μετά την εύρεση του  $\beta_p$  θα υπολογιστούν οι βέλτιστες αναλογίες των υλικών που απαιτούνται για αυτοσυμπύκνωση. Ο υπολογισμός των αναλογιών πραγματοποιείται πρώτα σε κονίαμα. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε την αρχική ποσότητα αέρα ίση με 2%, ενώ ο όγκος των χονδρόκοκκων αδρανών (γαρμπίλι), σύμφωνα με την παρούσα μέθοδο, θεωρείται σταθερά ίσος με 30% του συνολικού όγκου του σκυροδέματος.

Η πρωτοτυπία της μεθόδου ΣχΕΔιΠΥ σε αυτό το σημείο έγκειται στο γεγονός ότι όλη η διαδικασία ξεκινά από το σκυρόδεμα που βρίσκεται ήδη σε παραγωγή.

Τα κριτήρια αυτοσυμπύκνωσης όσον αφορά το κονίαμα είναι:

- i. Η δοκιμή του κώνου εξάπλωσης
- ii. Η δοκιμή του V-Funnel

### *ΒΗΜΑ 3ο: Υπολογισμός αναλογιών σκυροδέματος.*

Στο βήμα αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου ΣχΕΔιΠΥ, η αρχική παρασκευή μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος συγκεκριμένων κατηγοριών αντοχής. Με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τα δοκιμαστικά μείγματα των κονιαμάτων προχωρά η παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Είναι δηλαδή γνωστός ο συνδυασμός των αναλογιών όσον αφορά το τσιμέντο, νερό και άμμο καθώς η περιεκτικότητα του μείγματος σε γαρμπίλι θεωρείται σταθερή και ίση με  $800 \text{ kg/m}^3$ . Η ποσότητα του ρευστοποιητή που απαιτείται για αυτοσυμπύκνωση στο σκυρόδεμα, σε σχέση με την αντίστοιχη του κονιάματος, είναι

περίπου διπλάσια. Μετά από τις μέχρι τώρα παρασκευές κονιαμάτων και τις ισάριθμες μεταβάσεις σε σκυροδέματα, η ποσότητα του ρευστοποιητή στο σκυρόδεμα ( $\rho_{σκ}$ ) προκύπτει από την ποσότητα του ρευστοποιητή στο κονίαμα ( $\rho_κ$ ) από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{σχ} = P_{σκ} \chi^{(2\pm 0.3)}$$

Τέλος για τον έλεγχο των ρεολογικών ιδιοτήτων των νωπών μειγμάτων για σκυροδέματα, θα χρησιμοποιηθούν:

- Ο κώνος εξάπλωσης
- Η συσκευή L- Box
- Η συσκευή V-Funnel
- Η συσκευή J- Ring

με τους περιορισμούς που αναφέρονται στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (European Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2005).

Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των νωπών μειγμάτων (μέτρο εξάπλωσης, ικανότητα διείσδυσης μεταξύ των οπλισμών, αντίσταση στον διαχωρισμό αδρανών) μετρώνται και καταγράφονται σε κάθε περίπτωση.

## 2.3 ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) είναι μία κατηγορία σκυροδέματος που παρουσιάστηκε στον τεχνικό κόσμο στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και κερδίζει συνεχώς έδαφος στην σύγχρονη κατασκευαστική πραγματικότητα. Το ΑΣΣ είναι ένας τύπος σκυροδέματος που είναι ικανός να ρέει στους ξυλότυπους, χωρίς να παρουσιάζει διαχωρισμό, και μπορεί να πληρώσει ομοιόμορφα και πλήρως κάθε σημείο του ξυλότυπου ρέοντας αποκλειστικά και μόνο λόγω του ίδιου βάρους του χωρίς καμία ανάγκη δόνησης ή κατανάλωσης άλλου είδους ενέργειας. Το ΑΣΣ όπως και κάθε άλλος τύπος σκυροδέματος δεν είναι τυποποιημένο. Έτσι, λοιπόν ο κάθε τύπος ΑΣΣ θα πρέπει να σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ειδικές συνθήκες του έργου στο οποίο θα εφαρμοστεί. Ο καθορισμός των αναλογιών των συστατικών που θα χρησιμοποιηθούν για την Παρασκευή του εξαρτάται από τις δομικές απαιτήσεις της κατασκευής όπως το σχήμα, οι διαστάσεις, η πυκνότητα του σπλισμού και οι συνθήκες κατασκευής. Στις συνθήκες κατασκευής περιλαμβάνονται οι μέθοδοι μεταφοράς, τοποθέτησης, φινιρίσματος και αγωγής του σκυροδέματος. Η ειδική απαίτηση του ΑΣΣ είναι η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσδης χωρίς δόνηση. Όλες οι υπόλοιπες επιδόσεις του, όπως η αντοχή και η ανθεκτικότητα, υπολογίζονται σαν να επρόκειται για ένα συνήθη τύπο σκυροδέματος.

Αρχικά, το ΑΣΣ δημιουργήθηκε προκειμένου να αντιμετωπίζει συγκεκριμένα προβλήματα:

- Προβλήματα ανεπάρκειας ή εκπαίδευσης του εργατικού προσωπικού που οδηγούσε σε ατέλειες συμπύκνωσης και δόνησης
- Προβλήματα ανεπάρκειας των μελετών, όπου η ελλιπής σχεδίαση των κατασκευών καθιστούσε δύσκολη έως αδύνατη τη σωστή συμπύκνωση του σκυροδέματος
- Προβλήματα ανθεκτικότητας στο χρόνο, καθώς οι απαιτήσεις για ανθεκτικότητα άνω των 100 ετών γίνονταν όλο και περισσότερες.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ένα σκυρόδεμα προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί ως ΑΣΣ οφείλει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

1. Υψηλή ρευστότητα
2. Πλαστικότητα
3. Αντίσταση σε διαχωρισμό
4. Επαρκής ικανότητα πλήρωσης
5. Υψηλή εργασιμότητα
6. Υψηλή σταθερότητα
7. Αυξημένη αντίσταση στη διείδυση διοξειδίου του άνθρακα, χλωριώντων και νερού και ελαχιστοποίηση της συστολής ξήρανσης στο σκληρυμένο στάδιο.

Τα πλεονεκτήματα του ΑΣΣ είναι πολλά έναντι του συμβατικού. Το σκυρόδεμα είναι πλέον πολύ ανθεκτικό απέναντι σε δυσμενείς εξωτερικούς παράγοντες, η διάστρωση και η συμπύκνωσή του είναι τέλεια όπως τέλεια είναι και η τελική του εμφάνιση. Δεν χρειάζεται πλέον συμπύκνωση ούτε και σε στοιχεία που οι συμβατικοί μέθοδοι δεν μπορούσαν να βρουν εφαρμογή λόγω πολυπλοκότητας των ξυλοτύπων, με αποτέλεσμα να μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκα στοιχεία από σκυρόδεμα και μάλιστα με απόλυτη ασφάλεια. Σημαντική είναι η μείωση του χρόνου κατασκευής (καθώς οι αναγκαίες εργασίες κατά τη σκυροδέτηση μειώνονται), της ανάγκης παρουσίας προσωπικού κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης και του θορύβου λόγω της απουσίας δόνησης (ο οποίος στην περίπτωση των μονάδων προκατασκευής είναι πολύ υψηλός). Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα που δεν θα μπορούσε να αγνοηθεί είναι η σημαντική μείωση του κόστους εφαρμογής της κατασκευής. Αυτό οφείλεται:

Α) στην αυξημένη ταχύτητα σκυροδέτησης, καθώς η ταχύτητα ροής του ΑΣΣ είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος με αποτέλεσμα την ταχύτερη ολοκλήρωση του έργου,

Β) στην απαίτηση για λιγότερο εργατικό δυναμικό,

Γ) ελαχιστοποίηση επιδιόρθωσης ατελειών, καθώς η τέλεια διάστρωση του ΑΣΣ εξασφαλίζει κέρδη τόσο σε εργατοώρες όσο και σε επισκευαστικά κονιάματα,

Δ) στην εξάλειψη της δόνησης η οποία ειδικά στις Βιομηχανίες Προκατασκευών μειώνει το ενεργειακό κόστος σε σημαντικό βαθμό και συντελεί θετικά στην υγεία των εργαζομένων της αφού βελτιώνονται αισθητά οι συνθήκες εργασίας.

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και παράγοντες που αυξάνουν το κόστος. Ένας από αυτούς είναι η αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο η οποία όμως



είναι δυνατόν να μειωθεί με τη χρήση κατάλληλων φίλλερ. Επιπρόσθετα, η χρήση πρόσμικτων υψηλής τεχνολογίας και κόστους σε υψηλές δοσολογίες μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερη οικονομική επιβάρυνση. Τέλος, επισημαίνεται η ανάγκη για ισχυρότερα καλούπια καθώς η ρευστότητα του σκυροδέματος επιβάλλει μεγαλύτερη πίεση στα καλούπια. Βέβαια, η χρήση του ΑΣΣ σε σχέση με τον παράγοντα κόστος εξαρτάται από τον όγκο της κατασκευής. Αυτό συνεπάγεται ότι σε στοιχεία με μικρό όγκο και αραιό οπλισμό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένα συμβατικό σκυρόδεμα έχοντας εξίσου καλά αποτελέσματα με το ΑΣΣ. Αντίθετα σε στοιχεία με μεγάλο όγκο και πυκνό οπλισμό, όπως για παράδειγμα σε έργα υποδομής, η χρήση του ΑΣΣ είναι προτιμότερη διότι επιφέρει σημαντικό κέρδος και βελτίωση της ποιότητας της κατασκευής.

Συμπερασματικά, το ΑΣΣ είναι μία τεχνολογία που συμπληρώνει το συμβατικό σκυρόδεμα και δεν το αντικαθιστά. Ο κατασκευαστής οφείλει να ελέγξει τις προδιαγραφές του έργου και να διαλέξει πιο υλικό τον συμφέρει να χρησιμοποιήσει και σε ποιο σημείο της κατασκευής. Πρέπει ωστόσο να γνωρίζει καλά το κόστος των υλικών και τις απαιτούμενες εργατοώρες ώστε να μπορεί να εκτιμήσει το οικονομικό όφελος.

## **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΣΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ**

Το ΑΣΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν σε κάθε είδους κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς και σε επισκευές δομικών στοιχείων. Συγκεκριμένα, ενδείκνυται στην ενίσχυση κατακόρυφων στοιχείων (υποστυλωμάτων) και σε συνδυασμό με τη χρήση μανδύων επιφέροντας το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Ακόμα, το ΑΣΣ βρίσκει εφαρμογή στην επισκευή βιομηχανικών δαπέδων, δοκών, γεφυρών, πλαισίων οδογεφυρών και στην επισκευή θεμελιώσεων υδραυλικών έργων λόγω της αυξημένης ανθεκτικότητάς του σε διαβρωτικά περιβάλλοντα με θαλασσινά άλατα.

### **1. Επισκευή και ενίσχυση βάθρων γέφυρας μετά από σεισμό**

Η παρακάτω αναφορά στηρίζεται σε πειραματικά δεδομένα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο πειραμάτων σε υλικά και κατασκευές του Πανεπιστημίου Roma Tre σε αντιπροσωπευτικό δείγμα κοντών και ψηλών υποστυλωμάτων. Το πείραμα

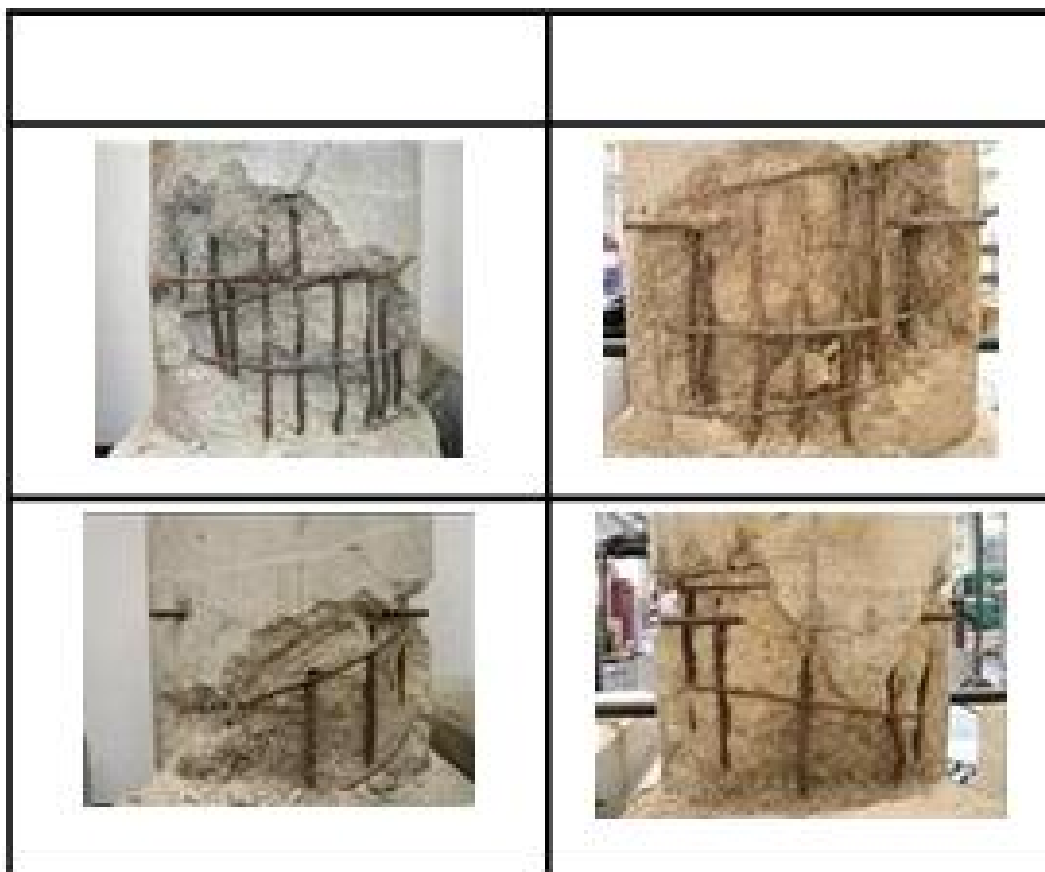
αποδεικνύει τη συνεργασιμότητα του ΑΣΣ με τον μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή και το χάλυβα.

Κατασκευάστηκαν οκτώ δείγματα σε κλίμακα τα οποία φορτίστηκαν καταλλήλως σύμφωνα με δύο επιταχυνσιογραφήματα.



Εικόνα 16. Υποστυλώματα σε κλίμακα ψηλά και κοντά

Μετά από καταπονήσεις των υποστυλωμάτων στο εργαστήριο, οι κύριες ζημιές που εντοπίστηκαν ήταν της μορφής που φαίνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17. Ζημιές των υποστυλωμάτων

Η διαδικασία της επισκευής των παραπάνω ζημιών είναι οι εξής: αρχικά θα αφαιρεθεί το αποσθρωμένο σκυρόδεμα και θα καθαριστεί επιμελώς η επιφάνεια από τυχόν υπολείματα, στη συνέχεια το υπόλοιπο σκυρόδεμα θα ενισχυθεί με τη χρήση ρητινένσεων, έπειτα αφού αντικατασταθεί ο λυγισμένος ή σπασμένος οπλισμός από ανοξείδωτο, θα γίνει η αποκατάσταση του κατεστραμμένου σκυροδέματος με ΑΣΣ και τέλος θα τοποθετηθούν περιμετρικά μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Υποστώλωμα μετά την αφαίρεση του αποσαθρωμένου σκυροδέματος	Ενίσχυση με <u>ρητινενέσεις</u>	Αποκατάσταση του χαλασμένου οπλισμού	Χρήση <u>ΑΣΣ</u>	Περιμετρική τοποθέτηση <u>μανδύων ΙΟΠ</u>
				

Εικόνα 18. Επισκευή και ενίσχυση των υποστυλωμάτων

Συμπερασματικά, αυτή η διαδικασία απέδειξε την αύξηση της ολκιμότητας και της διατμητικής αντοχής των δοκιμίων μέσω της ενίσχυσης και επισκευής τους με χρήση ΑΣΣ σε συνδυασμό με μανδύες ΙΟΠ.

## 2. Αποκατάσταση του φέροντα οργανισμού της Γέφυρας Wynaco, King



Εικόνα 19. Γέφυρα Wynaco, King

Η Γέφυρα Wynaco σχεδιάστηκε το 1957 στην Αμερική, είχε πλάτος λωρίδων 3 μέτρα και κιγκλιδώματα που εδράζονταν σε τοίχους από σκυρόδεμα, οι οποίοι βρίσκονται παράπλευρα των λωρίδων κυκλοφορίας. Σεισμικά, η γέφυρα ήταν εξαιρετικά ευπαθής γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη: ψηλών και λεπτών υποστυλωμάτων, μη συνδεδεμένων γειτονικών ανοιγμάτων και πολύ μικρών μηκών εδράσεως.

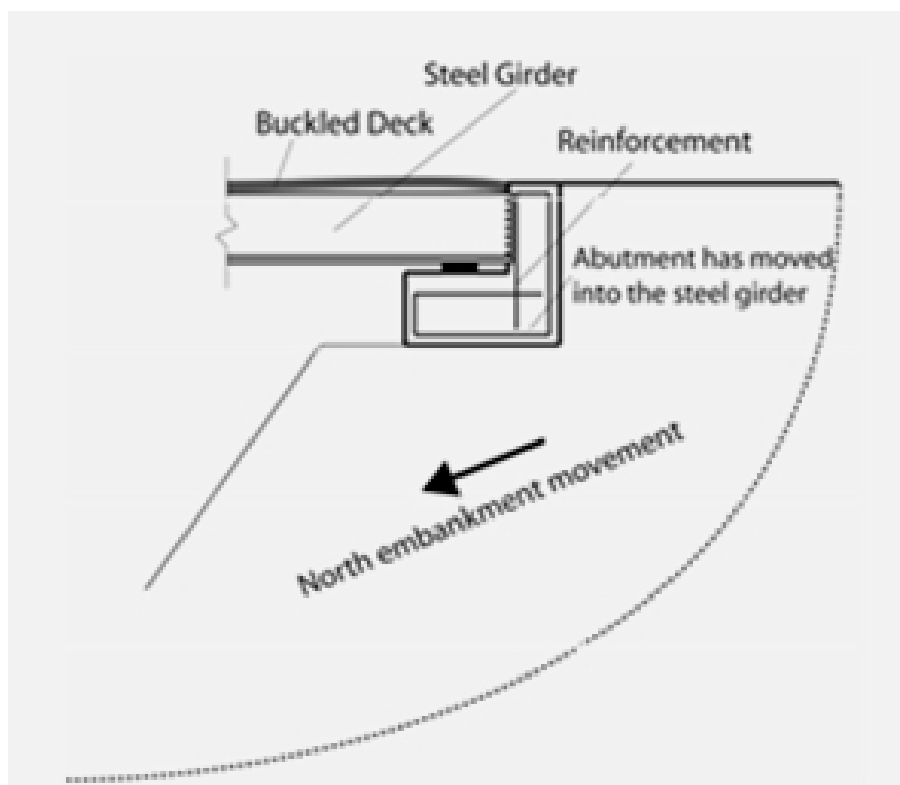
Έτσι, το μέγεθος του κινητού φορτίου που μπορούσε να αναλάβει η γέφυρα περιοριζόταν σε 15 τόνους, ενώ τα κιγκλιδώματά της είχαν λιγότερα από 50 % της απαιτούμενης αντοχής. Λόγω των παραπάνω προβλημάτων η γέφυρα έπρεπε να επισκευαστεί. Η μελέτη της αποκατάστασης της γέφυρας είναι μοναδική, καθώς συμπεριλαμβάνεται η χρήση υψηλής απόδοσης ΑΣΣ.

Η επέμβαση προσέδωσε υψηλή αντοχή στις συνδέσεις των δοκών, επισκεύασε και ανεδιέταξε τις υπάρχουσες δοκούς για να αξιοποιηθούν σε συνεργασία με νέες δοκούς, αντικατέστησε το υπάρχον κατάστρωμα με ένα μεγαλύτερου πλάτους κατάστρωμα από σύνθετο σκυρόδεμα και κατασκεύασε νέα κιγκλιδώματα στη γέφυρα. Οι αλλαγές αυτές συνέβαλαν καθοριστικά στην αύξηση της ασφάλειας της

κυκλοφορίας επί της γέφυρας και στην ασφαλή μετάβαση των οχημάτων.

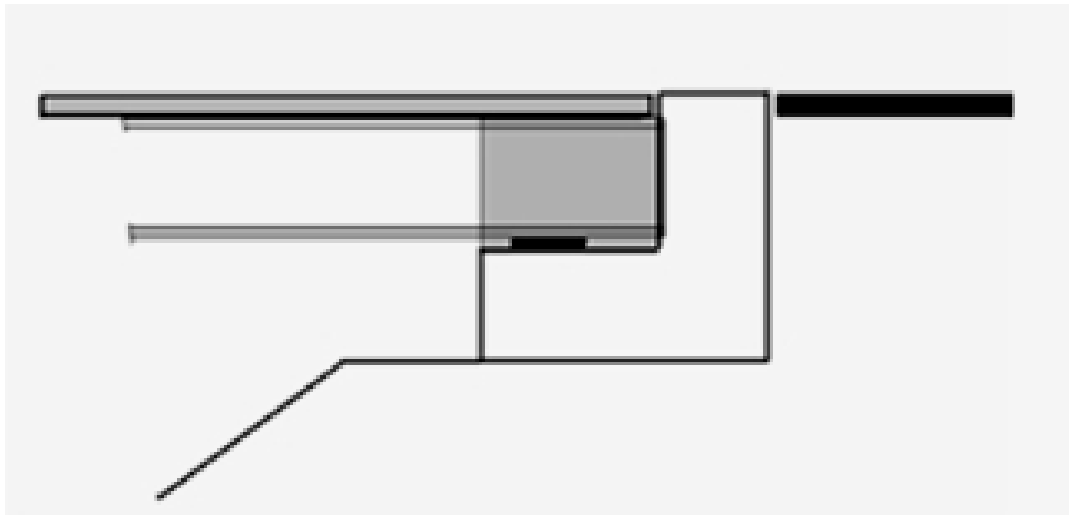
### 3. Επισκευή των Mead Bridges I - 25 στο Trinidad του Colorado

Το ζητούμενο που προέκυψε στην εν λόγω σιδερένια γέφυρα, το οποίο οφείλεται στην απρόοπτη υποχώρηση των ακροβάθρων, ήταν να σταθεροποιηθούν οι στηρίξεις της στο επίχωμα, ενώ σε πολλά σημεία είχε θρυμματισθεί το υπάρχον σκυρόδεμα και ο οπλισμός ήταν εκτεθειμένος.



Εικόνα 20. Προϋπάρχουσα στήριξη της γέφυρας

Γι' αυτό τοποθετήθηκε ενίσχυση από ΑΣΣ στις άκρες της γέφυρας έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί η γέφυρα όπως φαίνεται στην εικόνα 26 και παράλληλα να προστατευθεί ο οπλισμός. Το ΑΣΣ είναι η ιδανική λύση για αυτή την επισκευή λόγω της ευκολίας που παρουσιάζει στη σκυροδέτηση και στη συμπύκνωση χωρίς δόνηση.



Εικόνα 21. Προτεινόμενη ενίσχυση για τη στήριξη της γέφυρας

4. Επισκευή - ενίσχυση της εξωτερικής επιφάνειας σιδηροδρομικής εγκατάστασης 30 ετών κάτω από οδικό δίκτυο .

Στην συγκεκριμένη περίπτωση λόγω των διαβρωτικών αλάτων είχε επέλθει μεγάλου βαθμού διάβρωση στο φέροντα οργανισμό της κατασκευής. Ο σκοπός ήταν να εφαρμοστεί μία τεχνική η οποία θα είχε τέτοια αποτελέσματα ώστε δεν θα χρειαζόταν να επαναληφθεί σε λιγότερο από 40 χρόνια.

Επιπλέον, η καινούρια επιφάνεια έπρεπε να έχει υψηλές αισθητικές προδιαγραφές. Έπρεπε, δηλαδή να αποφευχθεί ο κίνδυνος επιφανειακών ρηγματώσεων που θα οφείλονταν στη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος και στην επίδραση της τριχοειδούς ανύψωσης επιβλαβών υδατικών διαλυμάτων. Δεν ήταν δυνατή η χρήση δονητών επειδή η σκυροδέτηση έπρεπε να γίνει σε περιορισμένες θέσεις (πάχος νέας στρώσης 60 mm με παράλληλη συνέχιση της κυκλοφορίας κατά τη διεξαγωγή του έργου). Γι' αυτό κατέστη κατάλληλη η εφαρμογή του ΑΣΣ το οποίο παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο, σε διάβρωση και δεν χρειάζεται δόνηση για τη συμπύκνωσή του.

Το πρόβλημα των επιφανειακών ρηγματώσεων αντιμετωπίστηκε με μία δίπλευρη προσέγγιση. Η μάζα του σκυροδέματος βελτιώθηκε βελτιστοποιώντας τη σύνθεση του συνδετικού υλικού (τσιμέντο - φίλλερ - νερό - πρόσθετα).

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η τελική συστολή του νέου σκυροδέματος να είναι λιγότερη από 70% σε σύγκριση με τα συμβατικά ΑΣΣ. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε μίας νέας γενιάς ινοπλισμένο πολυμερές.



Εικόνα 22. Βλάβη



Εικόνα 23. Μετά την επισκευή με ενισχυμένο ΑΣΣ



Τέλος, για ακόμα μία φορά διαπιστώνουμε ότι με συνδυαστική χρήση του ΑΣΣ και ΙΟΠ πετυχαίνουμε τα καλύτερα επιθυμητά αποτελέσματα καλύπτοντας και τις πιο απαιτητικές προδιαγραφές.

#### 5. Επισκευή - ενίσχυση προκατασκευασμένου τοιχώματος

Το ΑΣΣ χρησιμοποιείται και για την κατασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων, αλλά και για την επισκευή τους όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 24. Προκατασκευασμένο τοίχωμα πριν την αποκατάσταση



Εικόνα 25. Προκατασκευασμένο τοίχωμα μετά την αποκατάσταση

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΑΣΣ

1. Το ΑΣΣ χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε όλη την Ευρώπη από τότε που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη Σουηδία στα τέλη της 10ετίας του '90. Οι πρώτες γνωστές εφαρμογές του είναι οι βάσεις αγκύρωσης της γέφυρας Akashi - Kaiyo. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση του ΑΣΣ μείωσε το χρόνο κατασκευής του κατά 20%. Έκτοτε, έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα στη γεφυροποιία τόσο για κατασκευαστικούς όσο και για επισκευαστικούς λόγους.



Εικόνα 26. Καλουπωμένη δοκός πριν την σκυροδέτηση με ΑΣΣ



Εικόνα 27. Τμήματα από τις Scajaquada Expressway Bridges που πρέπει να προστατευθούν από το νερό του ποταμού έναντι διάβρωσης

2. Λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει το ΑΣΣ τόσο στην εφαρμογή όσο και στη κοστολόγησή του έχει πλέον αρχίσει να εφαρμόζεται σε Βιομηχανίες Προκατασκευών. Οι προκατασκευές αυτές αφορούν είτε μεγάλα

τεχνικά έργα, είτε μικρότερα.

3. Λόγω της ευκολίας που παρουσιάζει το ΑΣΣ στη σκυροδέτηση, ειδικά σε στοιχεία μικρού πάχους όπως οι πλάκες όπου δεν χρειάζεται δόνηση, παρατηρούμε ότι έχει ξεκινήσει να εφαρμόζεται η τεχνική αυτή στην κατασκευή πλακών.

Τέλος, σε στοιχεία μεγάλου μεγέθους και πυκνών οπλισμών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή σκυροδέτηση και συμπύκνωση, αλλά και να καλυφθούν οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας συνιστάται η χρήση του ΑΣΣ.

## 2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΡΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ ΠΑΣΤΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ – ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Μετά από τις πλέον βασικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος είναι η εργασιμότητα του. Ο όρος εργασιμότητα είναι πολύ πλατιά ορισμένος. Καμία δοκιμή από μόνη της δεν μπορεί να μετρήσει όλα τα επίπεδα της εργασιμότητας. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος περιγράφει την εργασιμότητα ως “εκείνη την ιδιότητα του φρέσκου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία με την οποία μπορεί να αναμιχθεί, να τοποθετηθεί και να φινιριστεί σε ομογενή κατάσταση”. Κατά την Ένωση Ιαπώνων Μηχανικών Σκυροδέματος, η εργασιμότητα ορίζεται ως “η ιδιότητα του φρέσκου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία και την ομοιογένεια με τις οποίες μπορεί να αναμιχθεί, τοποθετηθεί και να συμπυκνωθεί λόγω της συνεκτικότητάς του, της ομοιογένειας με την οποία μπορεί να μετατραπεί σε σκυρόδεμα και του βαθμού στον οποίο μπορεί να αντισταθεί στο διαχωρισμό των υλικών”. Ακόμα, ο Neville ορίζει την εργασιμότητα ως “το ποσό του χρήσιμου εσωτερικού έργου που είναι απαραίτητο για να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση”. Η εργασιμότητα δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά επίσης και από τη φύση της εφαρμογής.

Η εργασιμότητα του σκυροδέματος δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να θυσιάζεται ώστε να αναπτυχθούν καλύτερες ιδιότητες στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, όπως η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Η εργασιμότητα μετριέται τυπικά στον τόπο διάστρωσης του σκυροδέματος μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής εξάπλωσης (cone slump test). Εντούτοις, κάποιες έρευνες που διεξήχθησαν από την NMRC (National Ready Mixed Concrete Association) και το NIST (National Institute of Standards and Technology), έδειξαν ότι οι μετρήσεις αυτές δεν είναι και τόσο αντιπροσωπευτικές για την πραγματική συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος στο πεδίο τοποθέτησής του. Αναφέρθηκε ότι μίγματα σκυροδέματος με την ίδια μετρούμενη τιμή εξάπλωσης, δε συμπεριφέρονται το ίδιο κατά την τοποθέτηση. Αυτό υπονοεί ότι η τιμή εξάπλωσης δε δίνει αρκετά δεδομένα για να χαρακτηριστεί η ρεολογική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

Στο πεδίο της κατασκευής, τεχνικοί όροι όπως η εργασιμότητα, η ρευστότητα και η συνεκτικότητα, χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για την περιγραφή της συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος κατά τη ροή του. Οι ορισμοί τους βέβαια είναι πολύ

υποκειμενικοί. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει ανάγκη για μια πιο θεμελιώδη και ποσοτική περιγραφή της ροής του σκυροδέματος. Αρκετοί ερευνητές, όπως ο Banfill και ο De Larrard, έχουν χρησιμοποιήσει με επιτυχία την **εξίσωση του Bingham**. Σύμφωνα με αυτή, δύο είναι οι παράμετροι που προσδιορίζουν τη ροή, η **διατμητική τάση** και το **πλαστικό ιξώδες**. Η μεν **διατμητική τάση** σχετίζεται με την **εξάπλωση**. Το δε ιξώδες μπορεί να σχετιστεί και με άλλες ιδιότητες όπως την ευκολία τοποθέτησης και άντλησης, το βαθμό φινιρίσματος και την κολλώδη συμπεριφορά. Επιπροσθέτως, η απόμιξη θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η μη ικανότητα των αδρανών να βυθίζονται μέσα στην πάστα του τσιμέντου. Αυτό το φαινόμενο συνδέεται με το **ιξώδες της τσιμεντόπαστας** και το σχεδιασμό των **αναλογιών στο μίγμα του σκυροδέματος**. Το πλαστικό ιξώδες συνήθως αμελείται λόγω του ότι υπάρχουν πολύ λίγοι τύποι συσκευών και διατάξεων που μπορούν να το μετρήσουν. Συνεπώς, οι μέθοδοι που αξιοποιούνται για την **πρόβλεψη της εργασιμότητας του σκυροδέματος**, πρέπει να λάβουν υπόψη τους τη διατμητική τάση και το ιξώδες της πάστας του τσιμέντου, η οποία είναι το **συνδεδειγμένο υλικό** των αδρανών στο σκυρόδεμα.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι ένας τύπος σκυροδέματος που εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και αρκετές διαφορές, έναντι των συμβατικών, όσον αφορά τη ρεολογική συμπεριφορά του. **Το είδος των αδρανών, το σχήμα και το μέγεθός τους** είναι τα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιώσουν τις ρεολογικές ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου. Τα εργαλεία του ρεολογικού χαρακτηρισμού των ΑΣΣ είναι στοιχειακά και λίγες είναι οι μελέτες που έχουν αφιερωθεί στην ανάλυση, κατανόηση και προτυποποίηση της ρεολογικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών. **Το ΑΣΣ είναι ρευστό τύπου Bingham**. Τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά των στερεών συστατικών επιδρούν αισθητά στην τιμή κατωφλίου διάτμησης. Ως τιμή κατωφλίου ορίζεται η κατά Bingham τιμή της διατμητικής τάσης πάνω από την οποία, ένα ρευστό συμπεριφέρεται ως υγρό.

Το νωπό σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί ρευστό, δεδομένου ότι μπορεί να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος βαθμός ρευστότητας και ότι το υλικό είναι ομογενές. Η περιγραφή της ροής ενός σκυροδέματος περιλαμβάνει τη χρήση εννοιών όπως η **διατμητική τάση (shear stress)** και ο **ρυθμός διάτμησης (shear rate)**, των οποίων ο λόγος δίνει το **ιξώδες (viscosity)**. Το σκυρόδεμα ως ρευστό, κατατάσσεται στα λεγόμενα ρευστά Bingham. Τα ρευστά Bingham χαρακτηρίζονται από μια τιμή κατωφλίου διάτμησης. Σε αντίθεση με τα νευτωνικά ρευστά, μπορούν να

μεταδώσουν τη διατμητική τάση χωρίς την ύπαρξη βαθμίδας ταχύτητας. Όμως για να αρχίσει ένα ρευστό τύπου Bingham να ρέει, θα πρέπει η ασκούμενη σε αυτό διατμητική τάση να υπερβεί την τιμή κατωφλίου. Το ρευστό αυτό με διατμητικές τάσεις μικρότερες του κατωφλίου θα συμπεριφέρεται περίπου ως στερεό, ενώ με μεγαλύτερες τιμές αυτής θα περνάει στην περιοχή των υγρών. Όσον αφορά το προφίλ των ταχυτήτων κατά την κίνηση του ρευστού πρέπει να σημειωθούν τα παρακάτω: Όταν τα νευτωνικά ρευστά ρέουν μέσα σε αγωγούς ή κανάλια, εμφανίζουν ένα προφίλ ταχυτήτων, του οποίου η βαθμίδα μειώνεται προς το κέντρο του αγωγού. Έτσι η διατμητική τάση που μεταδίδεται από στρώμα σε στρώμα, συνεχώς ελαττώνεται όσο η μελέτη προχωράει προς το κέντρο. Επειδή τα ρευστά τύπου Bingham μετατρέπονται σε στερεά όταν η ασκούμενη διατμητική τάση μειωθεί κάτω από την τιμή κατωφλίου, καθίσταται σαφές ότι θα γίνονται στερεά κοντά στο κέντρο του αγωγού, δημιουργώντας έτσι ένα στερεό μόρφωμα, το οποίο συμπαρασύρεται από το υπόλοιπο ρευστό κατά τη ροή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν αναμιγνύονται υλικά που έχουν προέλθει από θραύση και μείωση μεγέθους με συνδετικά υλικά, όπως στη περίπτωση των αδρανών με το τσιμέντο προς δημιουργία σκυροδέματος, είναι κρίσιμο να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή «**σωματιδιακή πλήρωση**» (**particle pack**). Με τον όρο αυτό εννοείται ο συνδυασμός των υλικών έτσι ώστε το μίγμα να έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα όταν ανακατεύεται χωρίς τη προσθήκη νερού. Η επίτευξη της υψηλότερης πυκνότητας μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις αντοχές και να μειώσει την απαίτηση σε υδατικό περιεχόμενο. Τα τελευταία επιτυγχάνονται αυξάνοντας την επιφάνεια σύνδεσης ανά μονάδα μάζας του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, τόσο περισσότερα είναι τα σωματίδια με τα οποία έρχεται σε επαφή ένα συγκεκριμένο σωματίδιο, συνεπώς αυξάνει η επιφάνεια σύνδεσης, με άμεση επίδραση στις μηχανικές αντοχές.

Μία άλλη ιδιότητα που επηρεάζει την ρεολογία του ΑΣΣ είναι η **πυκνότητα στοίβαξης (packing density)**. Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα αδρανή εντός του σκυροδέματος είναι καθοριστικός για την καλή συμπεριφορά του υλικού. Σκοπός είναι να καλυφθούν αποτελεσματικά τα κενά μεταξύ των αδρανών και να ελαχιστοποιηθούν οι ανομοιογένειες στο μίγμα της πάστας και των αδρανών, μειώνοντας έτσι την ανισοτροπία του τελικού προϊόντος. Για δεδομένο όγκο υλικού κυβικού σχήματος, αυτό επιτυγχάνεται μεγιστοποιώντας το πηλίκο του όγκου των



αδρανών προς τον συνολικό όγκου του κυβικού δοχείου, δηλαδή μεγιστοποιώντας τη τιμή της πυκνότητας στοίβαξης.

Επομένως, η δημιουργία ενός ΑΣΣ προϋποθέτει την δημιουργία ενός σκυροδέματος το οποίο θα έχει υψηλές τιμές σωματιδιακής πλήρωσης και πυκνότητας στοίβαξης. Οι δυο παράμετροι αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της ρεολογίας της τσιμεντόπαστας, οι δε τιμές τους εξαρτώνται άμεσα από **το ποσοστό και το είδος των λεπτόκοκκων αδρανών (ultrafine aggregates)**.

Το ζητούμενο είναι η μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς του ΑΣΣ θεωρώντας ότι είναι διφασικό σύστημα με μια φάση από στερεά υλικά και μια υγρή φάση του τσιμέντου και μελετάται **η επίδραση της κοκκομετρίας της στερεής φάσης στο ιξώδες της υγρής**. Στόχος είναι να καθοριστεί ο ρόλος της θιξοτροπίας μέσω πειραματικών προσεγγίσεων με κύριο πεδίο εφαρμογής την κατεργασία του αυτοσυμπυκνούμενου.

Το ρόλο του συνδετικού υλικού στο σκυρόδεμα, διαδραματίζει η τσιμεντόπαστα που με τις ρεολογικές ιδιότητές της καθορίζει τη σχετική κίνηση των χονδρόκοκκων αδρανών μέσα στο μίγμα. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες πάνω στον τρόπο με τον οποίο η προσθήκη εξαιρετικά λεπτόκοκκων αδρανών (ultra-fine aggregates) στο τσιμέντο, μεταβάλλει τις ρεολογικές ιδιότητες της τσιμεντόπαστας.

Στο παρακάτω πειραματικό μέρος ( σελ 94), εξετάζεται η επίδραση μερικών εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών στο ιξώδες της τσιμεντόπαστας. Τα πειραματικά αποτελέσματα συνδέονται με μαθηματικά μοντέλα μηχανικής ρευστών, ώστε να γίνει **πρόβλεψη των ιδιοτήτων του ΑΣΣ** μέσω σύνθεσης πάστας τσιμέντο με διάφορα λεπτόκοκκα Ελληνικής προέλευσης (ασβεστόλιθος, ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη, πυριτική παιπάλη)

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Συμμετείχαν οι :

*Μ. Μπεάζη – Κατσιώτη, Ν. Διαμαντώνης, Α. Σακελλαρίου, Α. Παπαθανασίου, Μ. Κασιώτης, Β. Καλοϊδίας, Ι. Μαρίνος* από τα :

1. Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
2. Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων, Δ.Ε.Η.
3. Ε.Κ.Ε.Τ.
4. Α.Γ.Ε.Τ. Ηρακλής

Σκοπός των πειραμάτων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της εργασίας των ανωτέρω, ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών στο ιξώδες της τσιμεντόπαστας.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές προσφέρθηκαν από την ΑΓΕΤ Ηρακλής και το ΕΚΕΤ, και είναι τα παρακάτω:

- I. Τσιμέντο
- II. Πυριτική παιπάλη
- III. Ασβεστόλιθος
- IV. Ποζολάνη Μήλου
- V. Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης

Ο σχεδιασμός των μιγμάτων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να εντοπιστεί η όποια επίδραση του κάθε υλικού στη ρεολογία της πάστας. Σχεδιάστηκαν διμερή μίγματα στα οποία προστέθηκε μικρό ποσοστό πυριτικής παιπάλης, σχηματίζοντας τα τριμερή μίγματα. Ο αναλυτικός πίνακας με τα μίγματα δίνεται παρακάτω (Πίνακας 11), μαζί με τις μετρήσεις.

Η λογική του σχεδιασμού στηρίχθηκε στη δημιουργία δύο μιγμάτων τσιμέντου με κάθε υλικό, ένα μίγμα χαμηλής περιεκτικότητας στο δεύτερο υλικό και ένα υψηλής. Τα τριμερή μίγματα σχηματίστηκαν με την αντικατάσταση ενός μικρού ποσοστού του δεύτερου υλικού από πυριτική παιπάλη. Επίσης σχεδιάστηκαν και τρία μίγματα, τα οποία περιείχαν τσιμέντο και δύο από τα υλικά ασβεστόλιθο, ποζολάνη και ιπτάμενη τέφρα.

Το ιξώδες της τσιμεντόπαστας μετρήθηκε σε ιξωδόμετρο ομοαξονικών κυλίνδρων. Ο κατασκευαστής του οργάνου είναι ο οίκος Fann και το μοντέλο της συσκευής είναι FANN Model 35 S/A Viscometer. Οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Σκυροδέματος στο Κέντρο Ερευνών Δοκιμών και Προτύπων της ΔΕΗ.

Κάθε μίγμα τοποθετείται στο δοχείο του ιξωδομέτρου, ώστε η απαιτούμενη για τη μέτρηση ποσότητα να διέρχεται ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους. Κατά τη μέτρηση, ο εξωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται με ταχύτητα ελεγχόμενη από το χειριστή προκαλώντας διάτμηση στο μίγμα. Η διάταξη μετρά την αντίσταση που προβάλλει το ρευστό στην κίνηση και η μέτρηση αποδίδεται ως ιξώδες.

Τα στερεά μίγματα παρασκευάστηκαν εφαρμόζοντας λόγο Νερού προς Κονία, όπου Κονία το σύνολο των στερεών υλικών, ίσο με 0,6 κατά βάρος..

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις από τα πειράματα, καταγράφονται στους επόμενους πίνακες και εν συνεχεία παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων.

ΥΛΙΚΟ/ΜΙΓΜΑ	A1	A2	B1	B2	Γ1	Γ2
Τσιμέντο CEM I 42,5	80	60	80	60	80	60
Πυριτική παιπάλη						
Ασβεστόλιθος					20	40
Ποζολάνη Μήλου	20	40				
Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης			20	40		
ΣΤΡΟΦΕΣ/ΛΕΠΤΟ	ΙΞΩΔΕΣ (cP)					
600	127	173	145	258	90	70
300	80	122	88	160	56	46

**Πίνακας 16. Μίγματα A1 – Γ2**

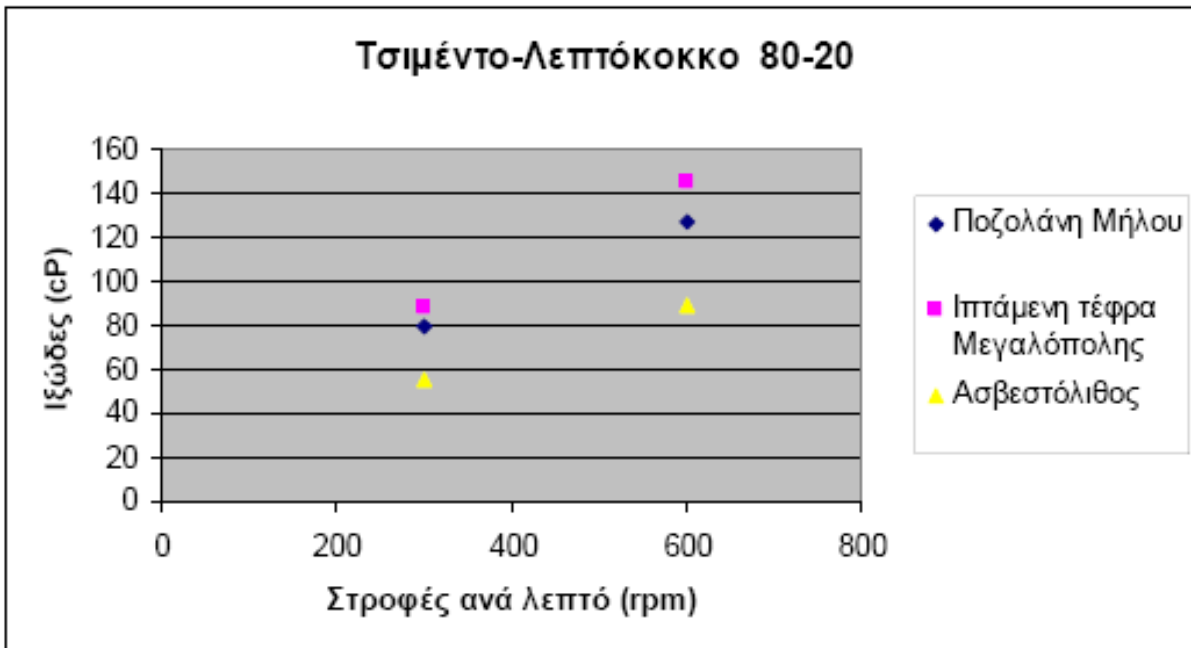
ΥΛΙΚΟ/ΜΙΓΜΑ	Δ1	Δ2	Ε1	Ε2	Z1	Z2
Τσιμέντο CEM I 42,5	80	60	80	60	80	60
Πυριτική παιπάλη	5	5	5	5	5	5
Ασβεστόλιθος					15	35
Ποζολάνη Μήλου	15	35				
Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης			15	35		
ΣΤΡΟΦΕΣ/ΛΕΠΤΟ	ΙΞΩΔΕΣ (cP)					
600	92	183	143	256	86	77,5
300	57	129	90	166	54	50,5
200	42	105	69	126	42	40,5
100	30	77	47	84	30	30
6	12	20	14,5	16,5	11,5	13
3	8,5	15	8,5	11	9	9

**Πίνακας 17. Δείγματα Δ1 - Z2**

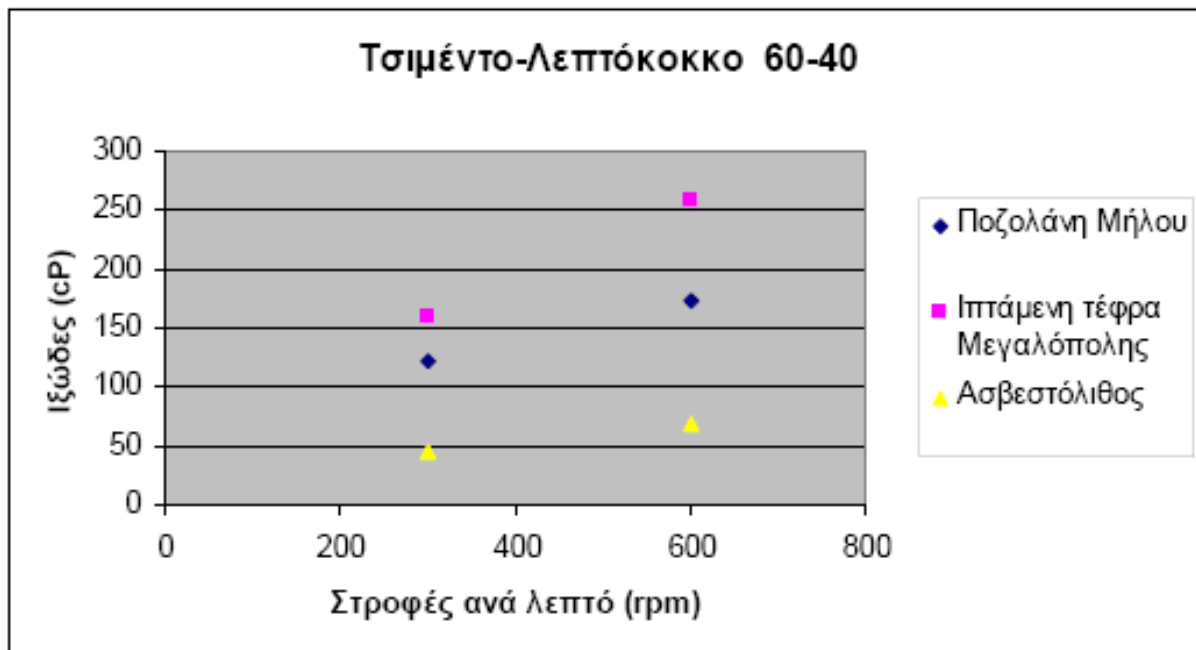
Δείγματα Η, Θ, Ι

ΥΛΙΚΟ/ΜΙΓΜΑ	Η	Θ	Ι
Τσιμέντο CEM I 42,5	60	60	60
Πυριτική παιπάλη			
Ασβεστόλιθος		20	20
Ποζολάνη Μήλου		20	20
Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης		20	20
ΣΤΡΟΦΕΣ/ΛΕΠΤΟ	ΙΞΩΔΕΣ (cP)		
600	112,5	197	123
300	76,5	132	81
200	62	105	64
100	46	74,5	45
6	20	18	17,5
3	11	12	9

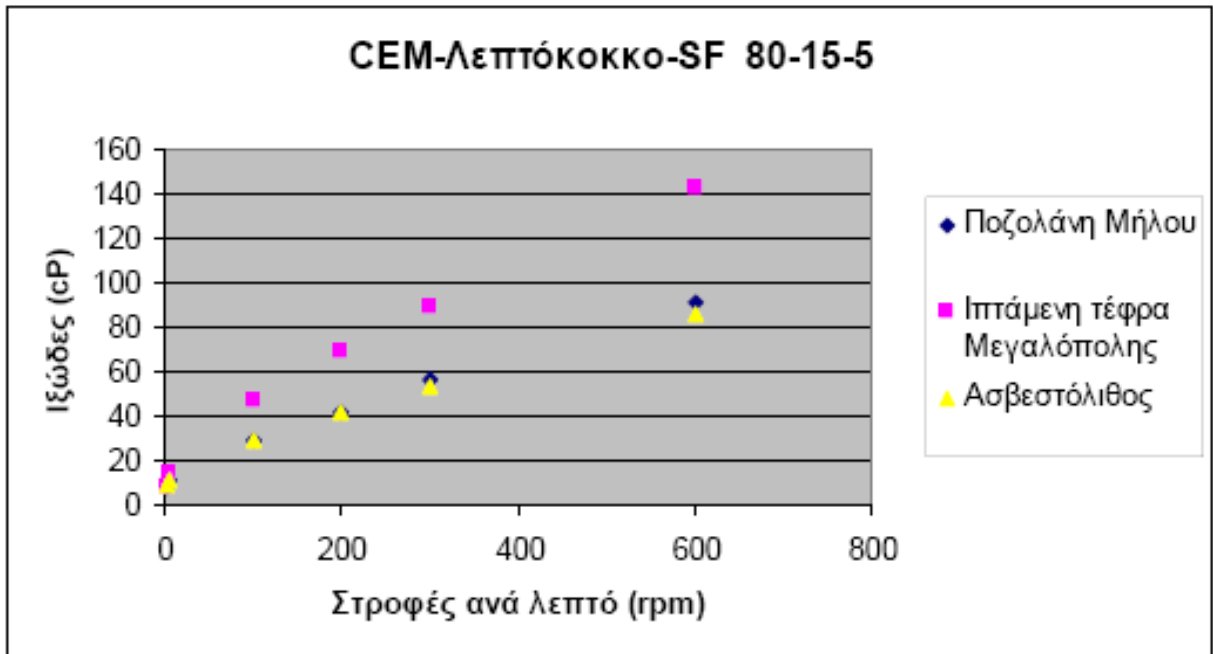
Από την επεξεργασία των μετρήσεων, παρατίθενται τα επόμενα διαγράμματα:



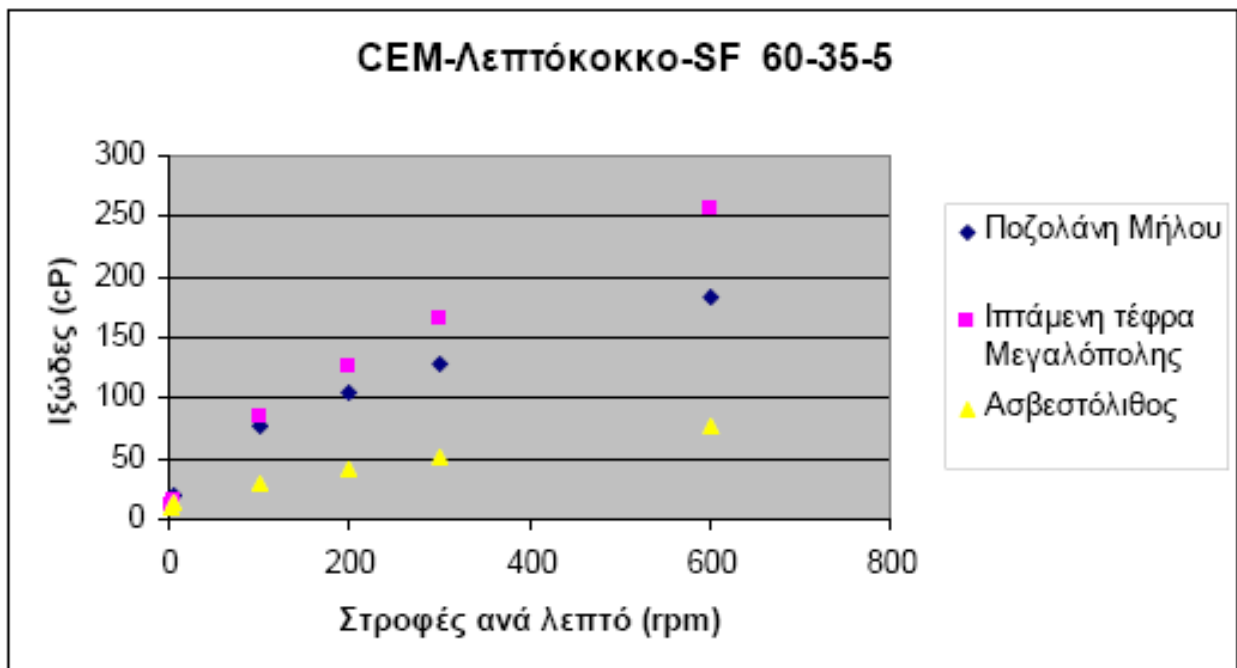
Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και ένα λεπτόκοκκο σε χαμηλή αναλογία (20%).



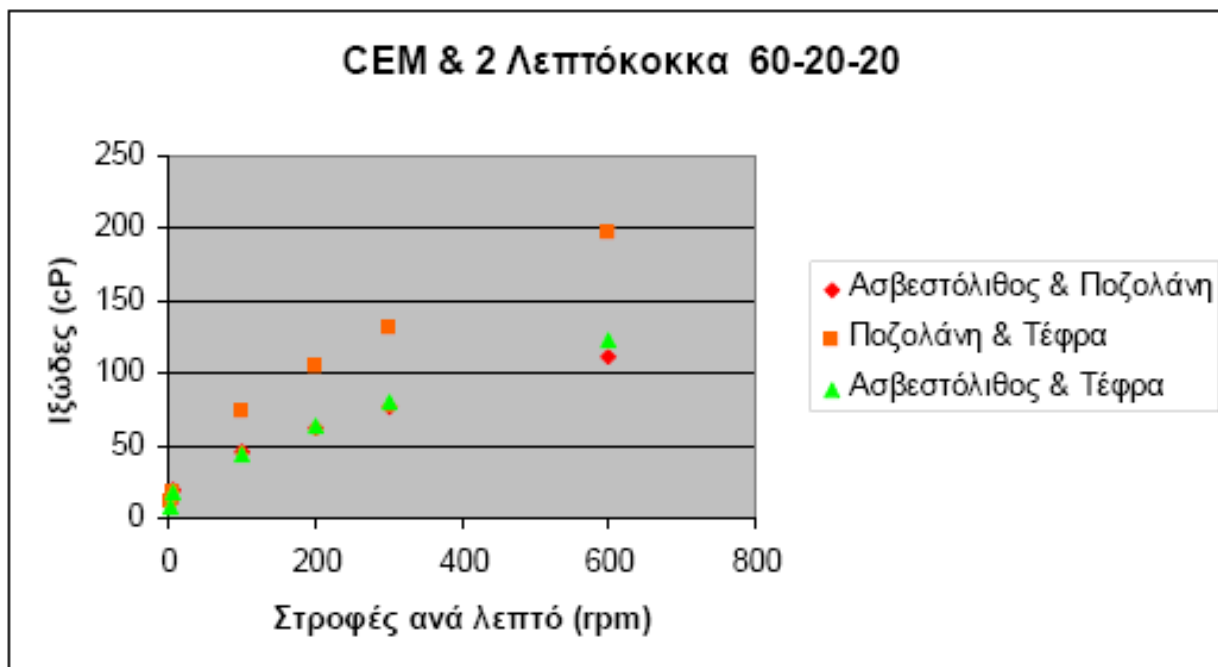
Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και ένα λεπτόκοκκο σε υψηλή αναλογία (40%).



Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο, ένα λεπτόκοκκο σε χαμηλή αναλογία (15%), και 5% πυριτική παιπάλη.



Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο, ένα λεπτόκοκκο σε υψηλή αναλογία (35%), και 5% πυριτική παιπάλη.



Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και δύο λεπτόκοκκα σε ίσες αναλογίες, 20% έκαστο.

#### Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ποζολάνη.

Στα χαμηλής περιεκτικότητας σε ποζολάνη δείγματα A1 και Δ1, η ύπαρξη της πυριτικής παιπάλης έχει θετική επίδραση, μειώνοντας το ιξώδες. Αντίθετα, στα δείγματα υψηλής περιεκτικότητας σε ποζολάνη A2 και Δ2 παρατηρείται ότι η ύπαρξη της πυριτικής παιπάλης επιδρά αρνητικά στο ρευστό, αυξάνοντας την τιμή του ιξώδους.

#### Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ιπτάμενη τέφρα.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη πυριτικής παιπάλης στα μίγματα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, δεν επιδρά στο ιξώδες.

#### Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ασβεστόλιθο.

Στα μίγματα με χαμηλή περιεκτικότητα 20% σε ασβεστόλιθο (Γ1,Z1), η προσθήκη πυριτικής παιπάλης προκαλεί αμελητέα μείωση του ιξώδους.

Στα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο 40% (Γ2,Z2), η προσθήκη πυριτικής παιπάλης προκαλεί αύξηση του ιξώδους κατά 10%.

#### Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Ποζολάνη (Η).

Το ιξώδες του μίγματος λαμβάνει τιμή ενδιάμεση των τιμών ιξώδους των μιγμάτων που έχουν μόνο το ένα από τα δύο λεπτόκοκκα αδρανή, είτε πρόκειται για υψηλή είτε για χαμηλής περιεκτικότητα σε αυτά (Α1,Γ1,Α2,Γ2).

#### Για το μίγμα Τσιμέντο-Ποζολάνη-Τέφρα (Θ).

Συγκριτικά με τα μίγματα που περιέχουν μόνο ποζολάνη από τα λεπτόκοκκα αδρανή (Α1,Α2), το ιξώδες αυτού του μίγματος είναι αρκετά μεγαλύτερο. Όσον αφορά τη συσχέτισή του με τα μίγματα που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα, αξίζει να σημειωθεί ότι το ιξώδες του Θ είναι υψηλότερο από το Β1 (20% τέφρα) και χαμηλότερο από το Β2 (40% τέφρα).

#### Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Τέφρα (Ι).

Το ιξώδες του βρίσκεται μικρότερο σε σχέση με τα μίγματα που περιέχουν μόνο τέφρα (Β1,Β2) και μεγαλύτερο συγκριτικά με τα μίγματα του ασβεστόλιθου (Γ1,Γ2).

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Α. Το ΑΣΣ είναι ένας τύπος σκυροδέματος, όπου μικρή απόκλιση της σύνθεσης του μίγματος προκαλεί απώλεια της ικανότητας της αυτοσυμπύκνωσης.

Β. Στο ΑΣΣ απαιτείται περισσότερη πάστα τσιμέντου και υψηλότερο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών στη πάστα. Το ΑΣΣ είναι ένας αποδέκτης υλικών σε μορφή σκόνης. Η προσθήκη εξαιρετικά λεπτόκοκκων αδρανών στο τσιμέντο επιδρά στο ιξώδες της πάστας. Ο ρόλος του ασβεστόλιθου λόγω κοκκομετρίας και σχήματος κόκκου παρουσιάζει βελτίωση του ιξώδους και είναι το καλύτερο λεπτόκοκκο υλικό.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### 3.1 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ , ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ - ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Το σκυρόδεμα που συντίθεται από υδραυλικά τσιμέντα, λεπτόκοκκα ή/και χονδρόκοκκα αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες ορίζεται ως **ινοπλισμένο σκυρόδεμα**. Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών, και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα του χιλιοστού, και διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του, σε ποσοστό της τάξης του 1-3% κατά όγκο. Συνήθως παρασκευάζονται από χάλυβα, πολυπροπυλένιο ή γυαλί, ενώ εφαρμογές βρίσκουν και ίνες από άλλα υλικά, όπως ο άνθρακας, η αραμίδη, ο πολυεστέρας, το νάιλον, και φυσικά υλικά, όπως το ξύλο. Ο βασικός ρόλος των ινών στο σκυρόδεμα είναι η αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία (που σχετίζεται με εφελκύστηκες τάσεις) και ο περιορισμός γενικά της ρηγμάτωσης (π.χ. λόγω συστολής ξήρανσης), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται και (μικρή συνήθως) αύξηση της αντοχής.



Εικόνα 28. Εξοπλισμός – Γραμμή παραγωγής σκυροδέματος.

Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητας του να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση, που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο.

Τα τελευταία χρόνια οι χρήσεις του ΙΝΟ.Σ. έχουν επεκταθεί σε παρά πολλές κατηγορίες έργων πολιτικού μηχανικού λόγω των βελτιωμένων μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων του σε σύγκριση με το συμβατικό άοπλο σκυρόδεμα.

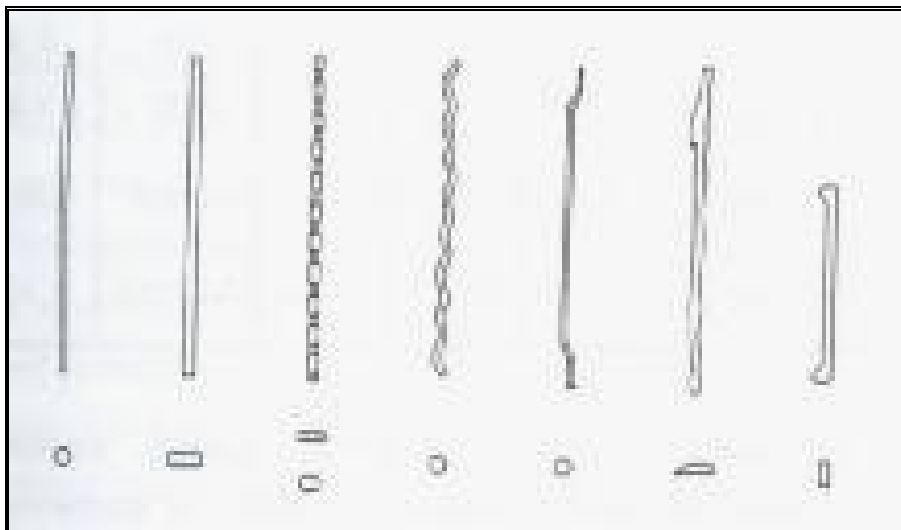
## ΥΛΙΚΑ

### Είδη ινών

Τυπικές ιδιότητες για διάφορες τεχνητές ίνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα δίνονται στον πίνακα 18. Οι πιο διαδεδομένες ίνες σκυροδέματος είναι οι ίνες χάλυβα. Διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία μορφών, όπως αυτές της εικόνα 29 . Αρκετά διαδεδομένες επίσης είναι και οι ίνες πολυπροπυλενίου, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της χημικής τους αδράνειας. Οι ίνες αυτές είναι συνήθως συσσωματωμένες σε ομάδες και όχι μεμονωμένες, για να βελτιώνεται η συνάφεια με το σκυρόδεμα και να διευκολύνεται ο διασκορπισμός τους κατά την ανάμιξη. Προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσότητα που κυμαίνεται μεταξύ  $0,5-2\text{kg/m}^3$ . Οι ίνες γυαλιού E είναι αρκετά διαδεδομένες και είναι χαμηλού κόστους, αλλά βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι προσβάλλονται από το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Περισσότερο ανθεκτικές στο περιβάλλον αυτό είναι οι ίνες γυαλιού AR, που όμως κοστίζουν αρκετά παραπάνω. Το αρκετά υψηλό κόστος των ινών άνθρακα και αραμίδης έχει εμποδίσει μέχρι σήμερα την ευρεία χρήση τους σε κατασκευές σκυροδέματος, παρόλο που η επίδραση τους στο υλικό έχει ιδιαίτερα ευνοϊκά αποτελέσματα (ιδιαίτερα των ινών άνθρακα).

Επιθυμητά χαρακτηριστικά των ινών για τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος είναι: μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, που επιτρέπει μεταφορά τάσεων από το σκυρόδεμα στις ίνες, λόγος Poisson παρόμοιος με αυτόν του σκυροδέματος, ώστε να μην προκαλείται αποκόλληση των ινών, μεγάλος λόγος μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ), ώστε η αστοχία των ινών να γίνεται με εξολκευση και όχι

με θραύση, και να αυξάνεται το έργο παραμόρφωσης και όσο το δυνατόν πιο παραμορφωμένη επιφάνεια, ώστε να βελτιώνεται η συνάφεια τους με το σκυρόδεμα και να αυξάνεται το φορτίο που απαιτείται για την αποκόλληση και εξολκευση τους.



Εικόνα 29. τυπικές μορφές ινών χάλυβα

Ινες	Διαμέτρος (μm)	Μήκος (mm)	Πυκνότητα (Kg/m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Μετρ. Ελαστικ. (GPa)	Λόγος Poisson	Εφέλκ. αντοχή (MPa)	Παραμόρφ. θραύσης (%)	Τυπική αναλογία (% κ.ο)
Χάλυβας	100-600	10-60	7,86	200	0,28	700-2000	3,5	0,5-2
Ανοξ. Χαλ	10-330	10-60	7,86	160	0,28	2100	3	0,5-2
Πολυπροπυλένιο	500-4000	15-75	0,90	3-8	0,30-0,45	400-700	8-25	0,2-1,2
Γυαλί Ε	8-12	10-50	2,54	72-75	0,25	3500	4,8	2-8
Γυαλί AR	8-12	10-50	2,27	70-76	0,25	2000-3500	3-4,6	2-8
Κέβλαρ 29	10	5-65	1,44	70	0,32	2900	2,1	0,5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1,45	135	0,35	2900	2,1	0,5-2
Ανθρακας								
υψηλού Ε	8	10-50	1,90	380	0,35	1800	0,5	2-12
υψηλής f <sub>t</sub>	9	10-50	1,90	230	0,35	2600	1,2	2-12
νάυλον	5-200	5-50	1,14	1-5	0,40	750-900	16-20	0,1-6
ξύλο	100-5000	5-50	1,50	50-75	0,2-0,4	700-1000	1-2	2-4

Πίνακας 18.Τυπικές ιδιότητες ινών.

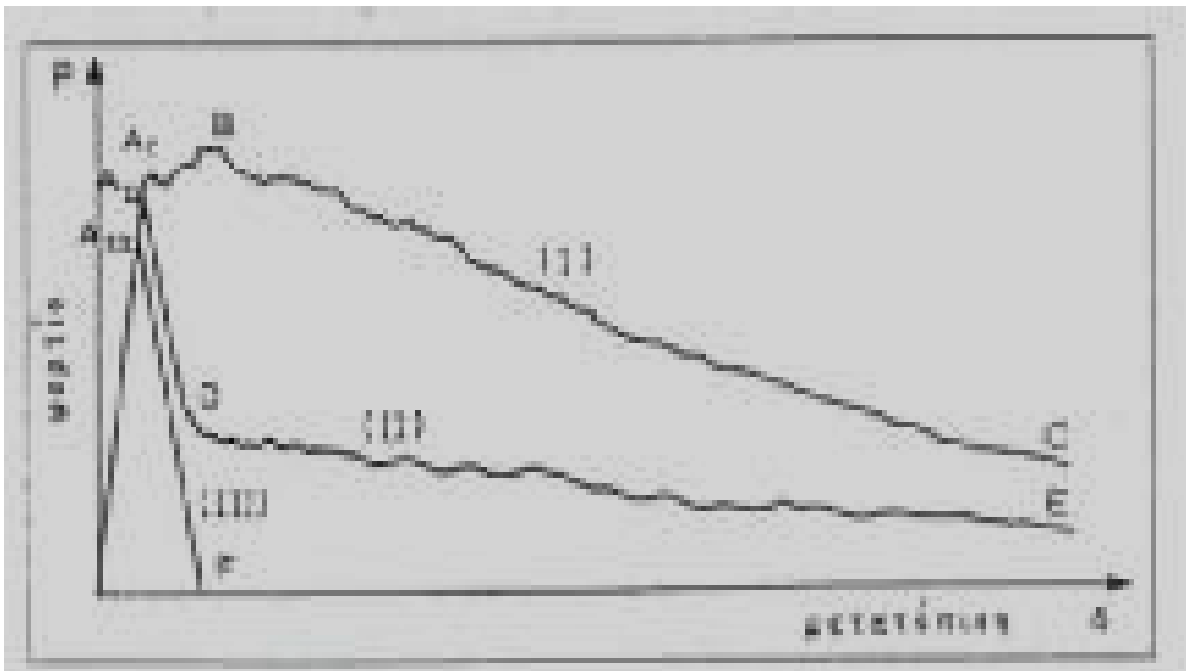
## Μηχανικά χαρακτηριστικά ΙΝΟ.Σ.

Η αποτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΙΝΟ.Σ. γίνεται με τη βοήθεια του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης πρότυπου δοκιμίου υπό κάμψη. Στην εικόνα 30 φαίνονται δυο πιθανά διαγράμματα απόκρισης ΙΝΟ.Σ. , ενώ το τρίτο διάγραμμα αναφέρεται στην απόκριση αντιστοίχου δοκιμίου άοπλου σκυροδέματος της ίδιας σύνθεσης. Και τα τρία διαγράμματα διαθέτουν έναν περίπου ελαστικό κλάδο, καθώς η δυσκαμψία του δοκιμίου ελάχιστα επηρεάζεται από τις ίνες. Το τέλος του ελαστικού κλάδου (σημείο Α) ορίζει την αντοχή πρώτου ρήγματος  $f_{ct}$  ,το μέγεθος της οποίας διαμορφώνεται κυρίως από τις ιδιότητες του σκυροδέματος (περιεκτικότητα σε τσιμέντο, διαβάθμιση αδρανών, συντελεστής ύδατος - τσιμέντου, περιεκτικότητα αέρα, πυκνότητα κ.λ.π.) και δευτερευόντως από την ποσότητα των ινών. Υψηλά ποσοστά ινών αυξάνουν το όριο αναλογίας, υπο την προϋπόθεση της καλής διαβάθμισης των αδρανών και της επαρκούς συμπύκνωσης του μείγματος. Η αύξηση, όμως αυτή δεν είναι τόσο σημαντική ώστε να δικαιολογεί τη δαπάνη της χρήσης ινών.

Μετά το πρώτο ρήγμα, το ΙΝΟ.Σ. με υψηλό ποσοστό ινών (I) παρουσιάζει μικρή βελτίωση αντοχής μέχρι το σημείο Β που ορίζει την οριακή αντοχή του. Αντίθετα, το δοκίμιο (II) με χαμηλό ποσοστό ινών καθώς και το δοκίμιο (III) του άοπλου σκυροδέματος δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη βελτίωση αντοχής, η οριακή δηλαδή αντοχή τους συμπίπτει με την αντοχή του πρώτου ρήγματος. για μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζεται πτώση του αναλαμβανόμενου φορτίου, διαφορετικής όμως ταχύτητας για κάθε δοκίμιο. Στο δοκίμιο (I) η πτώση είναι ομαλή και οδηγεί σε πλαστικού τύπου αστοχία (κλάδος Β-С), στο δοκίμιο (III) είναι απότομη και οδηγεί σε ψαθυρού τύπου αστοχία (κλάδος AIII-F), ενώ στο δοκίμιο (II) είναι ενδιάμεσου τύπου, καθώς μεσολαβεί ένα πτωτικό άλμα (κλάδος AII-D) και κατόπιν εξελίσσεται ομαλά (κλάδος D-E) υπό μικρότερο, όμως, φορτίο έναντι του δοκιμίου (I). Αντίθετα από το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα, η αστοχία προκαλείται κατά κανόνα από την εξολκευση και όχι από τη διαρροή των ινών, η τάση των οποίων υπό το μέγιστο φορτίο είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από την τάση διαρροής τους. Ενώ, όμως, τις περισσότερες φορές η εξολκευση είναι φαινόμενο ψαθυρού χαρακτήρα, η συνεχής άνοδος του ρήγματος σε καμπτόμενα στοιχεία και η συνακόλουθη ενεργοποίηση και εξολκευση νέων ινών οδηγούν σε σταδιακή (και όχι απότομη) πτώση αντοχής με την αύξηση των μετατοπίσεων, φαινόμενο δηλαδή που εμπεριέχει πλαστικά

χαρακτηρίστηκα. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνήθως αποτιμώνται ποσοτικά με την ενέργεια που απορροφάται μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή μετατόπισης, δηλαδή με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μέχρι την υπόψη μετατόπιση. Πειραματικά στοιχεία αποδεικνύουν ότι η ενέργεια που απορροφάται μέχρι την πλήρη αποδιοργάνωση του δοκιμίου είναι 10-40 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του άοπλου δοκιμίου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η ιδιότητα αυτή του ΙΝΟ.Σ. να απορροφά σημαντική ενέργεια αποτελεί τον κύριο λόγο ανάπτυξης και χρήσης του ΙΝΟ.Σ. σε περιπτώσεις όπου το άοπλο σκυρόδεμα θεωρείται ανεπαρκές λόγω αδυναμίας να προσφέρει έστω και στοιχειώδη πλαστιμότητα, ενώ το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα, που διαθέτει βέβαια επαρκή πλαστιμότητα, είναι δύσκολο ή δαπανηρό να εφαρμοστεί.

Συμπερασματικά λοιπόν, για δεδομένη σύνθεση σκυροδέματος, η μορφή αστοχίας εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό, τη γεωμετρία, την κατανομή και τις συνθήκες συνάφειας των ινών με το σκυρόδεμα. Οι τελευταίες εξαρτώνται τόσο από τη μορφή των ινών (κυρίως από τη διαμόρφωση των άκρων τους αλλά και από το λόγο μορφής, δηλαδή το λόγο μήκους προς διάμετρο ίνας) όσο και από τη σύνθεση του σκυροδέματος. Εξαιτίας των πολλών παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα είναι φανερό ότι είναι δύσκολη η θεωρητική προσέγγιση πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ΙΝΟ.Σ. Για το λόγο αυτό προς το παρόν χρησιμοποιούνται θεωρητικά προσομοιώματα τόσο από τη μηχανική των θραύσεων όσο και από τη θεωρία των σύνθετων υλικών, υποβοηθούμενα όμως απαραίτητα από πειραματικά στοιχεία.



Εικόνα 30. Σημαντικά χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίου- μετατόπισης υπό κάμψη κατά το πρότυπο ASTM C 1018-89

#### Δείκτες μηχανικής συμπεριφοράς

Όπως προαναφέρθηκε, το πλέον χαρακτηριστικό μέγεθος προς αποτίμηση είναι η ενέργεια που απορροφάται κατά την κάμψη ενός δομικού στοιχείου μέχρι μια συγκεκριμένη μετατόπιση. Ενδιαφέρουσες επίσης, άλλα δευτερεύουσας σημασίας είναι η αντοχή πρώτου ρήγματος και η οριακή αντοχή σε κάμψη. Για τις ανάγκες της προτυποποίησης των απαιτήσεων θεσπίστηκαν διάφοροι δείκτες μηχανικής συμπεριφοράς, οι συνηθέστεροι από τους οποίους σχολιάζονται παρακάτω.

#### Αμερικανικά πρότυπα

Από ιστορική άποψη, ο πρώτος δείκτης ενεργειακής συμπεριφοράς προτάθηκε από τον Henegar. Ο δείκτης αυτός, που υιοθετήθηκε από την επιτροπή ACI 544 και αναφέρεται σε πρότυπα δοκίμια δοκού, ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφάται για μετατόπιση 1,9mm(0.075in) προς την ενέργεια που

αντιστοιχεί στο πρώτο ρήγμα. Στην πρόταση αυτή μπορούν να εντοπιστούν δυο αδύνατα σημεία:

α) Ο δείκτης είναι σχετικά ευαίσθητος ιδίως ως προς τον παρανομαστή του, επειδή από πειραματική άποψη υπάρχει αντικειμενική δυσκολία ακριβούς καθορισμού του σημείου ρηγμάτωσης. Η αδυναμία αυτή αναφέρεται τόσο στο μέγεθος του φορτίου ρηγμάτωσης, που δεν συμπίπτει πάντα με το οριακό φορτίο, όσο και στην ακρίβεια των οργάνων μέτρησης της αντίστοιχης μετατόπισης, που είναι της τάξης μερικών εκατοστών το χιλιοστού.

β) Το όριο μετατόπισης των 1,9mm είναι αυθαίρετο και σχετικά μεγάλο, 30 φορές περίπου μεγαλύτερο από τη μετατόπιση ρηγμάτωσης. Στην πραγματικότητα, το όριο μετατόπισης δεν πρέπει να είναι σταθερό, αλλά να καθορίζεται με βάση τις απαιτήσεις λειτουργικότητας κάθε έργου.

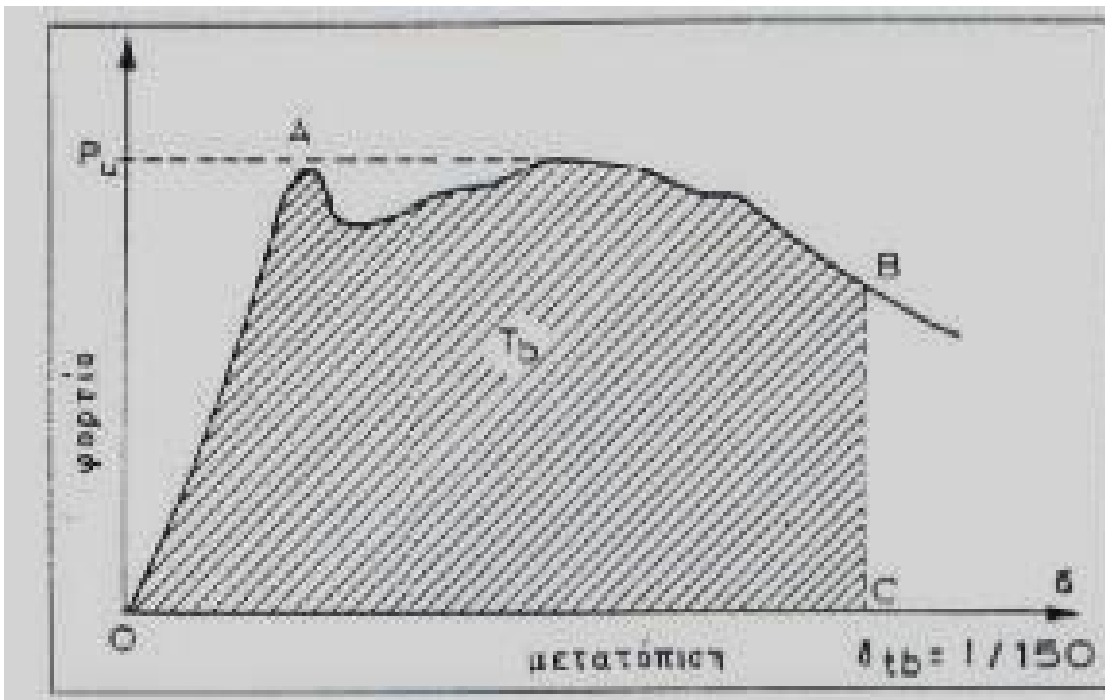
Βελτίωση του παραπάνω δείκτη αποτελεί η πρόταση του πρότυπου ASTM C 1018- 89. Στην πρόταση αυτή περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής δοκιμίων, καθορίζεται η γεωμετρία τους, η ταχύτητα φόρτισης και ο μετρητικός εξοπλισμός, παρέχονται οδηγίες για τον προσδιορισμό του σημείου ρηγμάτωσης και ορίζονται διάφοροι δείκτες για την αξιολόγηση της απόκρισης του δοκιμίου.

#### Ιαπωνικό πρότυπο

Το πρότυπο JCI-SF4 καθορίζει δυο δείκτες συμπεριφοράς:

α) Την οριακή αντοχή  $f_u$  (και όχι την αντοχή πρώτου ρήγματος) που ορίζεται ως η ορθή τάση υπό το μέγιστο φορτίο  $P_u$ .

β) Την ισοδύναμη τάση  $f_s$  (equivalent flexural strength) που ορίζεται ως η τάση υπό το μέσο φορτίο έως μετατόπιση ίση προς το 1/150 του ανοίγματος  $l$  της δοκού (εικόνα 31).



Εικόνα 31. Ορισμός δεικτών σύμφωνα με τον κανονισμό JCI-SF4

Είναι φανερό ότι το ιαπωνικό πρότυπο είναι απαλλαγμένο από τις επιπτώσεις της ανακρίβειας των μετρήσεων στις πολύ μικρές μετατοπίσεις, έχει όμως το μειονέκτημα ότι η ισοδύναμη τάση αναφέρεται σε πολύ μεγάλη μετατόπιση, π.χ. για τυπικές δοκούς ανοίγματος  $l=450\text{mm}$  η οριακή μετατόπιση είναι  $3\text{mm}$ . Κατά συνέπεια δεν είναι σε θέση να περιγράψει απαιτήσεις λειτουργικότητας που αντιστοιχούν σε μικρές μετατοπίσεις.

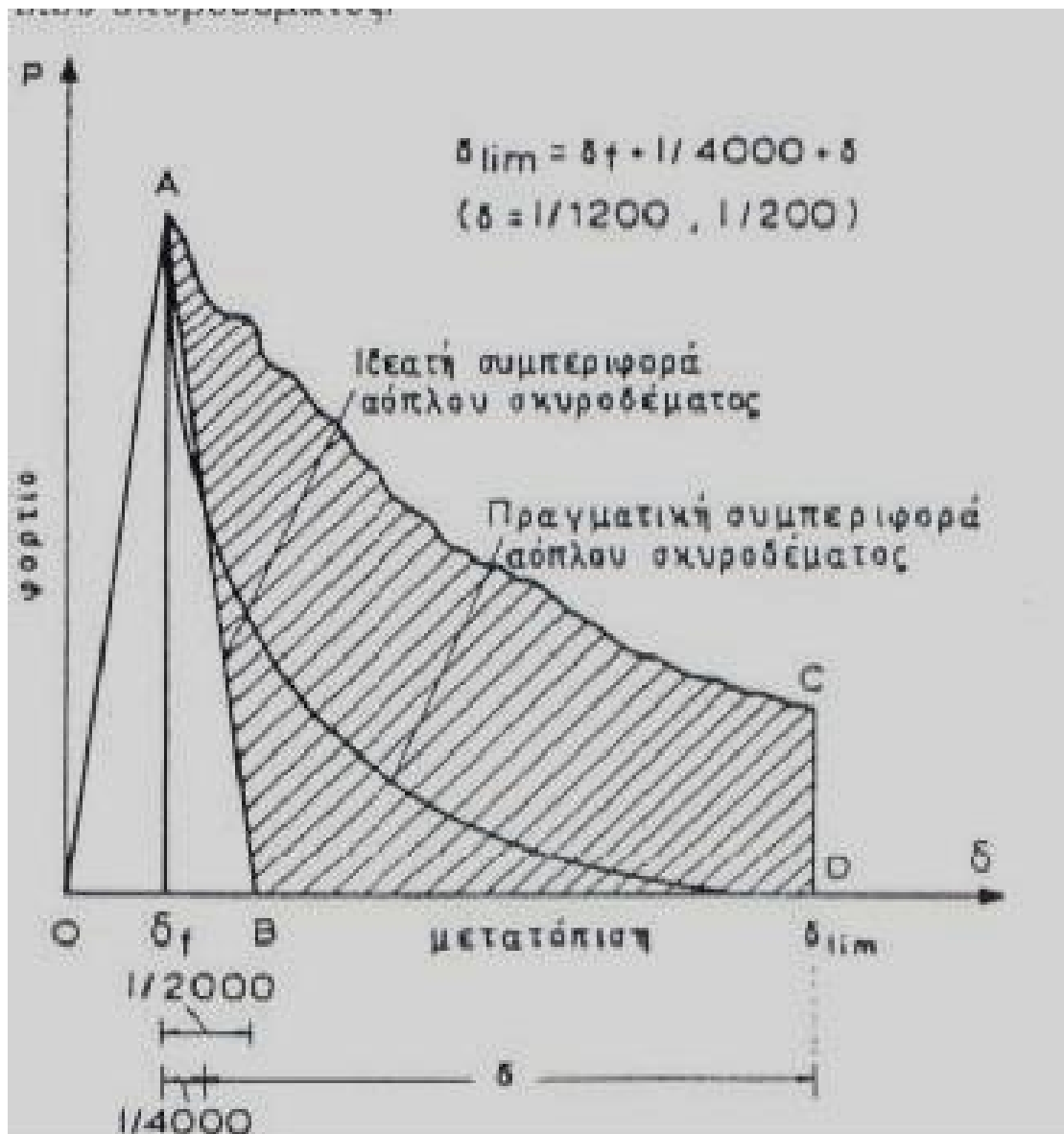
#### Γερμανικό πρότυπο

Το γερμανικό πρότυπο, όπως εξάλλου και άλλα ευρωπαϊκά πρότυπα, καθορίζει με περισσότερο αντικειμενικό τρόπο το φορτίο και τη μετατόπιση πρώτου ρήγματος. Επιπλέον, προτείνει έναν ενδιαφέροντα δείκτη, ο οποίος προσπαθεί να αντικατοπτρίσει κυρίως τη πρόσφορα των ινών στην απορρόφηση ενέργειας μετά το πρώτο ρήγμα. Η ισοδύναμη τάση υπολογίζεται όπως και στο ιαπωνικό πρότυπο, αφού όμως πρώτα έχει εξαιρεθεί η ενέργεια του αντιστοίχου άοπλου σκυροδέματος.

Έτσι υπολογίζεται ενέργεια OACD που απορροφάται από το δοκίμιο μέχρι μια ορισμένη μετατόπιση  $\delta_{lim}$  και κατόπιν αφαιρείται η ενέργεια OAB του αντιστοίχου δοκιμίου από άοπλο σκυρόδεμα που, κατά παραδοχή, συμπεριφέρεται ως διγραμμικό υλικό με φθίνοντα κλάδο. Κατόπιν, υπολογίζεται το ισοδύναμο φορτίο  $P_{eq}$



= (εμβ.ΒΑCD/δ) και η αντίστοιχη ισοδύναμη τάση. Με το τρόπο αυτό εξουδετερώνεται ο βαρύνων της μετατόπισης ρηγμάτωσης στον ορισμό διάφορων δεικτών, δεν απαιτείται η κατασκευή προσθέτων δοκιμίων άοπλου σκυροδέματος και επιπλέον με κατάλληλη επιλογή της μετατόπισης δ μπορεί κανείς να επικεντρώσει το ενδιαφέρον του σε συγκεκριμένα όρια λειτουργικότητας.



Εικόνα 32. Απορρόφηση ενέργειας κατά το γερμανικό πρότυπο

Ενώ οι παραπάνω δείκτες ορίζουν ως πρότυπα δοκίμια τα δοκίμια δοκών, η πρόταση της EFNARC ορίζει δοκίμια πλακών με το σκεπτικό ότι οι κύριες εφαρμογές του ΙΝΟ.Σ. αναφέρονται σε επιφανειακά στοιχεία και κατά μία συνέπεια είναι ορθότερο να αποτιμώνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους σε αντίστοιχα δοκίμια.

Επιπλέον, οι ίνες συνεισφέρουν σε τουλάχιστον δυο διευθύνσεις, ενώ τα δοκίμια δοκών λαμβάνουν υπόψη τη λειτουργία κατά μία μόνο διεύθυνση. Σημαντικό είναι επίσης, το γεγονός ότι μειώνεται η συμμετοχή του ανοίγματος διάτμησης. Τα δοκίμια που ορίζονται είναι πλάκες επιφάνειας 0,60x0,60m και πάχους 0,10m που εδράζονται περιμετρικά σε ελευθέρως στρεπτές στηρίξεις ανοίγματος 0,50m και φορτίζονται με φορτίο στο μέσον τους, κατανεμημένο σε επιφάνεια 0,10x0,10m. Η αποτίμηση των δοκιμών γίνεται με τον υπολογισμό της ενέργειας που αντιστοιχεί σε μετατόπιση του μέσου ίση προς 25mm, δηλαδή ίση προς το 1/20 του ανοίγματος λ της πλάκας.

#### *Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών*

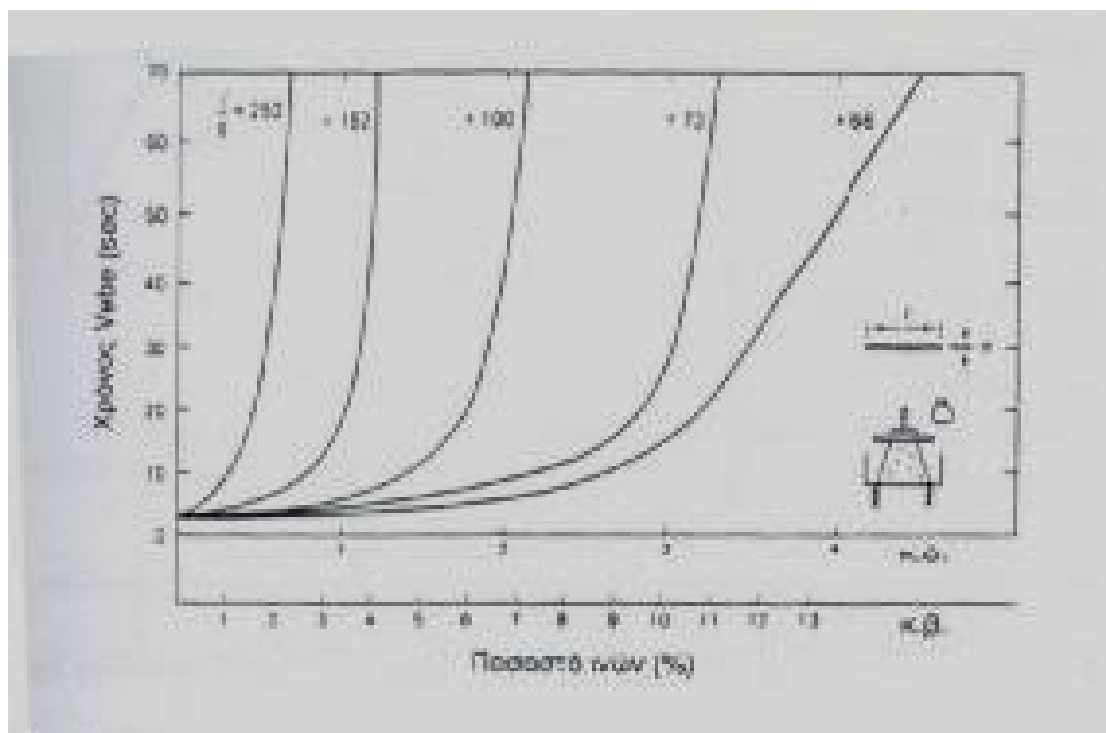
Από την παρουσίαση και το σχολιασμό των κυριότερων δεικτών της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- α) Οι μέχρι σήμερα προταθέντες δείκτες δεν έχουν κοινή βάση, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μη συγκρίσιμα συμπεράσματα ως προς τη συμπεριφορά του ΙΝΟ.Σ.
- β) Οι δείκτες, που χρησιμοποιούν ως βασική παράμετρο τη μετατόπιση πρώτου ρήγματος, έχουν σημαντική πιθανότητα ανακρίβειών, ιδιαίτερα μάλιστα όταν για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται συγχρόνως μικρή σχετικά τιμή της οριακής μετατόπισης.
- γ) Η χρήση δοκιμών πλακών έναντι των δοκιμών δοκών φαίνεται ότι είναι περισσότερο ρεαλιστική για τις συνήθεις εφαρμογές της πράξης.
- δ) Ανεξάρτητα από τον υπό προσδιορισμό δείκτη, κυρίως όμως για τον προσδιορισμό δεικτών με βασική παράμετρο τη μετατόπιση πρώτου ρήγματος, απαιτείται συγχρόνως εξοπλισμός υψηλής ακρίβειας μετρήσεων για μεγάλο φάσμα μετατοπίσεων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη συνεκτίμηση της ενδοτικότητας των στηρίξεων που μερικές φορές είναι σχετικά σημαντική.

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Σύνθεση ΙΝΟ.Σ

Η χρήση ινών στο σκυρόδεμα επιφέρει γενικά μείωση της εργασιμότητας, που είναι ανάλογη του ποσοστού ινών. Η σημαντική μείωση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος, ακόμα και για μικρά ποσοστά ινών, είναι χαρακτηριστική, αρκεί να αναφερθεί ότι ποσοστό ινών χάλυβα η γυαλιού γύρω στο 1,5% κ.ο. μπορεί να μειώσει την κάθιση από 200mm σε 25mm, χωρίς όμως να μειώνεται αναλογικά και η ευκολία διασταύρωσης η συμπύκνωσης. Γι αυτό η δόκιμη κάθισης θεωρείται ακατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος, ενώ πιο κατάλληλη θεωρείται η δόκιμη Vebe. Η επίδραση του λόγου ( $l/d$ ) και του ποσοστού ινών χάλυβα στο χρόνο Vebe δίνεται στην εικόνα 33.



Εικόνα 33. Επίδραση ποσοστού ινών και λόγου μήκους προς διάμετρο στο χρόνο Vebe

Είναι σαφές ότι αύξηση των παραμέτρων αυτών έχει δυσμενή αποτελέσματα για την εργασιμότητα, ενώ όπως προαναφέρθηκε βελτιώνει τη μηχανική συμπεριφορά. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι, τουλάχιστον για ίνες χάλυβα, λόγοι ( $l/d$ ) πάνω από 100 προκαλούν αλληλεμπλοκές ινών και συσσωματώσεις που επιφέρουν ανομοιογένεια στη μάζα του σκυροδέματος, γι' αυτό και πρέπει να αποφεύγονται. Γενικά ο λόγος ( $l/d=100$ ) καθώς και το ποσοστό ινών 2% κ.ο. θεωρούνται άνω όρια για τις ίνες χάλυβα.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του ΙΝΟ.Σ. είναι η αύξηση του μέγιστου κόκκου αδρανών, που δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20mm. Τέλος, οι απαιτήσεις για καλή εργασιμότητα περιλαμβάνουν τη χρήση προσθέτων (π.χ. αερακτικά, ρευστοποιητικά), την αύξηση της ποσότητας τσιμεντοπολτού και τη χρήση ινών που είναι κολλημένες μεταξύ τους (ανά ομάδες των 10-30) με υδατοδιαλυτή κολλά. Ο πίνακας 19 δίνει το εύρος τυπικών αναλογιών σύνθεσης ινοπλισμένου σκυροδέματος, βάσει των Αμερικανικών Προδιαγραφών (ACI 544.1R-82). Για σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα δίνεται ο πίνακας 20, που δείχνει ότι για δεδομένο λόγο N/T η απαιτούμενη ποσότητα τσιμεντοπολτού είναι μεγαλύτερη στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο. Γενικά, σε σύγκριση με το άοπλο, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει περισσότερο τσιμέντο, μεγαλύτερο ποσοστό λεπτών αδρανών και χονδρά αδρανή με μικρότερο κόκκο. Για κάθε τύπο ινών η βέλτιστη σύνθεση προσδιορίζεται με διαδοχικές δοκιμές, φροντίζοντας να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής, εργασιμότητα και ανθεκτικότητας σε διάρκεια.

	Μέγιστος κόκκος 10mm	Μέγιστος κόκκος 20 mm
τσιμέντο(kgr/m <sup>3</sup> )	350-580	290-500
Λόγος N/T	0,35-0,45	0,40-0,50
% Λόγος προς χονδρά αδρανή	45-60	45-55
Εγκλωβισμένος αέρας (%)	4-7	4-6
ποσοστό ινών (%)		
παραμορφ. ίνες χάλυβα	0,4-0,9	0,3-0,8
λείες ίνες χάλυβα	0,9-1,8	0,8-1,6
ίνες γυαλιού	0,3-1,2	

Πίνακας 19. Ενδεικτικές αναλογίες σύνθεσης χαλυβο-ινοπλισμένου σκυροδέματος

Υλικό	άοπλο σκυρ.	ινοπλ. σκυρ
τσιμέντο	440	510
νερό(N/T=0.45)	200	230
λεπτά αδρανή	850	750
χονδρά αδρανή	670	600
ίνες χάλυβα 2% κ.ο		150

Πίνακας 20. Συγκριτική σύνθεση ινοπλισμένου και άοπλου σκυροδέματος ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

## Δοκιμή Vebe

### ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΘΙΣΗΣ

Από τον κ. Θ. Γ. Βουδικλάρη, Πολιτικό Μηχανικό

1. Για την εκτέλεση της δοκιμής κάθισης σκυροδέματος, ισχύουν οι διατάξεις του άρθρου 8.6 του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.) και η Μέθοδος Ελέγχου ΣΚ-309 του ΥΠΕΧΩΔΕ. Υπομνηστική παράθεση των κυριότερων διατάξεων περιλαμβάνεται στα επόμενα.

2. Για τη μέτρηση της καθίσης χρησιμοποιούνται:

α) Ο κώνος κάθισης, ήτοι μεταλλική μήτρα σχήματος ορθού κόλουρου κώνου, με διάμετρο κάτω βάσεως  $200 \pm 2$  mm, διάμετρο άνω βάσεως  $100 \pm 2$  mm, ύψος  $300 \pm 2$  mm (ήτοι περιεκτικότητα  $0,0055 \text{ m}^3$  ή 5,5 κυβ. παλάμες). Οι δύο βάσεις είναι ανοικτές, παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στον άξονα του κώνου. Η μήτρα έχει στην εξωτερική της επιφάνεια δύο χειρολαβές, προσαρμοσμένες στα δύο τρίτα του ύψους της από την κάτω βάση και δύο αντιδιαμετρικά εξωτερικά πτερύγια στηρίξεως, στο επίπεδο της κάτω βάσεως, για την ακινητοποίηση της. Το μέταλλο κατασκευής της πρέπει να είναι απρόσβλητο από το σκυροδέμα, η εσωτερική της επιφάνεια να είναι λεία, χωρίς ανωμαλίες, και το πάχος του τοιχώματος να είναι τουλάχιστον 1,5 mm.

β) Η χαλύβδινη ράβδος συμπυκνώσεως, ευθύγραμμη, μήκους 60 cm, κυκλικής διατομής Φ16 mm, με στρογγυλεμένα άκρα.

3. Η μέθοδος εφαρμόζεται για σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανούς 40 mm. Η κάθιση θα μετρείται πριν από τη διάστρωση του σκυροδέματος, σε δείγμα που θα λαμβάνεται μετά την αποφόρτωση του ενός τρίτου περιπτώ του αναμίγματος ή του ενός τρίτου του φορτίου αυτοκινήτου, αν πρόκειται για έτοιμο σκυρόδεμα (εργοστασιακό ή εργοταξιακό), ώστε το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Η τιμή της καθίσεως θα προκύπτει ως μέσος όρος των μετρήσεων δύο δοκιμών, που θα γίνονται στο ίδιο δείγμα, εντός συνολικού χρόνου 15 λεπτών.

4. Ο κώνος καθίσεως τοποθετείται πάνω σε επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια και διαβρέχεται εσωτερικά, αυτός και η επιφάνεια έδρασης.

5. Ο κώνος γεμίζεται με τη σέσουλα (όχι μυστρί) σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους, με σκυρόδεμα από το δείγμα που έχει ληφθεί σύμφωνα με την Προδιαγραφή ΣΚ-350. Ο κώνος διατηρείται ακίνητος καθ' όλη τη διάρκεια του γεμίσματος, με τη βοήθεια των δύο πτερυγίων στηρίξεως, πάνω στα οποία πατάει με το πόδια του ο παρασκευαστής.

6. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως, που κατανέμονται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα κτυπήματα ξεκινούν από την περίμετρο της μήτρας και με σπειροειδή κίνηση φθάνουν στο κέντρο. Κατά την συμπύκνωση της κατώτερης (πρώτης) στρώσης, η ράβδος βυθίζεται σε όλο το βάθος του σκυροδέματος και, κατά την εμπηξή της, έχει στην αρχή μια μικρή κλίση που βαθμιαία ελαττώνεται, τείνοντας προς την κατακόρυφο. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση η ράβδος βυθίζεται σε όλη τη στρώση, εισερχόμενη λίγο (περίπου 1 - 2 cm) και στην αμέσως από κάτω της, Στην ανώτερη (τρίτη) στρώση ο κώνος γεμίζεται με περίσσεια σκυροδέματος, που συμπληρώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης.

Ειδικά για το ύφυγρο σκυρόδεμα της κατηγορίας κάθισης S1 (1 ως 4 cm), η συμπύκνωση γίνεται με δονητή ή δονητική πλάκα και όχι με τη ράβδο.

7. Ύστερα από τη συμπύκνωση και της ανώτερης στρώσης, αφαιρείται το σκυρόδεμα που πλεονάζει και επιπεδώνεται η άνω επιφάνεια του, με παλινδρομική κύλιση της ράβδου συμπυκνώσεως στα χείλη του κώνου.

8. Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθαρίζεται η περιοχή γύρω από τη βάση του και ο κώνος ανασύρεται αργά, από τις πλευρικές χειρολαβές. Η ανάσχυση πρέπει να γίνεται ομαλά, με σταθερή ταχύτητα

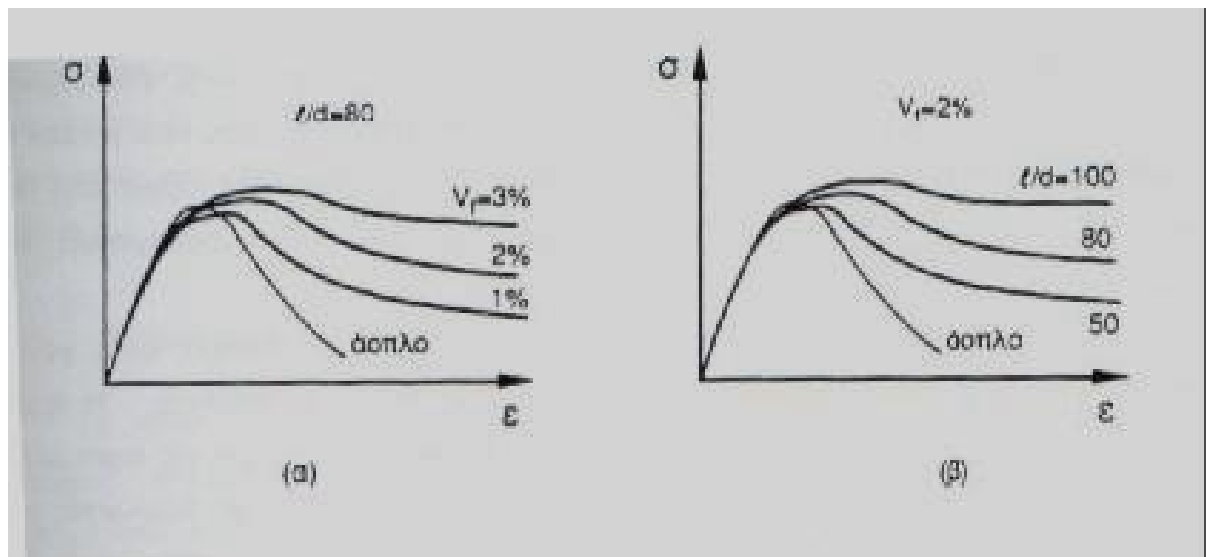
και κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, χωρίς στροφή και τραντάγματα, και να ολοκληρώνεται μέσα σε 5 -10 sec (ο παρασκευαστής μετράει αργά από το 1001 έως το 1005). Ολόκληρη η διαδικασία της δοκιμής από την έναρξη του γεμίματος μέχρι την αφαίρεση του κώνου πρέπει να ολοκληρώνεται σε χρόνο μικρότερο των 150 sec.

9. Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, που ελευθερούμενο από το μεταλλικό περίβλημα "κάθισε", μετριέται με προσέγγιση 5 mm , εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται.

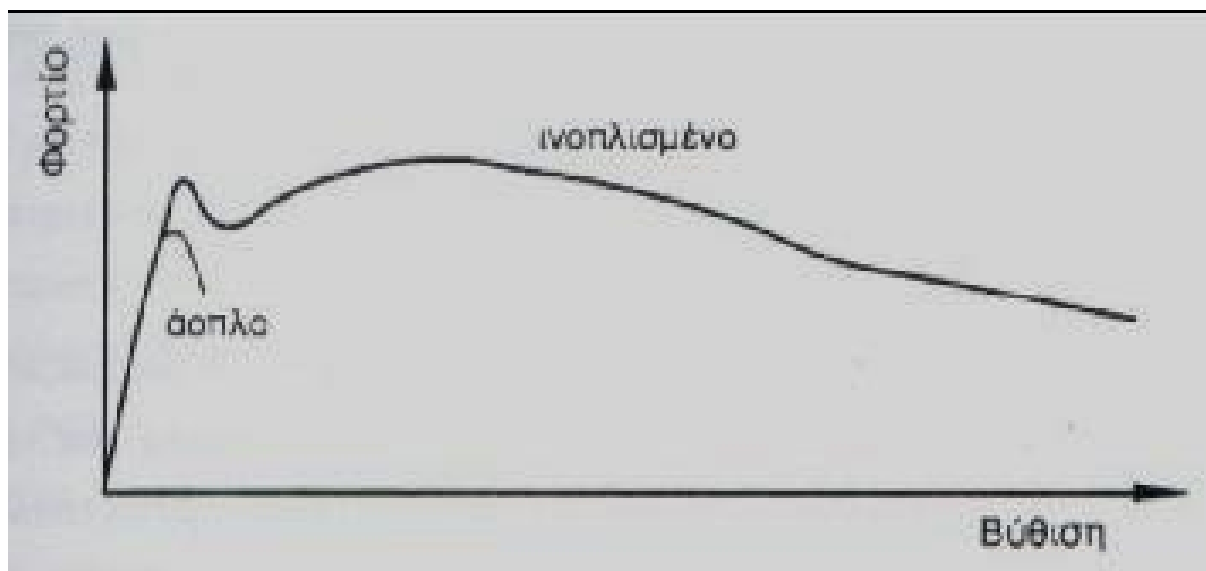
10. Αν η κάθιση είναι μικρότερη από 10 mm, το σκυρόδεμα είναι τόσο ύφυγρο ώστε η μέθοδος ελέγχου να μην είναι κατάλληλη -δεν υπάρχει αποτέλεσμα- απαιτείται η δοκιμή Vebe . Αν διαπιστωθεί κατάρρευση του σκυροδέματος από διάτμηση (κατάρρευση τμήματος του κώνου κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου), η μέτρηση δεν λαμβάνεται υπ' όψη, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί σε νέο τμήμα του δείγματος. Αν και η δεύτερη δοκιμή δείξει την ίδια συμπεριφορά δοκιμίου, θεωρείται ότι το σκυρόδεμα δεν έχει την αναγκαία πλαστικότητα και συνοχή για την εφαρμογή της δοκιμής κάθισης. Αν η κάθιση είναι μεγαλύτερη από 175 mm , τότε η δοκιμή κάθισης δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας αυτού του σκυροδέματος και πρέπει να αντικατασταθεί από τη δοκιμή εξαπλώσεως.

## Ιδιότητες ΙΝΟ.Σ

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η αύξηση αντοχής του σκυροδέματος λόγω προσθήκης ινών είναι μικρή. Η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται από ελάχιστα έως καθόλου (μάλιστα μπορεί και να μειωθεί όταν προκαλείται σημαντική μείωση της εργασιμότητας), ενώ οι αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη αυξάνονται λίγο περισσότερο. Η ευεργετική δράση των ινών αφορά βασικά τη δυσθραυστότητα, που αυξάνεται με το ποσοστό των ινών και το λόγο l/d. Χαρακτηριστικά της επίδρασης των ινών στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι τα αποτελέσματα των εικόνων 34-35, που αφορούν σκυροδέματα οπλισμένα με λείες ίνες χάλυβα.



Εικόνα 34. Επίδραση α )ποσοστού ινών χάλυβα και β) λόγου l/d στη θλιπτική αντοχή



Εικόνα 35. Επίδραση ινών στη συμπεριφορά σε κάμψη

Η εφελκυστική αντοχή  $f_{fr,t}$  (σε MPa) του ΙΝΟ.Σ. υπολογίζεται βάσει της εφελκυστικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος,  $f_{ct}$ , και του ποσοστού ινών κ.ο.,  $V_f$ , ως εξής:

$$F_{fr,t} = A * f_{ct} * (1 - V_f) + B * V_f * l / d$$



όπου A= σταθερά περίπου ίση με 1 (ακριβέστερα μεταξύ 0,85-0,97) και B= σταθερά που εξαρτάται από τη συνάφεια μεταξύ ινών και σκυροδέματος και από τον προσανατολισμό των ινών, με τιμή γύρω στο 3.

Λόγω της σημαντικής δυσθραυστότητας, το ΙΝΟ.Σ. χαρακτηρίζεται από αντοχή σε κρούση που ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του αόπλου, μέχρι και τέσσερις φορές, ανάλογα με το ποσοστό και τον τύπο ινών(οι παραμορφωμένες ίνες δίνουν, γενικά, ευνοϊκότερα αποτελέσματα). Για τον ίδιο λόγο, αυξημένη είναι και η αντοχή σε κόπωση, κατά 30-90% περίπου έναντι αυτής του αόπλου. Εδώ σημειώνεται και η μείωση του πλάτους των ρωγμών λόγω κόπωσης.

Η επίδραση των ινών στο μέτρο ελαστικότητας είναι αμελητέα, ενώ μερικές φορές μπορεί να γίνει και δυσμενής, λόγω μείωσης της εργασιμότητας που μπορεί να επιφέρει εγκλωβισμένο αέρα. Οι παραμορφώσεις λόγω συστολής ξήρανσης και ερπυσμού είναι περίπου οι ίδιες με τις αντίστοιχες του άοπλου σκυροδέματος, ενώ γενικά ο έλεγχος της ρηγμάτωσης είναι καλύτερος.

Η ανθεκτικότητα του ΙΝΟ.Σ. σε διάρκεια είναι γενικά πολύ καλή, κυρίως λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Η τυχόν διάβρωση των ινών χάλυβα είναι μόνον επιφανειακή και χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις, επειδή η διάμετρος των ινών είναι μικρή, και επομένως οι τάσεις λόγω διόγκωσης που προκαλούν τα οξείδια σιδηρού είναι αμελητέες. Οι δυσμενείς επιπτώσεις του αλκαλικού περιβάλλοντος του σκυροδέματος στις ίνες γυαλιού Ε επεκτείνονται και σε άλλους τύπους ινών, όπως είναι οι περισσότερο φυσικές ίνες και οι ίνες από ορισμένα συνθετικά πολυμερή.

## Τρόποι εφαρμογής

### α) Αεροστατική εφαρμογή

Αυτή η μέθοδος είναι βολική όταν οι ίνες περιέχονται σε λιγότερο από 1% κ.ο. Οι ίνες και το κονίαμα αντλούνται και εκτοξεύονται σε αυτή τη μέθοδο.

### β) Μέθοδος αρχικής ανάμιξης

Αυτή είναι μια συμβατική μέθοδος ανάμιξης. Αυτή η μέθοδος βρέθηκε για να είναι λιγότερο αποτελεσματική από ότι η μέθοδος του ψεκασμού. Σε αυτή τη μέθοδο οι ίνες είναι αναμεμιγμένες στο κύλινδρο ανάμιξης μαζί με τσιμέντο πριν ή μετά τη προσθήκη νερού. Οι ίνες προστίθενται με μικρή προσθήκη. Η εργασιμότητα εξαρτάται από το μέγεθος του συνόλου, όγκος ινών κ.α.

γ) Μέθοδος ψεκασμού (εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα)

Σε αυτή τη μέθοδο το τσιμεντοκονίαμα και οι ίνες ψεκάζονται ταυτόχρονα πάνω στο καλούπι. Είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος εφαρμογής στην Ελλάδα.

δ) Στερεοποίηση

Για στερεοποίηση, χρησιμοποιείται συνήθως λεπτός δονητής. Παρόλα αυτά, ο δονητής δεν ενδείκνυται καθότι μπορεί να αφήσει κενά στην επιφάνεια τους σκυροδέματος .

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία του FRC μεγάλωσε κατά πολύ το εύρος των εφαρμογών του ΙΝΟ.Σ. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται μερικές από αυτές ανάλογα με το είδος των ινών.

Τύπος ινών	Εφαρμογές
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, κατάστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμίαντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Άνθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή οροφών, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Φυσικές ίνες (ίνα καρύδας, sisal, ζαχαροκάλαμο, bamboo)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους-αντιπαρέχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι

**Πίνακας 21. Εφαρμογές Ινοπλισμένου σκυροδέματος**



Εικόνα 36. Εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος.

#### ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (SFRC) ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΟΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ -ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΕΩΝ.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει εξεταστεί ευρέως ως προς τη συμπεριφορά του σαν υλικό και οι περισσότερες προτάσεις για τη δημιουργία ενός σκεπτικού για το σχεδιασμό του στηρίζονται στην κυβική αντοχή του σκυροδέματος, που εξακολουθεί να είναι η βασική παράμετρος στις αρχές σχεδιασμού πολλών χωρών. Αντ' αυτού στο Leipzig αναπτύχθηκε μια καινούρια θεωρία βασισμένη σε παραμέτρους της Μηχανικής των Θραύσεων (Μ.Θ.). Οι παράμετροι αυτοί είναι η ενέργεια θραύσης  $G_f$  και το χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch}$ . Με βάση αυτή τη θεωρία τα δεδομένα ,που εξήχθησαν από πειράματα άμεσου εφελκυσμού ,για την ικανότητα παραμόρφωσης του SFRC σε σχέση με την ποσότητα των ινών και την κυβική αντοχή του σκυροδέματος οδήγησαν σε ένα θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ικανότητας παραμόρφωσης και των μεγεθών της Μ.Θ. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τριγωνικό ομαλοποιημένο διάγραμμα του SFRC και κάποια παραδείγματα

υπολογισμού της ικανότητας σε διάτμηση λεπτών δοκών με διαφορετικό ποσοστό ινών χάλυβα.

## Μηχανική των Θραύσεων

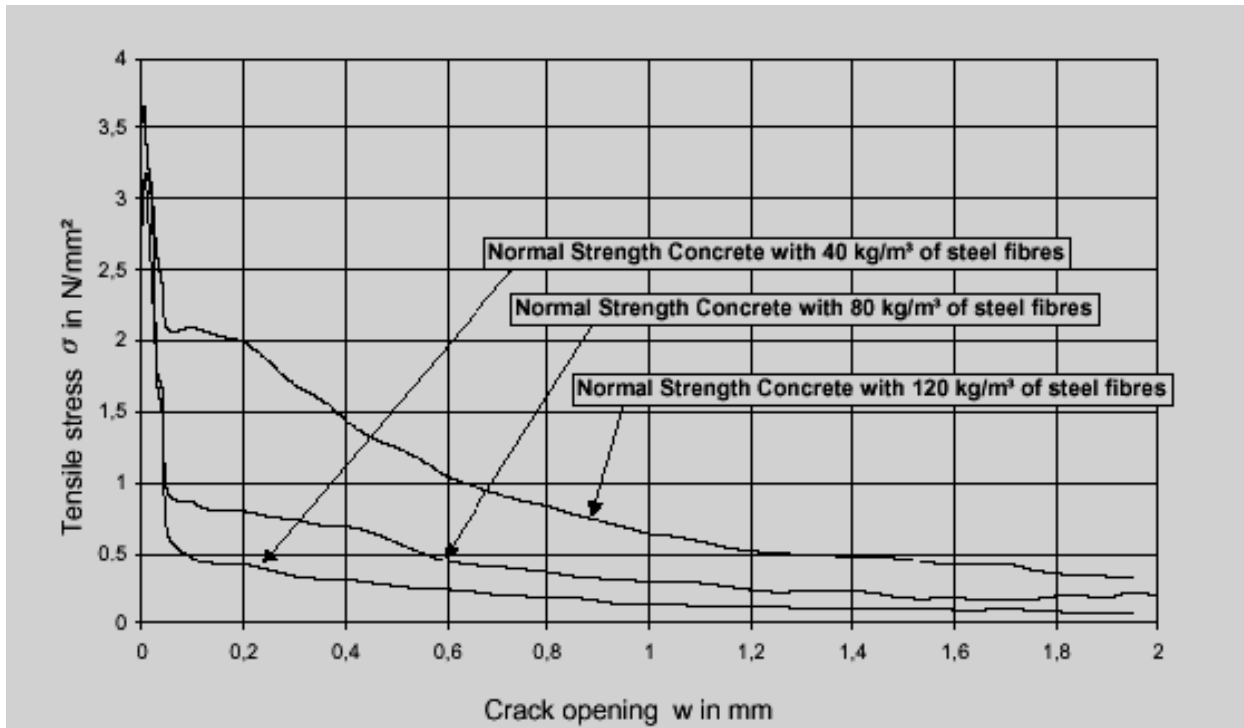
Η Μηχανική των θραύσεων μελετά την αστοχία των κατασκευών, η οποία προκαλείται από την ύπαρξη αρχικών ρωγμών. Εξετάζεται η εντατική κατάσταση στο άκρο της ρωγμής, τα κριτήρια διάδοσης της ρωγμής, η επίδραση της δυναμικής φόρτισης, της κόπωσης και οι μικροσχηματισμοί αστοχίας των υλικών. Σαν ενέργεια θραύσης  $G_f$  ορίζεται η ενέργεια που χρειάζεται για τη θραύση του υλικού, ή αλλιώς για τη δημιουργία μιας μονάδας ρηγματωμένης επιφάνειας (Hillerborg,1985) και σαν χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch}$  ο λόγος  $G_f / f_t^2$  (Hillerborg,1975),όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $f_t$  η εφελκυστική αντοχή. Το χαρακτηριστικό μήκος είναι ιδιότητα που εκφράζει την θραύση για κάθε υλικό και δείχνει ότι η ευθραυστότητα αυξάνει με την αύξηση της αντοχής και μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας που χρειάζεται για την θραύση.

## Συμπεριφορά του SFRC υπό φόρτιση

Λόγω των ιδιοτήτων τους οι ίνες του χάλυβα δεν επηρεάζουν καθόλου τις διάφορες παραμέτρους της αντοχής του σκυροδέματος. Υπό θλιπτική φόρτιση, όταν εμφανίζονται μικρορωγμές εξαιτίας εγκάρσιων εφελκυστικών δυνάμεων, οι ίνες του χάλυβα προκαλούν δυνάμεις που τείνουν να κλείσουν τις ρωγμές. Αφ' ενός το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Αφ' ετέρου όμως η ανάμιξη των ινών στο σκυρόδεμα προκαλεί αύξηση του πορώδους με αποτέλεσμα τη μείωση της θλιπτικής αντοχής. Κατά συνέπεια οι δύο αυτές δράσεις αλληλοαναιρούνται. Εξάλλου πειράματα έδειξαν ότι οι ίνες δεν επηρεάζουν και την άμεση εφελκυστική αντοχή, αφού παρουσιάστηκε θραύση μετά την εμφάνιση της τελικής ρωγμής. Μόνο η αντοχή σε λυγισμό αυξάνεται λίγο μετά την ανάμιξη των ινών του χάλυβα.

Σαν συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι τα πλεονεκτήματα του SFRC δεν βρίσκονται σε ότι έχει να κάνει με την αντοχή του υλικού συγκριτικά με το απλό ενισχυμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο οι ίνες του χάλυβα αυξάνουν σημαντικά την ολκιμότητα και την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος και κατ' επέκταση

την πλαστιμότητα του. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την ολκιμότητα Σκυροδέματος Κανονικής Αντοχής (NSC) ενισχυμένου με ίνες χάλυβα που υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση.

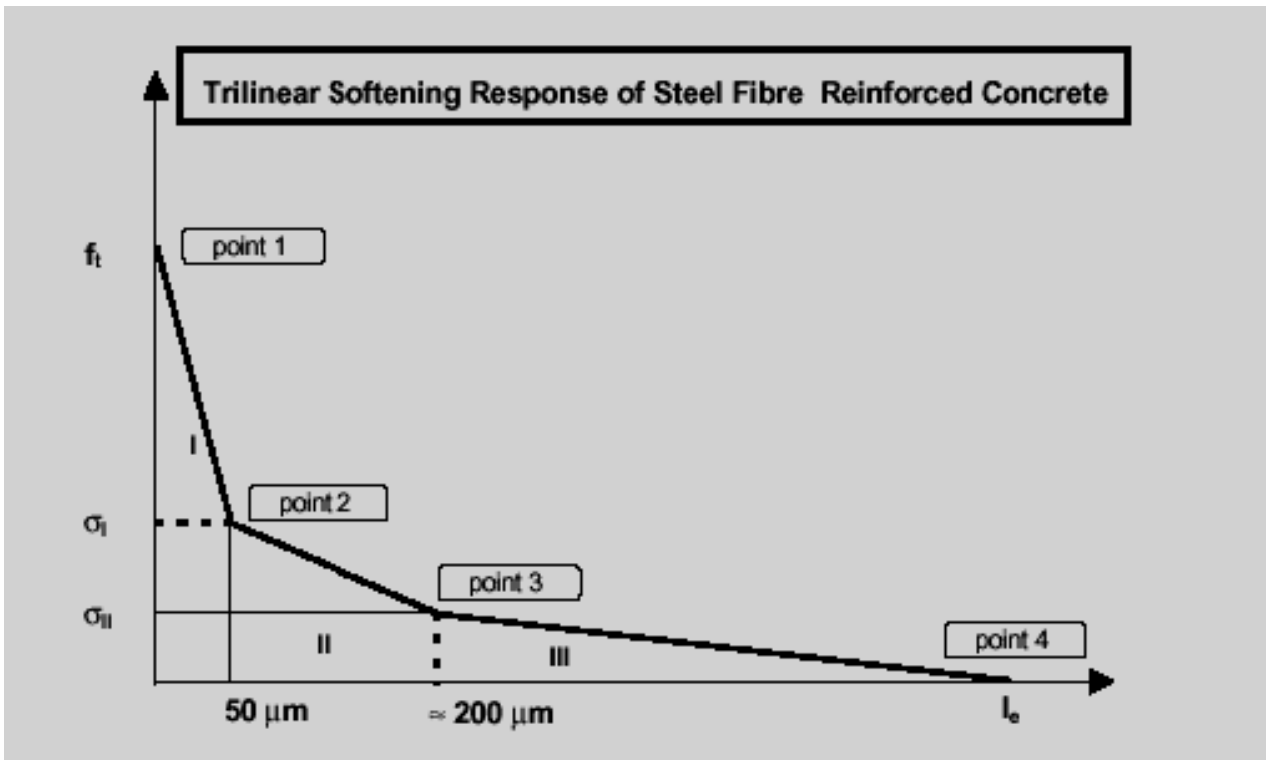


Εικόνα 37. Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ποσότητας των ινών και της γεωμετρίας τους αναπτύχθηκε ένα τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα.

#### Τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα για SFRC

Το τριγραμμικό μοντέλο βασίζεται στις προτάσεις του Muller, ο οποίος υπολόγισε την διασπορά των δυνάμεων στις ίνες σε σχέση με το άνοιγμα της ρωγμής. Υπέθεσε μια σταθερή διανομή της έντασης στους δεσμούς σκυροδέματος-ινών. Μετά την ρηγμάτωση εφελκυστική ένταση ασκείται στις ίνες μέχρι να ξεπεραστεί η αντοχή του δεσμού. Έπειτα οι ίνες διαχωρίζονται από το υλικό. Στο τριγραμμικό μοντέλο αυτός ο μηχανισμός συνδυάζεται με την αντίδραση του σκυροδέματος να μειώσει αυτή την ένταση.

Παρακάτω φαίνεται το τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα και ξεχωρίζονται οι τρεις διαφορετικοί του κλάδοι.



**Εικόνα 38.** το τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα και ξεχωρίζονται οι τρεις διαφορετικοί του κλάδοι.

Στον πρώτο κλάδο (I) το σκυρόδεμα μόνο του αναλαμβάνει την μεταφορά της έντασης. Στη συνέχεια στο δεύτερο κλάδο (II) συνεργάζεται με τις ίνες του χάλυβα για την ανάληψη αυτή. Με την αύξηση του πλάτους της ρωγμής η επιρροή του σκυροδέματος στην αντοχή μειώνεται ραγδαίως. Έχει σημειωθεί ότι το όριο του ανοίγματος ρωγμής για το οποίο το σκυρόδεμα είναι ενεργό στην μεταφορά δύναμης είναι 160-250  $\mu m$ , ανάλογα με την κυβική αντοχή του σκυροδέματος και το είδος των αδρανών. Κατά συνέπεια στον τρίτο κλάδο (III) οι ίνες δρουν μόνες τους.

Τα 4 χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος υπολογίζονται ως εξής: Επειδή οι ίνες του χάλυβα δεν επηρεάζουν καθόλου τις παραμέτρους της αντοχής, το σημείο 1 (point 1) στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

$$F_t = 2,12 * \ln [ 1 + ( f_c/10) ] \quad (1)$$

όπου

$f_t$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

$f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Ο δεσμός μεταξύ της μήτρας του σκυροδέματος και των ινών αστοχεί όταν το πλάτος ρωγμής είναι περίπου 50  $\mu\text{m}$ . Η αντίστοιχη τάση  $\sigma_1$  μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση 2. Ο μειωτικός συντελεστής της επιρροής των ινών, ένεκα του τυχαίου προσανατολισμού τους στο χώρο εκτιμάται ότι είναι 0,30

$$\sigma_1 = f_{t2} * [ 1 - ( 0,05 / w_2 ) ] + 0,30 * n_{vol} * \sigma_T * [ 1 - ( 0,05 / l_E ) ] \quad (2)$$

όπου

$f_{t2}$  είναι = 0,70  $\text{N/mm}^2$  για σκυρόδεμα με αμμοχάλικο

είναι = 0,85  $\text{N/mm}^2$  για σκυρόδεμα με χονδρόκοκκα αδρανή

$w_2$  είναι το άνοιγμα της τελική πριν τη θραύση ρωγμής

η  $V_{oi}$  είναι το ποσοστό των ινών επί του όγκου

$\sigma_T$  είναι η τάση στις ίνες κατά τον διαχωρισμό-εξίσωση 3

$l_E$  είναι το μέσο μήκος δεσμού ινών σκυροδέματος, περίπου  $0,25 * l$  ίνας

$$\sigma_T = 4 * ( l_E / d_f ) * \tau_m \quad (3)$$

όπου

$d_f$  είναι η διάμετρος των ινών

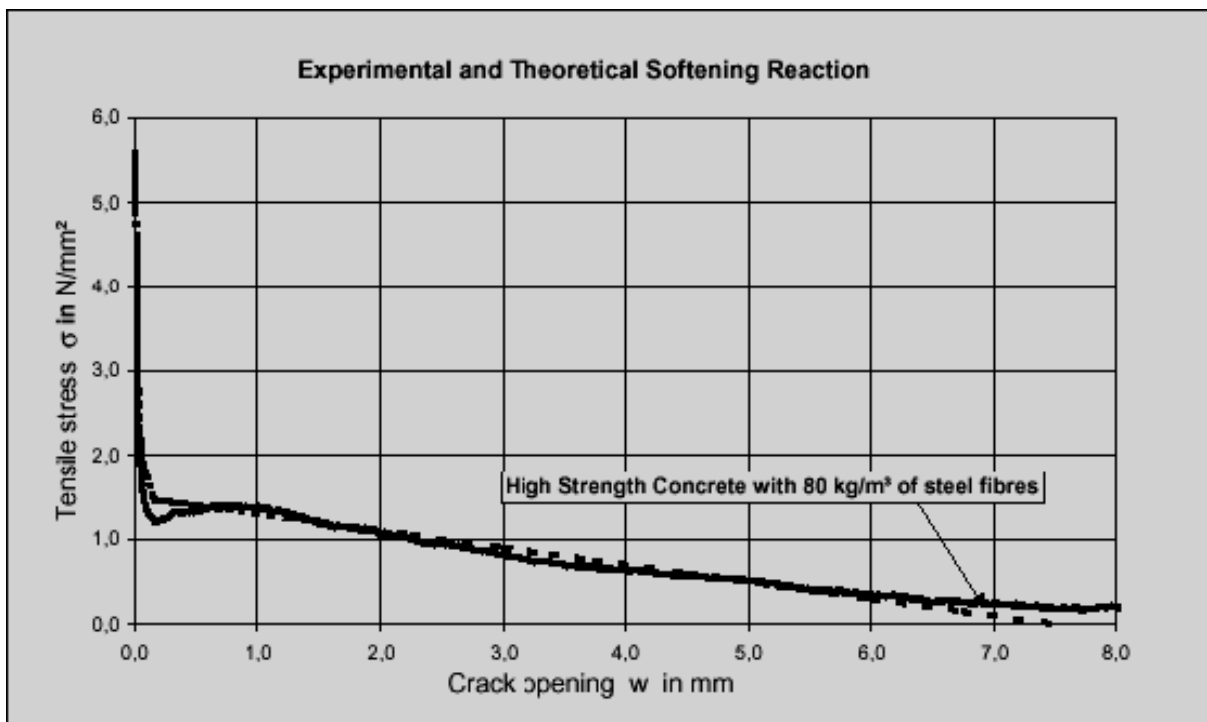
$\tau_m$  η μέση τιμή της τάσης στο δεσμό κατά τον διαχωρισμό

Μετά το χαρακτηριστικό πλάτος ρωγμής  $w_2$ , οι ίνες του χάλυβα αναλαμβάνουν την μεταφορά της έντασης. Η τάση  $\sigma_{II}$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 4

$$\sigma_{II} = 0,03 * \eta_{vol} * \sigma_T * [ 1 - ( w_2 / l_E ) ] \quad (4)$$

και η μεταφορά έντασης διακόπτεται.

Με τις παραπάνω 4 εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση (πλάτος ρωγμής ) σε σχέση με την ένταση του SFRC και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα της ενέργειας θραύσης με την ολοκλήρωση του διαγράμματος. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών άμεσου εφελκυσμού.



Εικόνα 39. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος.

#### Ικανότητα σε διάτμηση δοκών από SFRC

Οι μέθοδοι υπολογισμού της διατμητικής αντοχής μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία έχει να κάνει με τον καθορισμό της αντοχής μέσω εμπειρικών παραμέτρων που βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα. Αυτός ο τρόπος ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, μόνο όταν οι πραγματικές παράμετροι ταυτίζονται με τις πειραματικές. Η δεύτερη κατηγορία έχει να κάνει με μαθηματικά μοντέλα που στηρίζονται στη Μηχανική των Θραύσεων.

Το πραγματικό κριτήριο για τη διατμητική αστοχία είναι η δημιουργία μιας διαγώνιας ρωγμής που εκτείνεται από το σημείο φόρτισης μέχρι τη στήριξη. Αυτή η υπόθεση είναι μια απλοποίηση που υποδηλώνει ότι μόνο μία ρωγμή είναι υπεύθυνη για την αστοχία. Με την μηχανική των θραύσεων η μεταφορά της έντασης στη



κρίσιμη διατμητική ρωγή μπορεί να υπολογιστεί. Με την εξέλιξη της θεωρίας αυτής ο Hillerborg παρέθεσε μία εξίσωση που εκφράζει την εξάρτηση της διατμητικής αντοχής με το χαρακτηριστικό μήκος

$$V_u \approx \sqrt[4]{l_{ch}} \quad (5)$$

Με το τριγωνικό μοντέλο τάσης-μετατόπισης μπορεί να προσδιοριστεί η ενέργεια θραύσεως  $G_f$  καθώς και το χαρακτηριστικό μήκος  $l_{ch}$  για το SFRC. Αυτοί οι παράμετροι επιτρέπουν τον υπολογισμό ενός αναλογικού συντελεστή  $f$  και κατ' επέκταση της διατμητικής αντοχής. Παρακάτω φαίνονται οι θεωρητικές εκτιμήσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Concrete type	$l_{ch}$ in mm	$f$	$V_{calc}$ in kN	$V_{exp}$ in kN	$\Delta$
NSC + 0 kg/m <sup>3</sup>	292,3	1,00	-	95,6	-
NSC + 40 kg/m <sup>3</sup>	3237,4	1,82	174,0	179,9	0,97
NSC + 40 kg/m <sup>3</sup>	3470,6	1,73	165,4	176,6	0,94
HSC + 0 kg/m <sup>3</sup>	318,8	1,00	-	121,5	-
HSC + 40 kg/m <sup>3</sup>	3728,2	1,87	227,2	226,4	1,00
HSC + 80 kg/m <sup>3</sup>	7071,4	2,27	275,4	252,5	1,09

**Εικόνα 40.** θεωρητικές εκτιμήσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα

## 3.2 ΧΡΗΣΗ ΙΝΟΠΟΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

Μετά από ένα ισχυρό σεισμό, στα κτίρια που έχουν υποστεί σοβαρές βλάβες πραγματοποιούνται επισκευές και ενισχύσεις που έχουν συνήθως τη μορφή μανδυών διαφόρων μορφών. Από την άλλη, είναι γνωστό ότι οι εργασίες ενίσχυσης των κτιρίων έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος και μεγαλύτερη δυσκολία κατασκευής συγκριτικά με τις εργασίες ανέγερσης νέων οικοδομών. Για την επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου επέμβασης, πέραν της αποτελεσματικότητας στη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς, σημαντικό ρόλο παίζουν και δύο επιπλέον παράγοντες: η απλότητα εφαρμογής και το τελικό κόστος.

Με βάση τα προηγούμενα, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η δημιουργία και η εισαγωγή στην αγορά ενός τύπου ενίσχυσης του σκελετού από οπλισμένο σκυρόδεμα με σεισμική συμπεριφορά που να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις των κανονισμών και ταυτόχρονα απλού στην κατασκευή και με μικρότερο κόστος σε σχέση με τα συνήθη. Ένα τέτοιο σύστημα αντισεισμικής ενίσχυσης είναι προφανές ότι θα ήταν ιδιαίτερα ανταγωνιστικό μεταξύ όλων των υπολοίπων.



Εικόνα 41. Προσθήκη μεταλλικών ινών στο σκυρόδεμα

Το 1977 ο Henager, με τη χρήση μόνον ινοπλισμένου σκυροδέματος, χωρίς την παρουσία συνδετήρων, σε μια περιοχή που περιλαμβάνει τον κόμβο και τμήματα των κρίσιμων περιοχών των υποστυλωμάτων και της δοκού δοκιμίου δοκού-υποστυλώματος, επιτυγχάνει καλύτερη σεισμική συμπεριφορά από αυτήν όμοιου κατά τα άλλα δοκιμίου αλλά με συμβατική όπλιση (συνδετήρες) και συμβατικό σκυρόδεμα. Έτσι καταφέρνει, με την παρουσία των χαλύβδινων ινών σε ποσοστό 1.67% κατ' όγκο, να υποκαταστήσει τον οπλισμό συνδετήρων στις κρίσιμες αυτές περιοχές και να μειώσει το κόστος της κατασκευής του ινοπλισμένου δοκιμίου κατά 50% περίπου σε σχέση με αυτό του συμβατικά οπλισμένου.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, απλό ή εκτοξευόμενο, χρησιμοποιείται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, καταργώντας ή μειώνοντας το συμβατικό οπλισμό και επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του κόστους της κατασκευής. Οι επενδύσεις με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποδείχτηκε ότι δεν υστερούν, ούτε κατά την αντοχή ούτε κατά την πλαστιμότητα, από τις συμβατικές λύσεις επενδύσεων. Ακόμη και ένα σχετικά χαμηλό ποσοστό περιεκτικότητας ινών, της τάξης του 0.5% κατ' όγκον, έχει αποτελέσματα συγκρίσιμα με την όπλιση με διπλό πλέγμα (Τέγος 1995, ACI 506R-90 1995). Εκτιμήθηκε ότι η κατασκευή μιας επένδυσης πάχους 100 mm από σύνηθες εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με μονό πλέγμα κοστίζει δύο φορές περισσότερο από τη λύση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με το ίδιο πάχος (Τέγος, 1995).

Ενώ είναι γνωστά τα πλεονεκτήματα του ινοπλισμένου σκυροδέματος, εν τούτοις δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα, παρά τις σχετικές προσπάθειες, ένας αξιόπιστος τρόπος εφαρμογής του στις επισκευές και ενισχύσεις κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος να μειώνει αισθητά ή και να καταργεί το συμβατικό οπλισμό των ενισχύσεων. Έτσι, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής SIMCON που προτάθηκε πρόσφατα για επισκευές και ενισχύσεις στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα δε φαίνεται να είναι σε θέση να ενισχύσει με επιτυχία τα κατακόρυφα στοιχεία της οικοδομής (στύλους, κόμβους, τοιχώματα) καθώς η λογική της κατασκευής του είναι παρόμοια με αυτήν των ινοπλισμένων πολυμερών (FRPs).

Οι χαλύβδινες ίνες του SIMCON βρίσκονται ενσωματωμένες σε ειδική μήτρα με βάση το τσιμέντο. Το υλικό αυτό - με τη μορφή 'ψάθας' (όπως και τα υφάσματα των FRPs) – έρχεται στο έργο σε μεγάλους ρόλους, περιτυλίγεται στις επιθυμητές προς ενίσχυση θέσεις των δομικών στοιχείων και, στη συνέχεια, εμποτίζεται με ειδικό τσιμεντοκονίαμα. Το SIMCON, το οποίο περιέχει χαλύβδινες ίνες σε ποσοστό άνω

του 2% κατ' όγκον και έχει θλιπτική αντοχή της τάξης των 70 MPa και εφελκυστική αντοχή της τάξης των 8 MPa (Shannag, Barakat and Abdul-Karrem, 2002), έχει αρκετά πλεονεκτήματα αλλά παρουσιάζει και σοβαρά μειονεκτήματα. Τα σοβαρότερα από αυτά είναι αφενός η αδυναμία του να αυξήσει αξιόπιστα την καμπτική αντοχή υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων οικοδομών λόγω της υποχρεωτικής ασυνέχειας στις στρώσεις που δημιουργείται από την παρουσία πλακών και δοκών και αφετέρου η αδυναμία του να ενισχύσει αξιόπιστα κόμβους δοκού-υποστυλώματος, ειδικά όταν συντρέχουν δοκοί και από τις τέσσερις πλευρές του κόμβου. Τα ίδια ακριβώς μειονεκτήματα – και για τους ίδιους λόγους – παρουσιάζονται και με τη χρήση των FRPs. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος που δεν παρουσιάστηκε μέχρι σήμερα αξιόπιστος τρόπος αντισεισμικής ενίσχυσης συστήματος στύλου – κόμβου οικοδομής στη βιβλιογραφία (Shannag, Barakat and Abdul-Karrem 2002, Dogan, Hill and Krstulovic-Opara 2000).

## **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ**

Σε πρόσφατη πειραματική ερευνητική εργασία (Τσώνος, 2003) που ασχολείται με τη μετασεισμική επισκευή εξωτερικών κόμβων δοκού – υποστυλώματος με τη μέθοδο της καθαίρεσης και αποκατάστασης επιτεύχθηκε μείωση των απαιτούμενων συνδετήρων του κόμβου από 5Ø8 σε 1Ø8 με την παρουσία 0.5% κατ' όγκο (κ.ο.) χαλύβδινων ινών στο επισκευαστικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (της τάξης των 70 MPa). Τονίζεται ότι ο κόμβος καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης δεν παρουσίασε ούτε μία τριχοειδή ρηγμάτωση και η αστοχία του δοκιμίου συγκεντρώθηκε αμιγώς στη δοκό. Η ανωτέρω διεθνής πρωτοτυπία έδωσε την καινοτόμο ιδέα της μετασεισμικής ενίσχυσης του στύλου και του κόμβου δομικού υποσυνόλου παλαιάς οικοδομής με μανδύα από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής σταθερού όγκου με ποσοστό ινών 1% κατ' όγκο χωρίς καθόλου χρήση συμβατικού οπλισμού. Το δοκίμιο αυτό υποβλήθηκε σε σεισμική καταπόνηση και αστόχησε κυρίως στη δοκό και ελαφρώς στον κόμβο. Συγκρίθηκε η σεισμική του συμπεριφορά με τη συμπεριφορά όμοιων δοκιμίων ενισχυμένων με συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα με μεγάλο ποσοστό οπλισμού, όπως και όμοιων δοκιμίων ενισχυμένων με CFRPs. Η συμπεριφορά του δοκιμίου που ενισχύθηκε με ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής αποδείχθηκε εφάμιλλη αυτής των δοκιμίων των ενισχυμένων με CFRPs και συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα (Τσώνος 2006, Τσώνος 2008).

Για την ανωτέρω εφεύρεση απονεμήθηκε στον Α. Τσώνο το Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας με αριθμό 1005657 από τον Οργανισμό Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας (2007). Μετά τη δεύτερη αυτή διεθνή πρωτοτυπία, επιχειρήθηκε το ακόλουθο εγχείρημα: παραγωγή έγχυτου ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής (της τάξης των 100 MPa) σταθερού όγκου ώστε να διαθέτει υψηλότερη εφελκυστική αντοχή χωρίς την ανάγκη χρήσης συμβατικού οπλισμού και συνεπώς να αποτελεί λυσιτελέστερη ενίσχυση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ). Είναι γεγονός ότι η ανάπτυξη και χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής είναι μία τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη προ αρκετών ετών. Η διεθνής πρωτοτυπία και σοβαρή καινοτομία της παρούσας εργασίας δε συνίσταται στην παραγωγή ενός συνήθους ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής για γενική χρήση αλλά στην παραγωγή του συγκεκριμένου μη συρρικνούμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής για την κατασκευή μανδύων αντισεισμικής ενίσχυσης κτιρίων από Ο/Σ χωρίς τη χρήση συμβατικού χάλυβα που προτείνεται στην παρούσα και εφαρμόζεται σε πειραματικό στάδιο για πρώτη φορά διεθνώς με ιδιαίτερη επιτυχία.

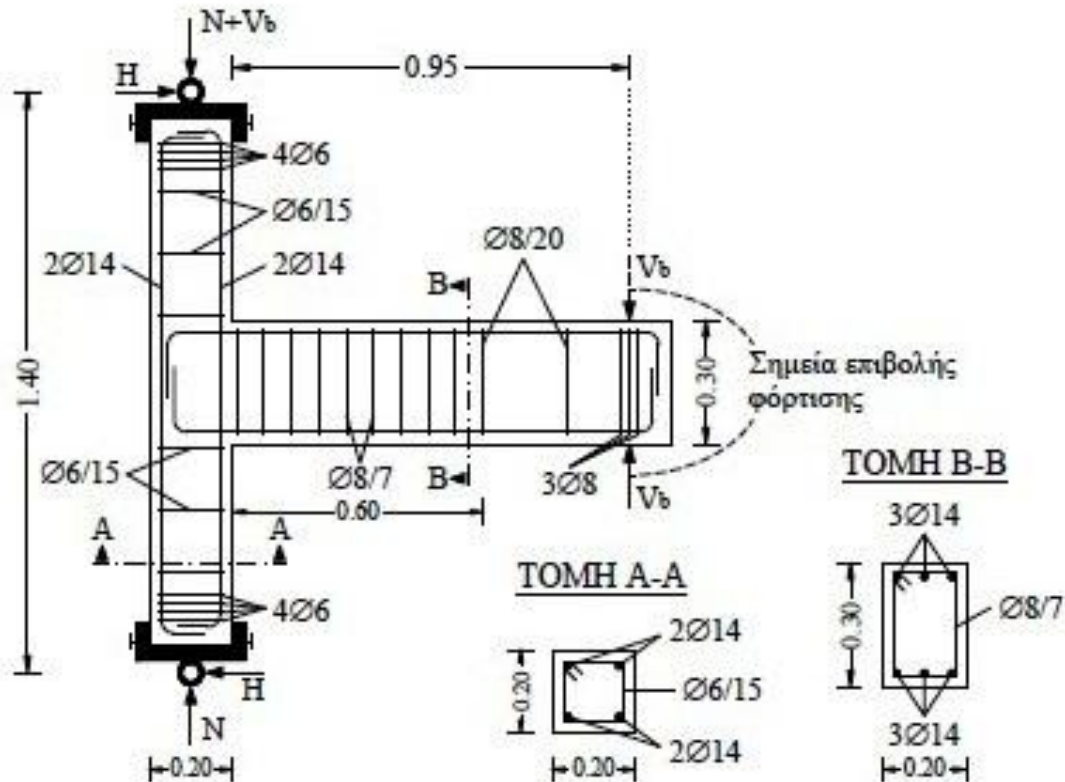
Η παραγωγή του σκυροδέματος αυτού έγινε από την Εταιρεία ISOMAT A.B.E.E. με τις συμβουλές και υποδείξεις του πρώτου των συγγραφέων Καθηγητή Α. Τσώνου με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μανδύων αντισεισμικής ενίσχυσης κτιρίων από Ο/Σ χωρίς τη χρήση συμβατικού χάλυβα. Οι μανδύες αυτοί θα μπορούν να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα (έγχυτο ή εκτοξευόμενο) είτε τους μανδύες από σύνθετα υλικά FRPs.

Το σκυρόδεμα ερχόταν από την Εταιρεία έτοιμο σε σάκους στο Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας, όπου γινόταν η ανάμιξη με νερό και κατάλληλη ποσότητα ινών. Ο τύπος των ινών και η ποσότητά τους κατ' όγκο στο σκυρόδεμα καθοριζόταν από τον Α. Τσώνο.

## **ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΝΕΩΝ ΜΑΝΔΥΩΝ**

Για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του νέου τρόπου ενίσχυσης που παρουσιάζεται κατασκευάστηκαν πέντε δοκίμια (τα M1, M2, M3, O1 και W1) όμοια με αυτό της εικόνας 42.

Το σκυρόδεμα των αρχικών αυτών δοκιμών έχει θλιπτική αντοχή της τάξης των 9.0 MPa. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε σεισμική καταπόνηση και αστοχούν στο στύλο και στον κόμβο - όπως αναμενόταν άλλωστε. Κατόπιν τα δοκίμια επισκευάζονται και ενισχύονται στον κόμβο και στην περιοχή των στύλων όπως περιγράφεται στη συνέχεια.



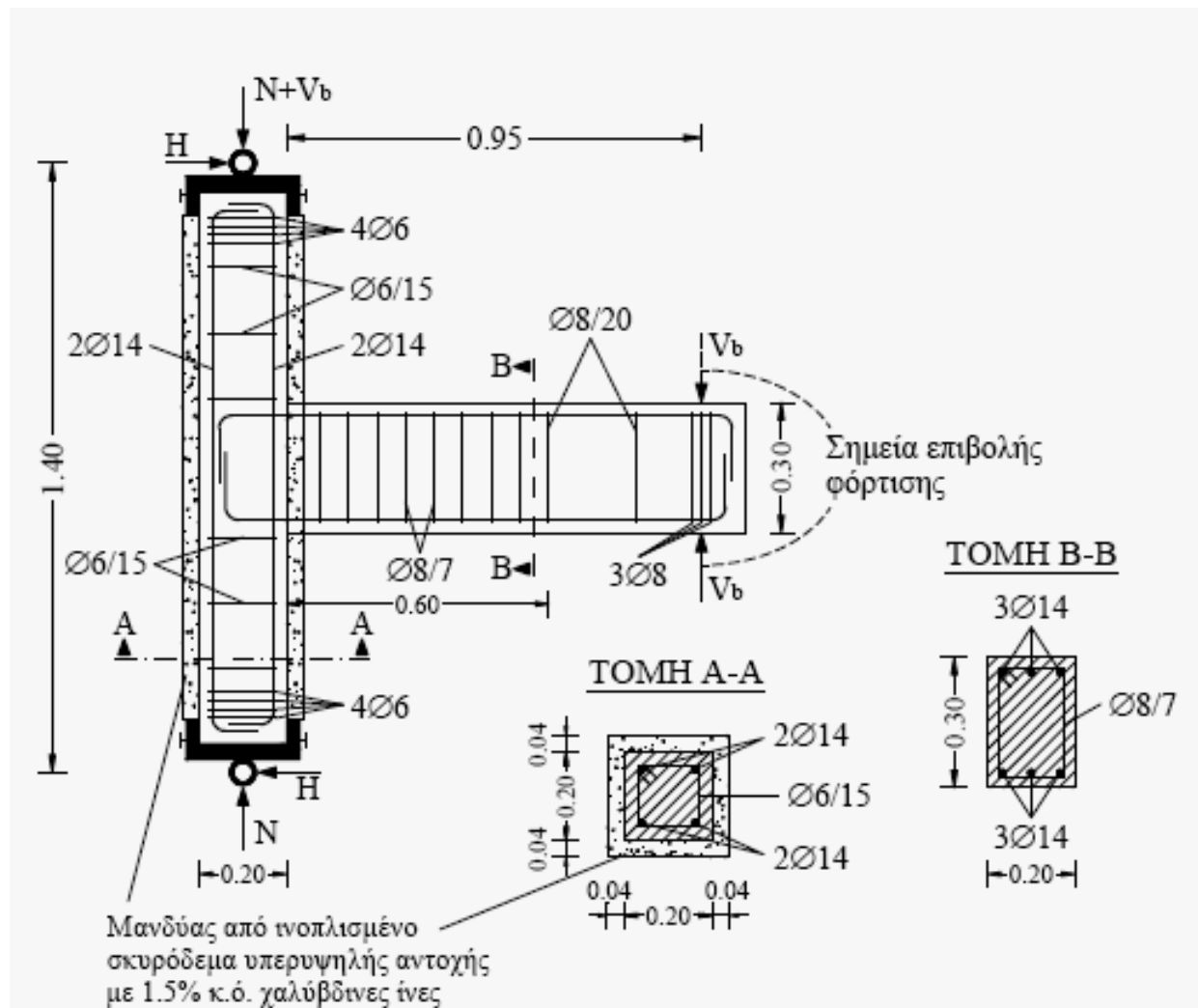
Εικόνα 42. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού των παρθενικών δοκιμών M1, M2, M3, O1 και W1 (διαστάσεις σε m).

Τα τρία πρώτα δοκίμια ενισχύονται με τους μανδύες νέας γενιάς από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής (δοκίμια HSFM1, HSFM2 και HSFM3). Βασικές παράμετροι της εργασίας είναι το ποσοστό των ινών χάλυβα και το πάχος του μανδύα νέας γενιάς. Έτσι το ενισχυμένο δοκίμιο HSFM1 έχει ενισχυθεί με καινοτόμο μανδύα από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής πάχους 40 mm στον οποίο περιέχονται χαλύβδινες ίνες Dramix ZP 30/0.60 σε ποσοστό 1.5% κ.ο. Το δοκίμιο HSFM2 έχει ενισχυθεί με καινοτόμο μανδύα από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής πάχους 60 mm με χαλύβδινες ίνες Dramix ZP 30/0.60 σε ποσοστό επίσης 1.5% κ.ο.

Η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο δοκιμών θα δώσει πληροφορίες σχετικά με την επιρροή του πάχους στην επιτυχή ενίσχυση των στύλων και κόμβων με τους καινοτόμους μανδύες. Το τρίτο δοκίμιο (το HSFM3) έχει ενισχυθεί και αυτό με μανδύα από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής πάχους 60 mm, η περιεκτικότητα όμως σε χαλύβδινες ίνες είναι 33% μικρότερη (1.0% κ.ο.).

Η σύγκριση της σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών HSFM2 και HSFM3 θα δώσει πληροφορίες σχετικά με την επιρροή του ποσοστού των ινών στην επιτυχή ενίσχυση στύλων και κόμβων με τους νέους μανδύες.

Στις εικόνες 43 , 44 και 45 φαίνονται οι διαστάσεις και οι λεπτομέρειες ενίσχυσης των δοκιμών HSFM1, HSFM2 και HSFM3 αντίστοιχα.



Εικόνα 43. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου HSFM1 (σε m).

Για να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με τους προτεινόμενους μανδύες νέας γενιάς τα δοκίμια O1 και W1, αφού υποβληθούν στην ίδια σεισμική καταπόνηση με τα προηγούμενα (M1, M2 και M3), επισκευάζονται και ενισχύονται με συμβατικούς μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος είτε FRPs.

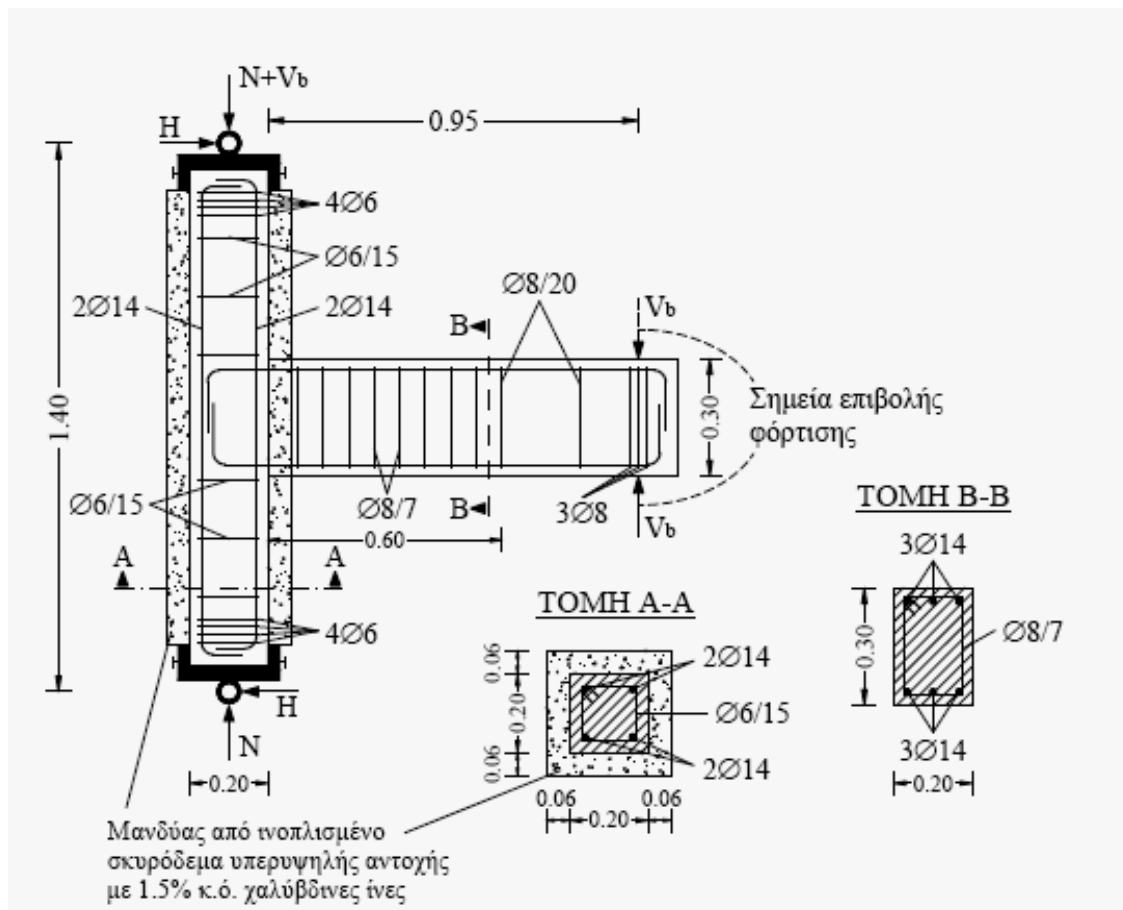
Το δοκίμιο O1 ενισχύεται με μανδύες κοινού οπλισμένου σκυροδέματος C30/37 με προσθήκη διαμήκων οπλισμών 4Φ14 και συνδετήρων Φ8/70 στους στύλους και, επιπλέον, με προσθήκη δισδιαγώνιων οπλισμών στον κόμβο - που αυξάνουν σημαντικά την καμπτική και διατμητική αντοχή αλλά δημιουργούν κατασκευαστικά προβλήματα τα οποία ανεβάζουν σημαντικά το συνολικό κόστος των ενισχύσεων (δοκίμιο SO1).

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του δοκιμίου ήταν ποιότητας S500s. Τέλος, το δοκίμιο W1 ενισχύεται αποκλειστικά με μανδύες από CFRPs και ονομάζεται FW1.

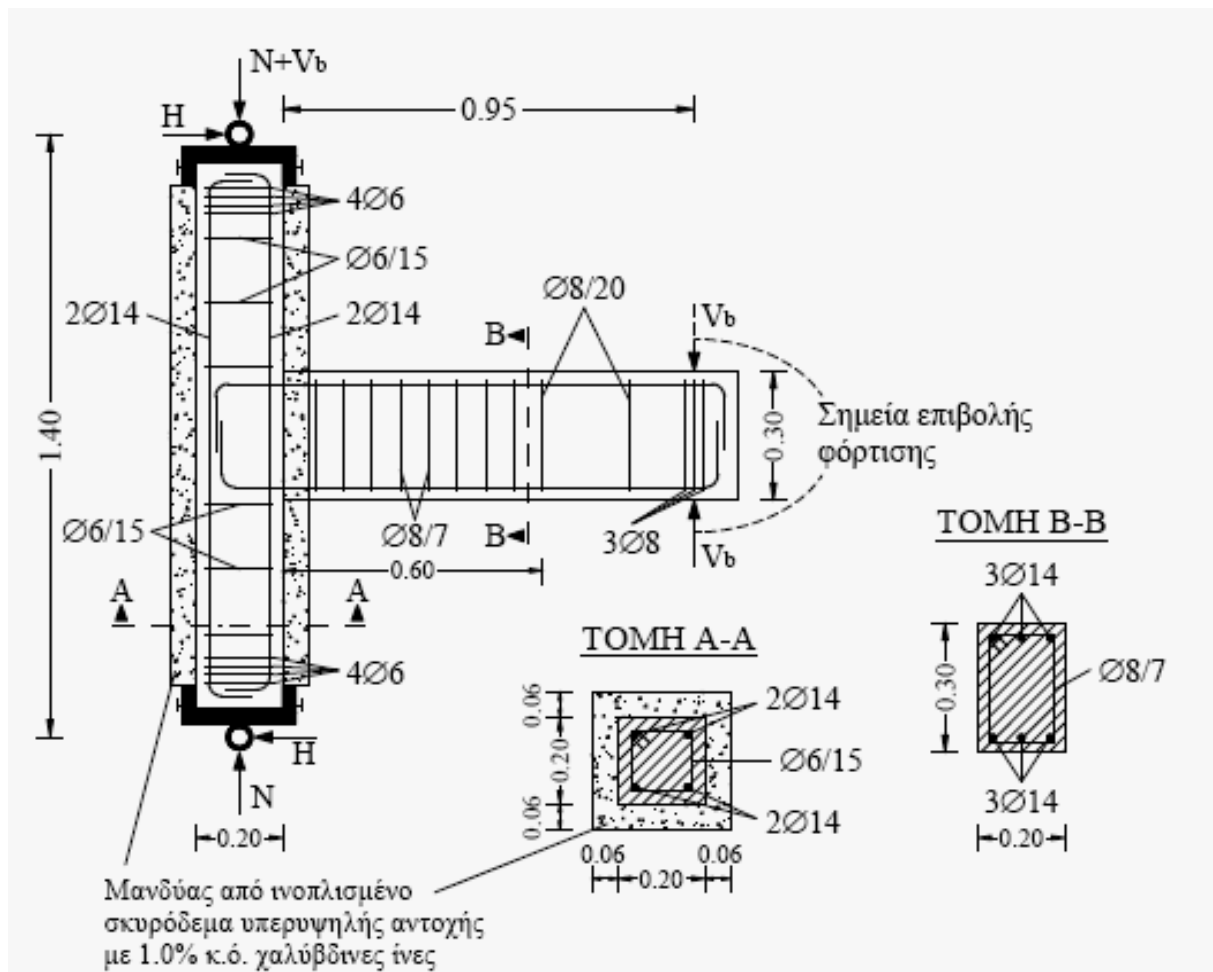
Ο υπολογισμός της ενίσχυσης των δοκιμίων SO1 και FW1 έγινε με βάση τους νέους κανονισμούς και συστάσεις της Ελληνικής και Διεθνούς βιβλιογραφίας (Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. 2000α και 2000β, Δρίτσος 2005, ACI-ASCE 352-2002). Ειδικά για το σχεδιασμό της ενίσχυσης του δοκιμίου FW1 χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται από το Δρίτσο (2005) για διαστασιολόγηση ενισχύσεων με FRPs ενώ έχουν ληφθεί υπόψιν και οι κανονιστικές απαιτήσεις (Ο.Α.Σ.Π. & Σ.Π.Μ.Ε. 2000α και 2000β, ACI-ASCE 352-2002). Τα ενισχυμένα με τους διάφορους τρόπους που προαναφέρθηκαν δοκίμια HSFM1, HSFM2, HSFM3, SO1 και FW1 υποβάλλονται στην ίδια σεισμική καταπόνηση με αυτήν που υποβλήθηκαν τα παρθενικά δοκίμια M1, M2, M3, O1 και W1.

Η σεισμική συμπεριφορά όλων των ανωτέρω δοκιμίων εξετάστηκε σε διάταξη φόρτισης που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας του Α.Π.Θ.

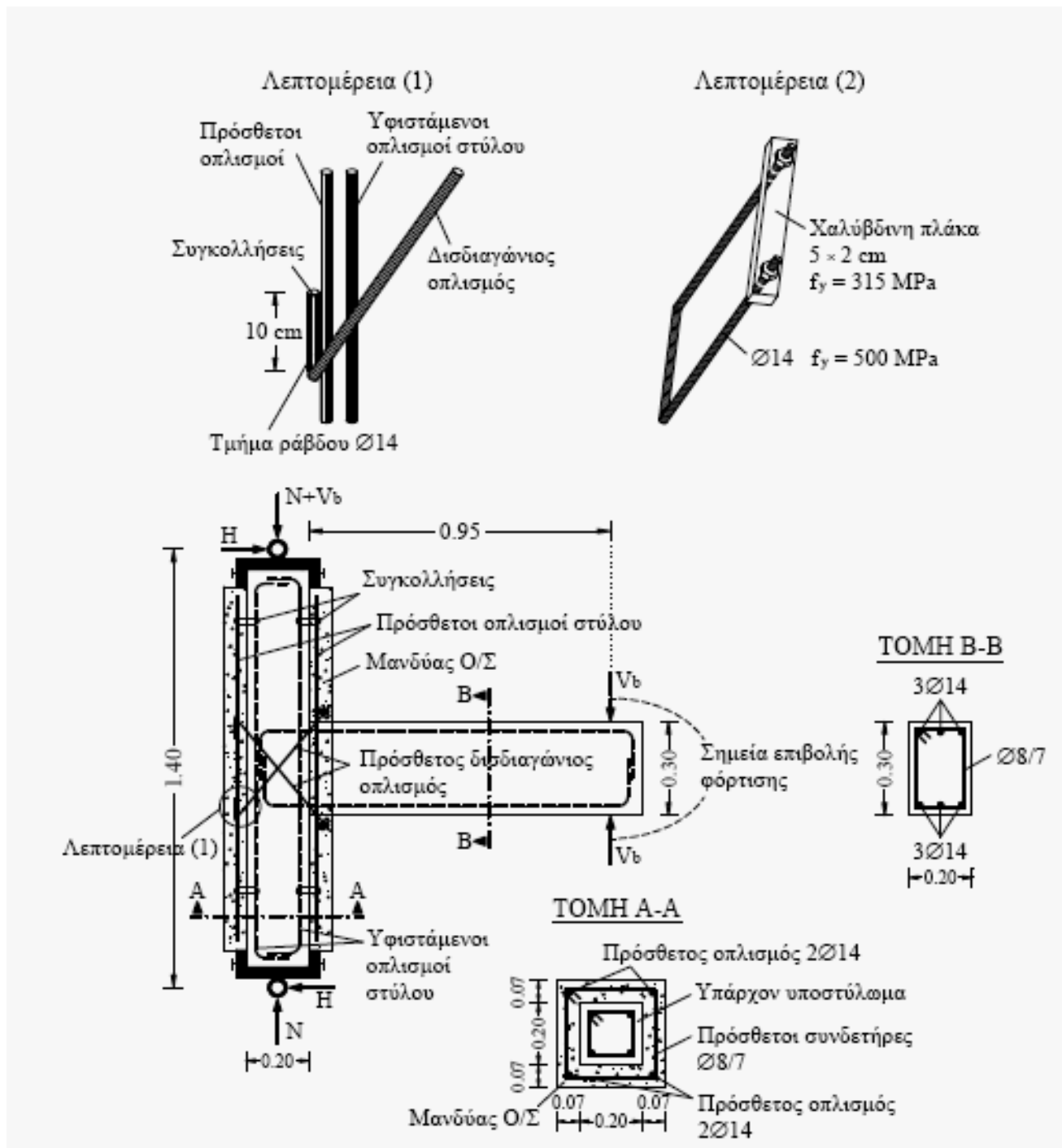




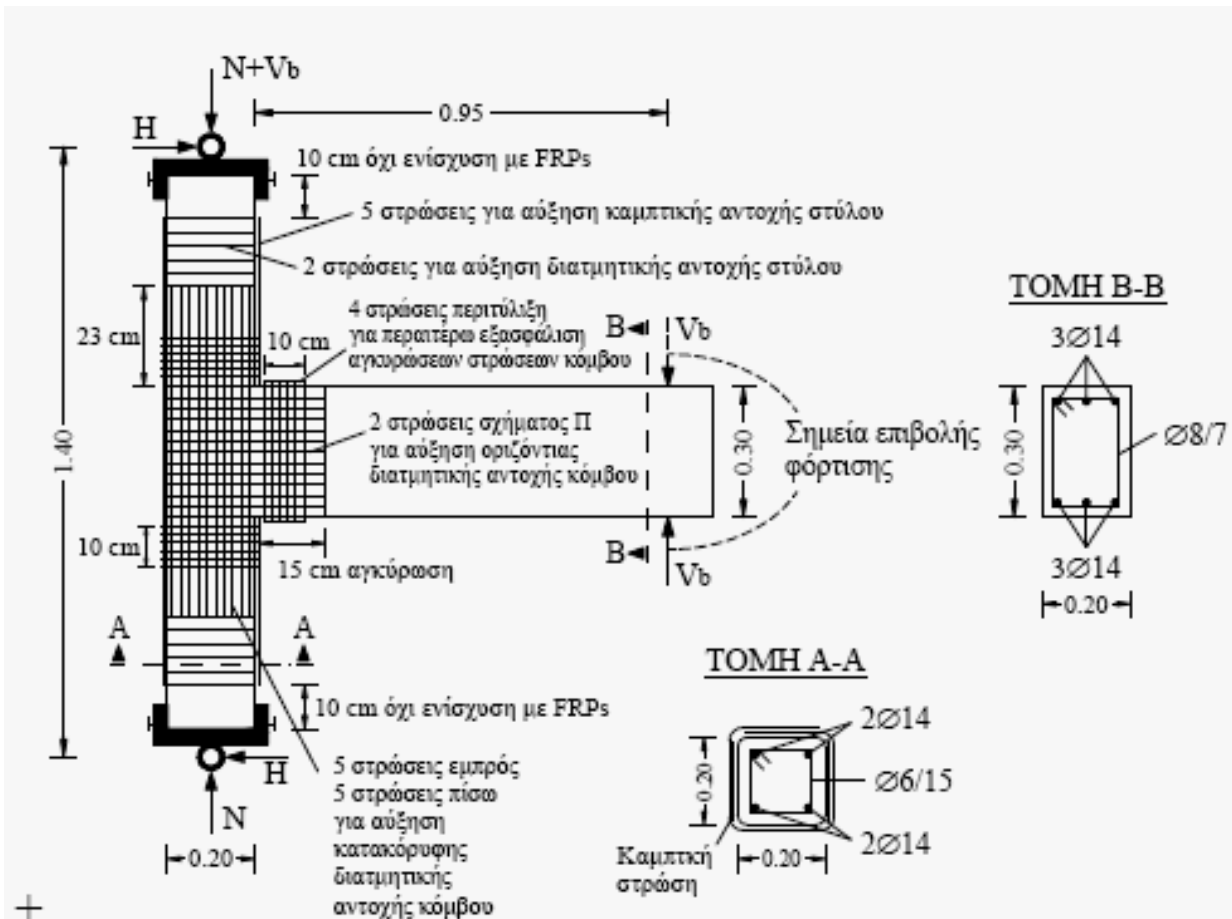
Εικόνα 44. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου HSFM2 (σε m).



Εικόνα 45. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου HSFM3 (σε m).



Εικόνα 46. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου SO1 (σε m).

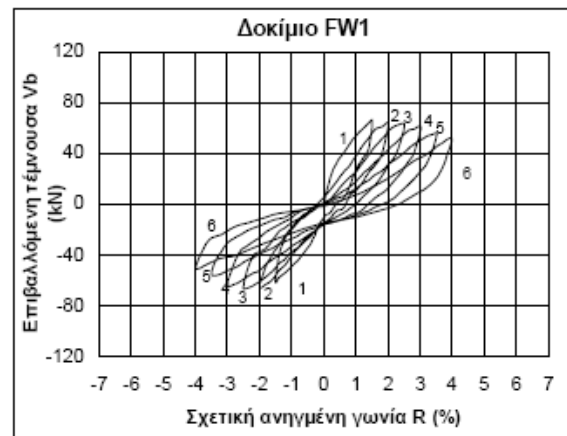
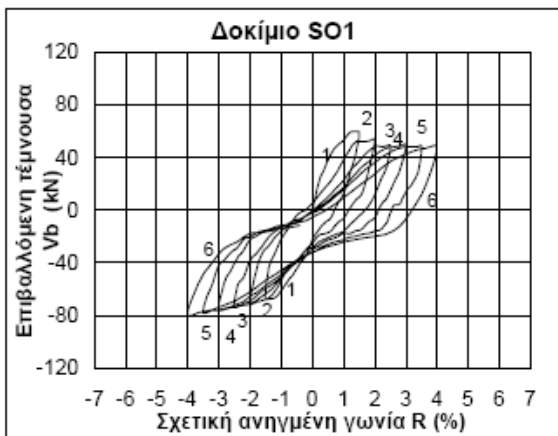


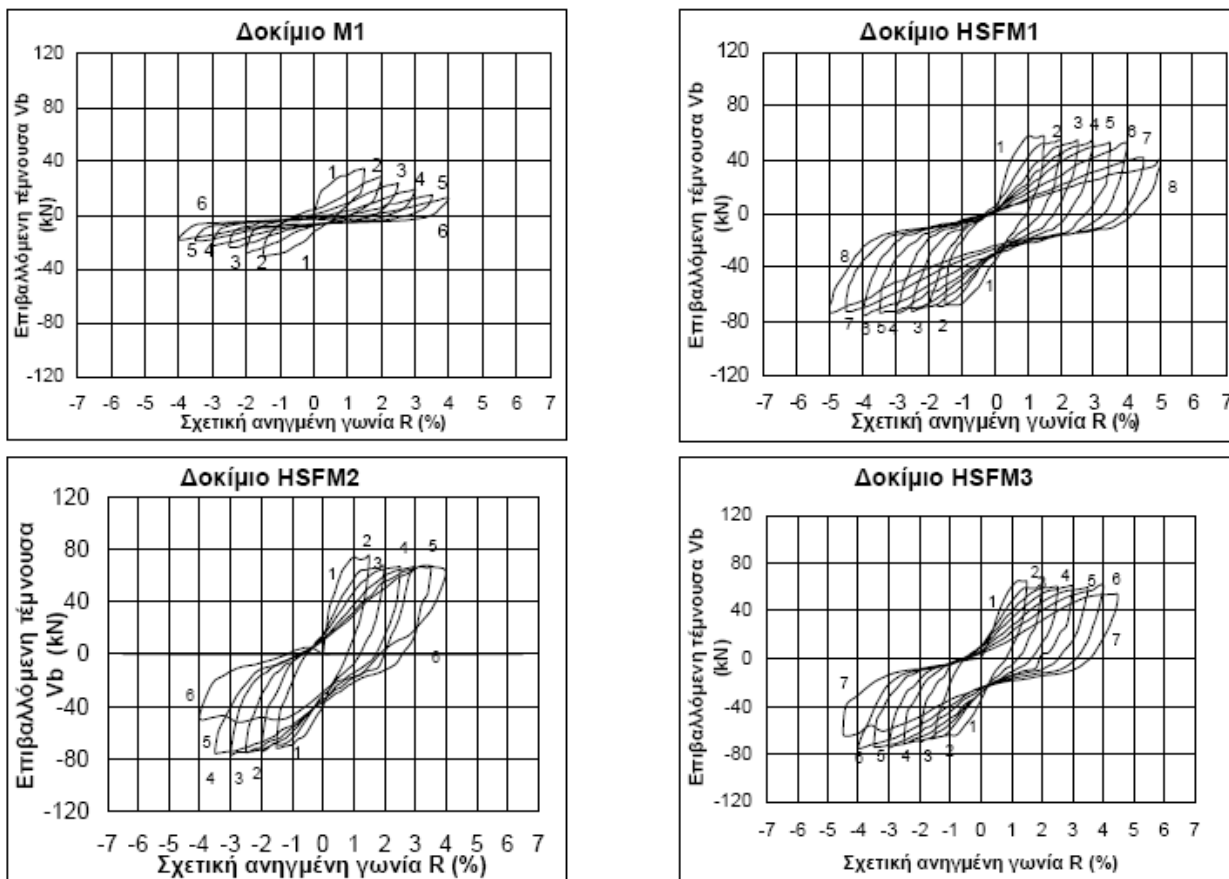
Εικόνα 47. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου FW1 (σε m).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην εικόνα 46 φαίνονται τα διαγράμματα των βρόχων υστέρησης του παρθενικού δοκιμίου M1 (που είναι όμοιοι με αυτούς των M2, M3, O1 και W1) και των ενισχυμένων με τις διάφορες μεθόδους HSFM1, HSFM2, HSFM3, SO1 και FW1.

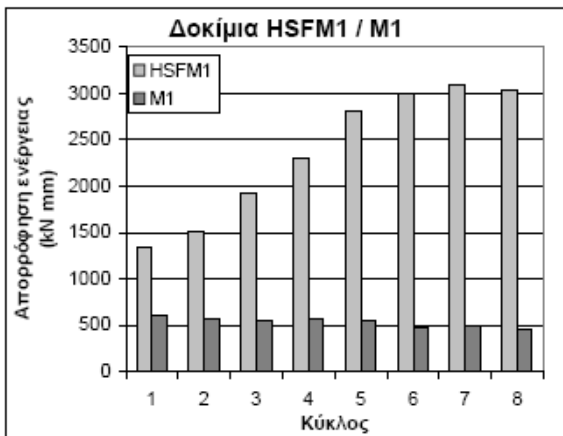
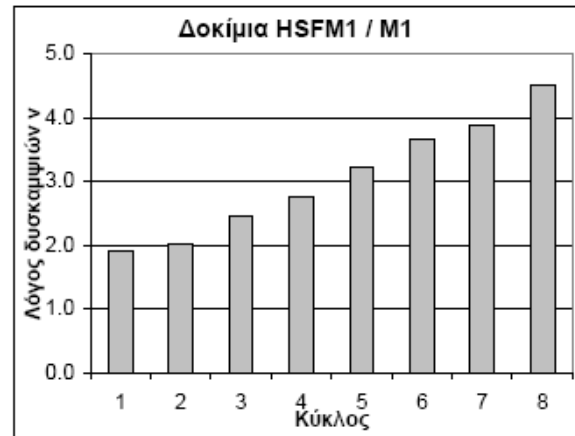
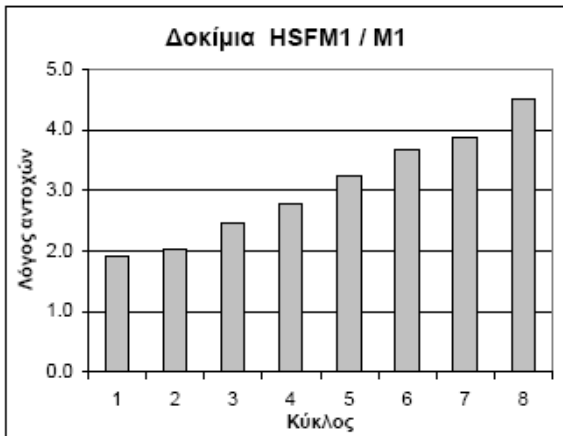
Από τη σύγκριση των βρόχων υστέρησης του αντιπροσωπευτικού παρθενικού δοκιμίου ελέγχου M1 με τους αντίστοιχους των ενισχυμένων HSFM1, HSFM2, HSFM3, SO1 και FW1 παρατηρείται ότι η σεισμική συμπεριφορά όλων των ενισχυμένων δοκιμίων είναι σαφώς βελτιωμένη σε σύγκριση με αυτήν του δοκιμίου ελέγχου M1. Εξάλλου, από το σχήμα φαίνεται ότι η σεισμική συμπεριφορά και των τριών δοκιμίων που ενισχύθηκαν με τους νέους καινοτόμους μανδύες ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως πάρα πολύ καλή καθώς οι βρόχοι είναι ατρακτοειδείς χωρίς πτώση αντοχής και χωρίς σημαντική μείωση της δυσκαμψίας και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, η δε εικόνα αστοχίας χαρακτηρίζει αστοχία δοκού. Αντίθετα, όλα τα παρθενικά δοκίμια αστόχησαν σχεδόν αμιγώς στον κόμβο και στις κρίσιμες περιοχές του στύλου - αστοχία που, σε πραγματική κατασκευή, θα οδηγούσε με μεγάλη πιθανότητα σε μερική κατάρρευση.





**Εικόνα 48.** Υστερητικοί βρόχοι φορτίου – μετατόπισης δοκιμίων M1, HSFM1, HSFM2, HSFM3, SO1 και FW1

Η σαφής βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των ενισχυμένων με τους νέους μανδύες δοκιμίων έναντι του αντιπροσωπευτικού παρθενικού δοκιμίου M1 είναι εμφανής από τη σύγκριση των υστερητικών βρόχων τους και, καλύτερα, από σύγκριση αντοχής, δυσκαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας μεταξύ των δοκιμίων M1 – HSFM1, M2 – HSFM2 και M3 – HSFM3. Για λόγους οικονομίας χώρου στα πλαίσια της παρούσας παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του δοκιμίου HSFM1, που είναι αυτό με το μικρότερο πάχος μανδύα (40 mm), σε σχέση με αυτά του παρθενικού του M1 (εικόνα 49).



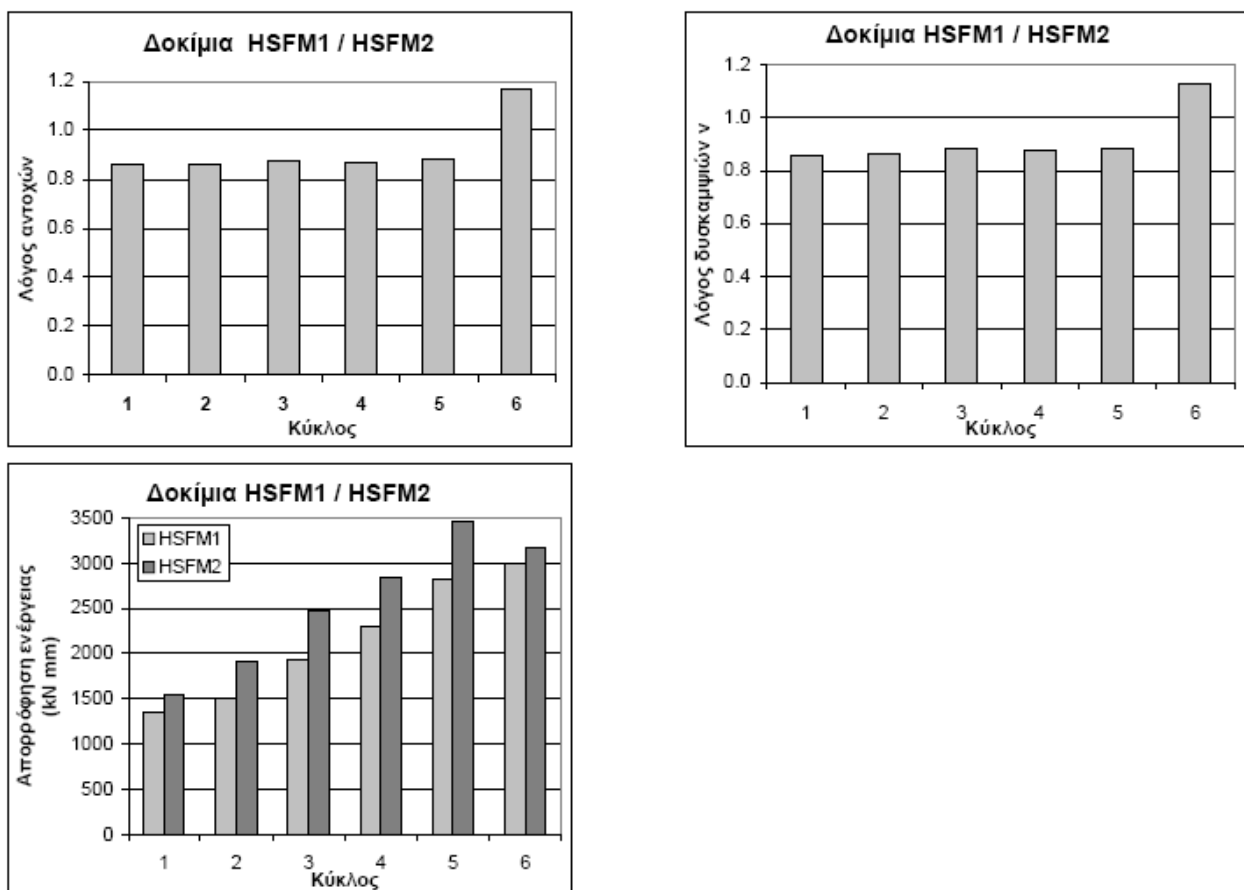
Εικόνα 49. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών HSFM1 και M1. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 49, το δοκίμιο HSFM1 που έχει ενισχυθεί μόνο με ένα μανδύα ινοπλισμένου σκυροδέματος πάχους 40 mm με ίνες χάλυβα 1.5% κ.ο. χωρίς πρόσθετο οπλισμό παρουσιάζει 92% ÷ 350% αυξημένη αντοχή, 90% ÷ 350% αυξημένη δυσκαμψία και 120% ÷ 530% μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σύγκριση με το παρθενικό δοκίμιο M1. Φαίνεται λοιπόν ότι η χρήση του νέου καινοτόμου τρόπου ενίσχυσης πολλαπλασιάζει τις τιμές όλων των κρίσιμων παραμέτρων ελέγχου της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα.

Όσον αφορά στην επιρροή του πάχους του μανδύα ινοπλισμένου σκυροδέματος και του ποσοστού των ινών, στις εικόνες 50 - 51 φαίνεται η σύγκριση των παραμέτρων ελέγχου (αντοχής, δυσκαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας) μεταξύ των δοκιμών HSFM1

– HSFM2 και HSFM1 – HSFM3 (εικόνα 51). Από την εικόνα 50 φαίνεται ότι το δοκίμιο HSFM2 (του οποίου ο μανδύας έχει πάχος 60 mm) διαθέτει, όπως

αναμενόταν, μεγαλύτερη αντοχή, δυσκαμψία και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από ό,τι το HSFM1 (με μανδύα πάχους 40 mm, 33% μικρότερο από αυτόν του HSFM2), ωστόσο οι διαφορές δεν είναι πολύ μεγάλες καθώς δεν υπερβαίνουν σε καμία περίπτωση το 20%. Εξάλλου, η συμπεριφορά του δοκιμίου HSFM3, που διαθέτει μανδύα πάχους 60 mm αλλά με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. προέκυψε τελείως αντίστοιχη με αυτήν του HSFM1 με μανδύα πάχους 40mm και ποσοστό ινών 1.5% κ.ο. . Φαίνεται ότι η μείωση κατά το ίδιο ποσοστό (στη συγκεκριμένη περίπτωση κατά 33%) του πάχους του μανδύα ινοπλισμένου σκυροδέματος είτε του ποσοστού των ινών κατ' όγκον οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα.

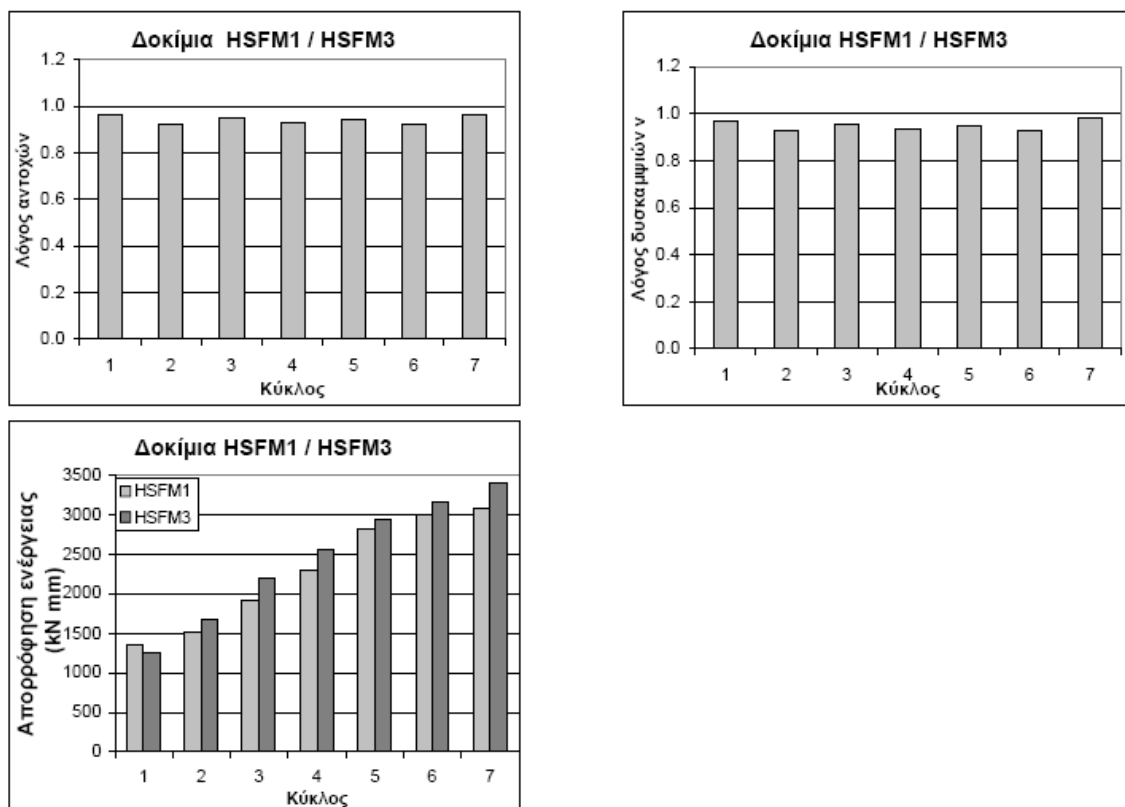


Εικόνα 50. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμίων HSFM1 και HSFM2. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

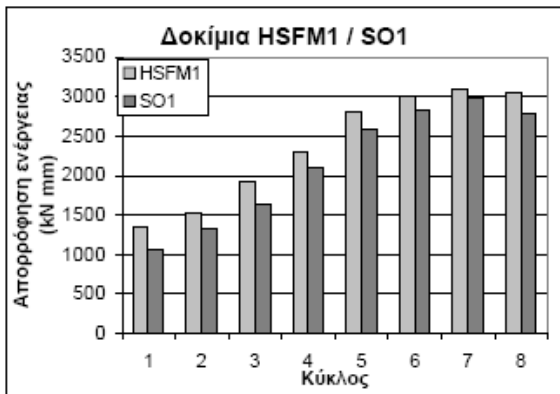
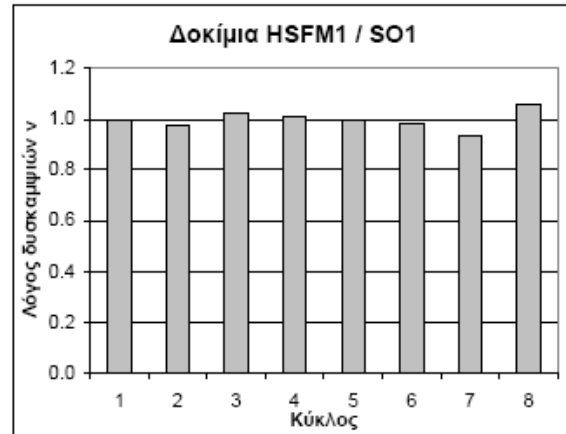
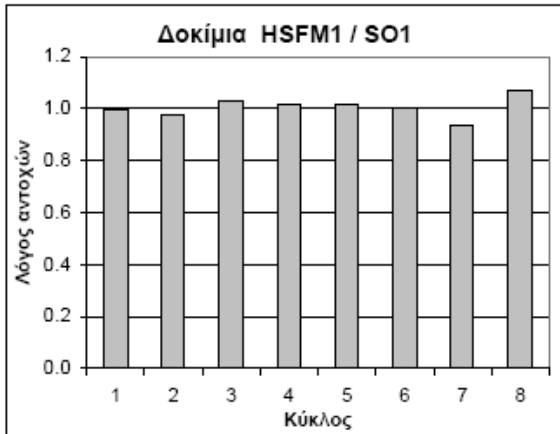
Τα ενισχυμένα με μανδύα ινοπλισμένου σκυροδέματος - όπως και όλα τα υπόλοιπα – δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας αποτελούν δομικά υποσύνολα ενός επίπεδου πλαισίου, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



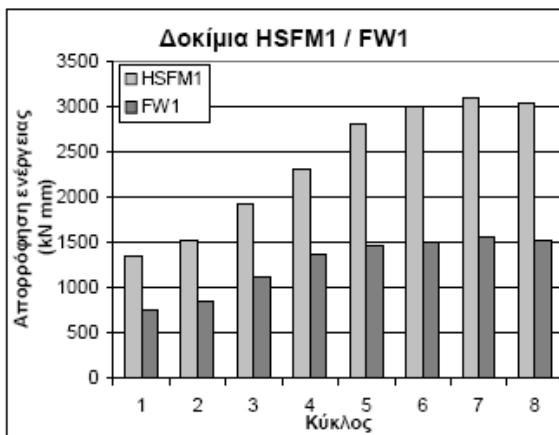
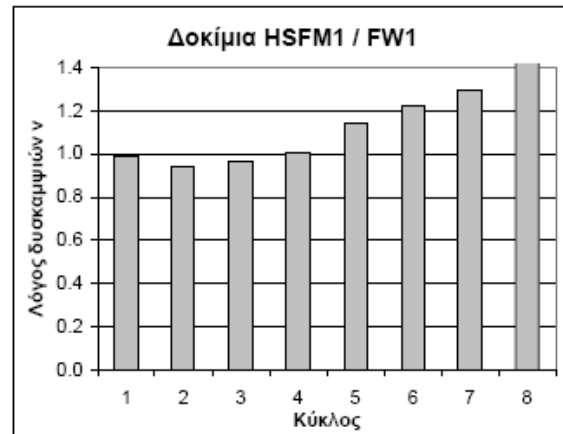
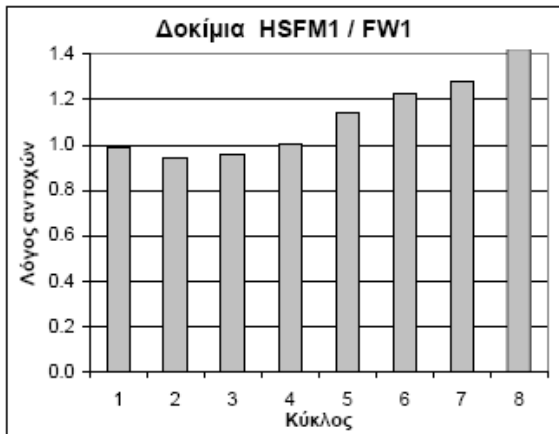
Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής αναμένεται επίσης μεγάλη και στη συνήθη περίπτωση μη επίπεδων κόμβων διότι προϋποθέτει τη διάτρηση οπών στις πλάκες και την έγχυση του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής όπως ακριβώς γίνεται και με τους συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με την τεχνική αυτήν υπάρχει συνέχεια της ενίσχυσης από όροφο σε όροφο και έτσι εξασφαλίζεται και στην πράξη η ανάληψη ορθών τάσεων – άρα πρόσθετης ροπής – όπως συμβαίνει και στους συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αναμένεται λοιπόν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των επίπεδων κόμβων της παρούσας να ισχύουν και στην περίπτωση των χωρικών πλαισίων.



Εικόνα 51. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμίων HSFM1 και HSFM3. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.



Εικόνα 52. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμίων HSFM1 και SO1. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.



Εικόνα 53. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμίων HSFM1 και FW1. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

Από υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για τα δοκίμια HSFM1, HSFM2 και HSFM3 φάνηκε ότι οι λόγοι ικανοτικού σχεδιασμού  $MR$  και οι παράμετροι  $\gamma$  κατά ACI – ASCE 352 – 2002 έχουν μεταβληθεί από τελείως δυσμενείς στα παρθενικά δοκίμια σε ιδιαίτερα ευνοϊκούς  $MR \gg 1.40$  και  $\gamma \ll 1.00$ . Έτσι οι κόμβοι και των τριών δοκιμίων, συνεπικουρούντων και των χαλύβδινων ινών, θα έπρεπε να λειτουργήσουν (και όπως αποδείχτηκε λειτούργησαν) στην ελαστική περιοχή. Βεβαίως, οι στύλοι των δοκιμίων HSFM1, HSFM2 και HSFM3 καταπονούνται με ένταση από τέμνουσα σαφώς μικρότερη από αυτήν των κόμβων (Paulay and Priestley, 1992). Έτσι, αφού οι κόμβοι λειτούργησαν ελαστικά, θα ήταν σχεδόν απίθανο να αστοχήσουν οι συντρέχοντες στύλοι, οι οποίοι τελικώς δεν παρουσίασαν καμία βλάβη, όπως άλλωστε αναμενόταν. Στη συνέχεια συγκρίνεται η σεισμική συμπεριφορά του

δοκιμίου HSFM1 με αυτήν του δοκιμίου SO1 που ενισχύθηκε με συμβατικό μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος .

Όπως φαίνεται από τις ανωτέρω εικόνες, η σεισμική συμπεριφορά των δύο δοκιμών είναι παρόμοια όσον αφορά σε όλες τις παραμέτρους ελέγχου. Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι και το δοκίμιο HSFM1 παρουσίασε αποκλειστικά αστοχία δοκού, ενώ το SO1 αστόχησε κυρίως στη δοκό, αλλά στους τελευταίους κύκλους μεγάλων παραμορφώσεων εμφάνισε τριχοειδείς ρηγματώσεις στις δύο πλευρές του κόμβου και ολική απώλεια της επικάλυψης σκυροδέματος στην τρίτη πλευρά – απέναντι από τη δοκό. Αντίθετα, το δοκίμιο FW1, που ενισχύθηκε αποκλειστικά με CFRPs, εμφάνισε μικτή αστοχία στη δοκό και στον κόμβο στους πρώτους τέσσερις κύκλους ενώ στους επόμενους παρατηρήθηκε πλήρης θραύση των φύλλων CFRPs στην περιοχή του κόμβου, αμέσως μετά τις πρόσθετες αγκυρώσεις με περιτύλιξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πρόσθετες αυτές αγκυρώσεις με περιτύλιξη δεν προβλέπονται για τις θέσεις αυτές από κανέναν κανονισμό ή συστάσεις σχεδιασμού κόμβων με FRPs αλλά επειδή δοκιμάστηκαν με επιτυχία στην εργασία Tsonos 2008 τοποθετήθηκαν από τους συγγραφείς και εδώ για περαιτέρω ασφάλεια. Παρόμοιου τύπου πρόσθετες αγκυρώσεις προτάθηκαν στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία (Antonopoulos and Triantafyllou 2003, Τριανταφύλλου 2003). Εν τούτοις πρόσθετες αγκυρώσεις με διάτρηση της πλάκας και συνεχή περιτύλιξη προτάθηκαν για πρώτη φορά διεθνώς στις εργασίες Τσώνος (2003) και Tsonos (2008). Βεβαίως, στο παρόν δοκίμιο FW1 δεν υπάρχει πλάκα και, επομένως, οι πρόσθετες αγκυρώσεις δε διαφέρουν σημαντικά από αυτές των Antonopoulos and Triantafyllou 2003 και Τριανταφύλλου 2003. Όπως φαίνεται οι πρόσθετες αυτές αγκυρώσεις λειτούργησαν κατά τρόπο ιδιαίτερα αποτελεσματικό και απέτρεψαν την αστοχία από αγκύρωση των ενισχυτικών στον κόμβο φύλλων από CFRPs. Η τελική αστοχία του δοκιμίου FW1 συγκεντρώθηκε αμιγώς στον κόμβο, το σκυροδέμα του οποίου αποδιοργανώθηκε πλήρως. Από τη σύγκριση της σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών HSFM1 και FW1 προκύπτει ότι η συμπεριφορά του HSFM1 είναι σαφώς ανώτερη από αυτήν του FW1, κυρίως μετά τον 4ο κύκλο φόρτισης, δηλαδή μετά τη θραύση των φύλλων CFRPs στην περιοχή του κόμβου.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Παρουσιάζεται για πρώτη φορά και προτείνεται ένας νέος τρόπος αντισεισμικής ενίσχυσης κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πρόκειται για την ενίσχυση κρίσιμων δομικών στοιχείων από Ο/Σ (στύλων, κόμβων) με μανδύες ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής χωρίς τη χρήση επιπλέον οπλισμού (διαμήκους οπλισμού, συνδετήρων) που απαιτείται στους συνήθεις μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.

Από την εξέταση της σεισμικής συμπεριφοράς και του τύπου αστοχίας των ενισχυμένων με μανδύες νέας γενιάς δοκιμίων ήτοι με μανδύες από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής, παρατηρείται από τα μέχρι τώρα – αρχικά – πειράματα που εκτέθηκαν εκτενώς και σχολιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες ότι οι μανδύες αυτοί είναι αρκετά αποτελεσματικοί διότι αφενός τα δομικά υποσύνολα που ενισχύθηκαν με αυτούς αστοχούν στις δοκούς όπου συγκεντρώνεται η βλάβη, αφετέρου δεν παρατηρείται αστοχία στις ευαίσθητες περιοχές στύλων και κόμβου, όπως συνέβαινε στα παρθενικά δοκίμια, αλλά και στο ενισχυμένο με συμβατικό μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή. Έτσι τα δοκίμια HSFM1, HSFM2 και HSFM3 δείχνουν μια ιδιαίτερα καλή σεισμική συμπεριφορά, πολλαπλασιάζοντας τις τιμές όλων των κρίσιμων παραμέτρων ελέγχου.

Η μείωση του πάχους του μανδύα ινοπλισμένου σκυροδέματος είτε του ποσοστού των ινών κατ' όγκον κατά το ίδιο ποσοστό φαίνεται να οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα.

Σε σύγκριση με τους συμβατικούς μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, οι μανδύες ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής αποδείχθηκαν τουλάχιστον εξίσου αποτελεσματικοί, ενώ φάνηκε η σαφής υπεροχή τους σε σχέση με τους μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs), όταν αυτοί χρησιμοποιούνται και στην περιοχή του κόμβου. Η διαφοροποίηση – μείωση του χρόνου και του κόστους επισκευής και ενίσχυσης με τη χρήση των προτεινόμενων καινοτόμων μανδύων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής σε σύγκριση με τους συμβατικούς μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος είναι προφανής εφόσον δεν απαιτείται καθόλου συμβατικός οπλισμός ενώ το πάχος του μανδύα μειώνεται κατά 35% περίπου. Να σημειωθεί εδώ ότι για την ενίσχυση με συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα, πέρα από τα υψηλά ποσοστά οπλισμών που απαιτούνται, δημιουργούνται και πολλά κατασκευαστικού τύπου προβλήματα όπως απαιτήσεις διατρήσεων, λεπτομερέστερες επίπונες και δαπανηρές συγκολλήσεις, εποξειδικές

αγκυρώσεις, καβίλιες κ.τ.λ. τα οποία ανεβάζουν σημαντικά το συνολικό κόστος της ενίσχυσης ενός κτιρίου.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, όσον αφορά στην αποδοτικότητα του νέου τρόπου ενίσχυσης, είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Ωστόσο, απαιτείται περισσότερη και σε βάθος πειραματική έρευνα προς τον τομέα αυτόν από την οποία θα προκύψει σαφής πρόταση εφαρμογής στην πράξη. Εξάλλου, για την εφαρμογή στην πράξη απαιτείται επίσης και η δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων για τον υπολογισμό των ενισχύσεων των κτιρίων Ο/Σ με τους καινοτόμους αυτούς μανδύες.



Εικόνα 54. Φωτογραφίες από εργοτάξιο που χρησιμοποιούν ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

### 4.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ , ΑΝΤΟΧΕΣ - ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Τα σκυροδέματα υπερυψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται την τελευταία δεκαετία σε πολλές χώρες του εξωτερικού με επιτυχία. Στην Ελλάδα, τα πρώτα βήματα για την παραγωγή σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας έχουν ήδη γίνει από την εταιρεία ΑΓΕΤ-Ηρακλής, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που συγχρηματοδοτείται από τη Γ.Γ.Ε.Τ, την ΑΓΕΤ-Ηρακλής και την CUBUS Hellas και υλοποιείται σε συνεργασία με το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Το υλικό που αναπτύσσεται στα πλαίσια του προαναφερθέντος προγράμματος είναι ινοπλισμένο κονίαμα θλιπτικής αντοχής της τάξης των 110Μpa και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό.

Στους νέους Γερμανικούς κανονισμούς DIN 1045-1 καλύπτονται οι κατηγορίες σκυροδεμάτων αντοχής C55/67 έως C110/115. Κατά την εφαρμογή τους προστίθενται σε πολλές περιπτώσεις ίνες χάλυβα ή συνθετικών υλικών προς βελτίωση των ιδιοτήτων

τους. Οι διαφορές που παρουσιάζουν ως προς τα σκυροδέματα συμβατικών αντοχών, αφορούν κυρίως στο ύψος της θλιπτικής και εφελκυστικής τους αντοχής, στη μειωμένη πλαστιμότητα σε θλίψη, στην αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε εφελκυσμό λόγω των ινών, και την αυξημένη αντοχή υπό συγκεντρωμένα φορτία (βλήτρα, αγκυρώσεις, φορτία προέντασης κ.α).

Τα μηχανικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό σε κάμψη, με ή χωρίς αξονικό φορτίο, σε διάτμηση / στρέψη, σε διάτρηση, σε συνάφεια του οπλισμού, σε περίσφιγξη και σε ρηγμάτωση, δε διαφέρουν ποιοτικά από αυτά που χρησιμοποιούμε για το κοινό σκυρόδεμα.

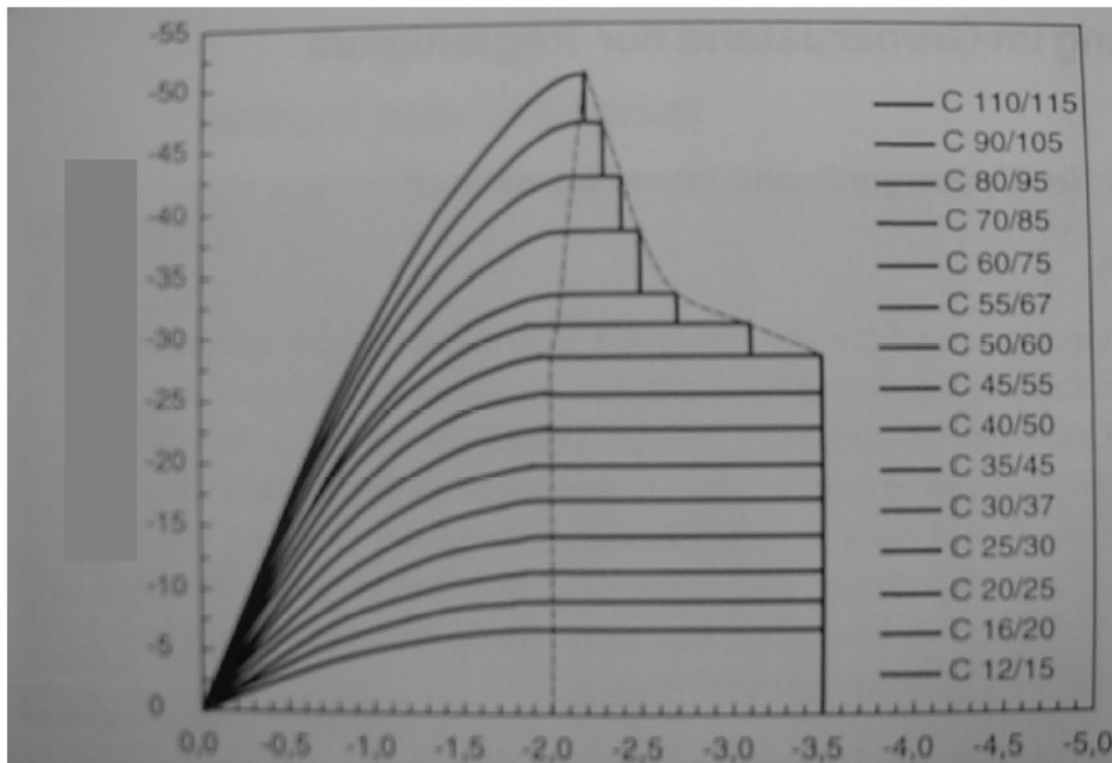
Διαφέρουν όμως ως προς τις ποσοτικές παραμέτρους και οδηγούν σε πολύ διαφορετικά και άκρως ενδιαφέροντα για την πράξη αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στα παραπάνω μηχανικά προσομοιώματα και μεθόδους υπολογισμού, θα αναλυθούν οι παράμετροι που

χαρακτηρίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των σκυροδεμάτων υπερυψηλής αντοχής και θα εξαχθούν μερικοί αναλυτικοί τύποι για την εφαρμογή τους σε μελέτες της καθημερινής πράξης.

#### Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Η οριακή βράχυνση του C100/115 περιορίζεται σε περίπτωση κάμψης με αξονική ή και ομοιόμορφη θλίψη στην τιμή  $\varepsilon_{c2u}=\varepsilon_{c2}=-2.2\%$ . Ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού λαμβάνεται αυξημένος ως γινόμενο  $\gamma_c \cdot \gamma'_c=1.67$  ενώ του χάλυβα παραμένει στη γνωστή τιμή  $\gamma_s=1.15$ . Ο νόμος του υλικού εμφανίζει μειωμένη πλαστιμότητα, σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα :



Εικόνα 55. Τάση σκυροδέματος  $\sigma_{cd}$  [N/mm<sup>2</sup>] συναρτήσει της βράχυνσης σκυροδέματος  $\varepsilon_c$  [‰]

Χαρακτηριστική είναι η φαθυρή αστοχία υπό θλίψη του C100/115. Μετά την υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής και υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζεται επιβαλλόμενη (ελεγχόμενη) παραμόρφωση, εμφανίζεται απότομα φθίνων κλάδος, δείγμα υψηλής φαθυρότητας. Τα συμβατικά σκυροδέματα C12/15 έως C50/60

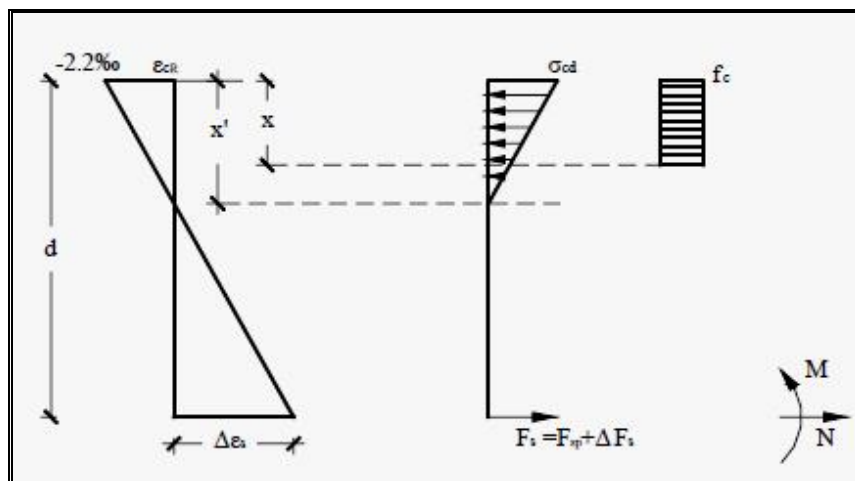


διαστασιολογούνται με τον ίδιο νόμο υλικού, παραβολή – ευθεία με κοινά όρια βράχυνσης  $-2\text{‰}$  και  $-3.5\text{‰}$ , ανεξάρτητα ύψους αντοχής. Στα Σ.Υ.Ε C55/67 έως C110/115 αλλάζει ο νόμος υλικού ανάλογα με την αντοχή και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέον τα υπάρχοντα νομογραφήματα και οι πίνακες, διότι δεν αρκεί η αναγωγή στην αντοχή σχεδιασμού  $f_{cd}$ . Για κάθε κατηγορία αντοχής απαιτούνται νέοι πίνακες και νομογραφήματα (π.χ. διαγράμματα αλληλεπίδρασης).

Σε ορθογωνικές διατομές η αύξηση της αντοχής σε απλή κάμψη (χωρίς αξονική) δεν είναι ανάλογη της κατηγορίας αντοχής του υλικού, διότι μειώνεται και ο βαθμός πληρότητας του στερεού των θλιπτικών τάσεων (νόμος υλικού) και αυξάνεται ο συντελεστής ασφάλειας του υλικού από 1.50 σε 1.67. Σε διατομές με πέλματα και κορμούς (T, I, κιβώτια) η εφαρμογή των Σ.Υ.Ε είναι πιο αποτελεσματική στην αύξηση της αντοχής. Η υψηλή τάση στη θλιβόμενη ζώνη είναι περίπου σταθερή και αυξάνεται ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων.

Σε περίπτωση αξονικής δύναμης, έκκεντρης, δεν υπάρχει μεγάλη δυνατότητα ανακατανομής της θλίψης προς λιγότερο καταπονούμενες περιοχές, λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του υλικού. Η χρήση ινών και η περίσφιγξη βελτιώνουν τη συμπεριφορά. Σε περίπτωση προέντασης επίσης εμφανίζεται αύξηση της αντοχής σε κάμψη, λόγω της προμήκυνσης του χάλυβα, που οδηγεί σε ανάληψη ροπής χωρίς, να απαιτείται σοβαρή καμπύλωση της θλιβόμενης ζώνης.

Για υπολογισμούς με το χέρι μπορούν να γίνουν κάποιες απλοποιητικές παραδοχές :



Εικόνα 56. Τάσεις και παραμορφώσεις διατομής

$$X = (2/3) * x \quad (1)$$

$$X' < d \rightarrow 3 * (x/2) < d \rightarrow x/d < 2/3 \quad (2)$$

Μετατροπή σε ορθογωνική κατανομή :

$$\sigma_{cd} * X' * (1/2) = f_c * x = f_c * (2/3) * x' \rightarrow$$

$$f_c = \sigma_{cd} * (1/2) * (3/2) = \sigma_{cd} * (3/4) \quad (3)$$

$$\sigma_{cd} = [f_{ck} / \gamma_c * \gamma_c'] * 0,85 = (100 / 1,67) * 0,85 = 51 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

$$f_c = 51 * (3/4) = 38,25 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Επιπεδότητα διατομών : } \Delta_{ES} / d - x' = 2,2 / x' \rightarrow \Delta_{ES} = 2,2 * (d - x' / x') \text{ ‰} = 1,47 * \\ (d/x) - 2,2 \text{ ‰} \end{aligned} \quad (6)$$

Το σημείο που αρχίζει να είναι κρίσιμο το σκυρόδεμα υπολογίζεται ως εξής :

$$\Delta_{ES} = \Delta_{ESy} = 2,5 / \gamma_s \text{ ‰} \quad (s500) \quad (7)$$

$$(6) , (7) \rightarrow 2,17 = 1,47 * (d/x) - 2,2 \rightarrow x / d = 0,34$$

$$\text{Ο λόγος } \Delta_{ES} / \Delta_{ESy} = \kappa \leq 1 \quad (8)$$

Ονομάζεται συντελεστής εκμετάλλευσης του οπλισμού

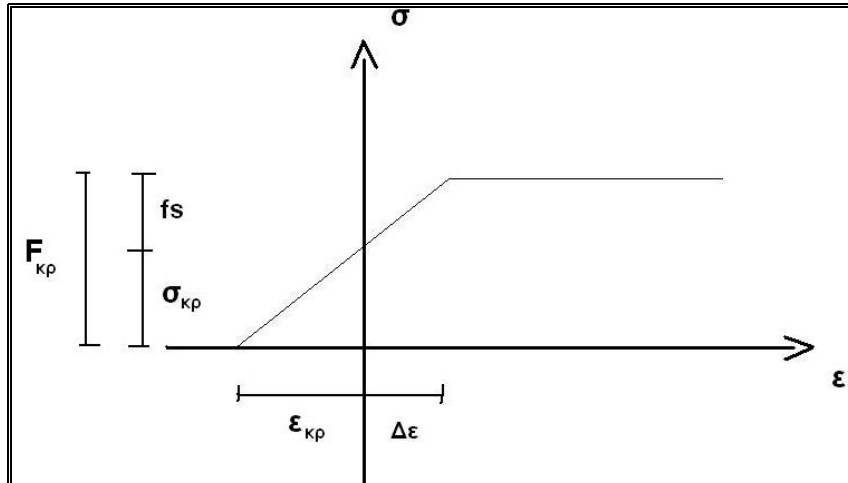
$\kappa < 1$  : υπεροπλισμένα στοιχεία  $\rightarrow$  κρίσιμη η θραύση του σκυροδέματος

$\kappa = 1$  : υποοπλισμένα στοιχεία  $\rightarrow$  κρίσιμη η διαρροή του χάλυβα

Δύο πρόσθετα αδιάστατα μεγέθη που εισάγονται για απλοποίηση είναι τα εξής :  
Μηχανικό ποσοστό οπλισμού :

$$\omega = A_s \cdot f_s / b \cdot d \cdot f_c \quad (9)$$

$$\text{Βαθμός προέντασης} : \lambda = F_{κρ} / b \cdot d \cdot f_c = \sigma_{κρ} \cdot A_{κρ} / b \cdot d \cdot f_c \quad (10)$$



Εικόνα 57. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων προεντεταμένου οπλισμού

Μέσω διατύπωσης των σχέσεων ισορροπίας έχουμε :

$$\text{(ροπών)} \quad M = x \cdot b \cdot f_c \cdot (d - x/2) \quad (11)$$

$$\text{Ή αδιάστατα} \quad M / b \cdot d^2 \cdot f_c = m = x / d \cdot (1 - x / 2 \cdot d) \quad (12)$$

$$\text{(αξονικών)} \quad N = F_{κρ} + \Delta F_s - x \cdot b \cdot f_c \quad (13)$$

Ή αδιάστατα

$$N / b \cdot d \cdot f_c = n = (F_{κρ} / b \cdot d \cdot f_c) + (\Delta F_s / b \cdot d \cdot f_c) - (x \cdot b \cdot f_c / b \cdot d \cdot f_c)$$

$$\rightarrow n = \lambda + \kappa \cdot \omega - (x / d) \rightarrow x / d = \lambda + \kappa \cdot \omega - n \quad (14)$$

## Έλεγχος τύπου αστοχίας :

Δίδεται  $n$  ,  $\lambda$  ,  $\omega$  , υποθέτουμε  $\kappa = 1$  και υπολογίζουμε τον λόγο  $x/d$  :

$$x / d = \lambda + \kappa * \omega - n$$

Ελέγχουμε αν  $\kappa \geq 1$

Εάν  $\kappa < 1$  δεν ισχύει η αρχική υπόθεση και δεν ισχύει ο υπολογισμός του λόγου  $x/d$  (υπεροπλισμένη διατομή) .

Εάν  $\kappa \geq 1$  η αρχική υπόθεση είναι ορθή και ισχύει ο υπολογισμός του λόγου  $x/d$  (υποοπλισμένη διατομή) .

Στην περίπτωση υπεροπλισμένων διατομών , όπου ισχύει  $\kappa < 1$  ο υπολογισμός του  $x/d$  μπορεί να γίνει ως εξής :

$$n - \lambda = \omega * \kappa - x/d = \omega [ ( 1,47 * d / x ) - 2,2 ] * 1 / \epsilon_{sy} (\text{\%}) - (x/d)$$

Και θέτοντας  $\omega^* = \omega / \epsilon_{xy} \text{\%}$  έχουμε από την λύση της εξίσωσης δευτέρου βαθμού :

$$x/d = [ \{ (n - \lambda + 2,2 * \omega^*)^2 / 4 \} + 1,5 * \omega^* ]^{1/2} - (n - \lambda + 2,2 * \omega^*) / 2 \quad (15)$$

Η ροπή  $m$  που αναλαμβάνεται δίδεται και στις δύο περιπτώσεις από τον τύπο (16) .

$$m = ( x / d ) * [ 1 - (x / 2 * d) ] \quad (16)$$

Μέσω παρατήρησης του τύπου  $n = \lambda + \kappa * \omega - x / d$  διαπιστώνουμε ότι σε περίπτωση προεντεταμένου οπλισμού για  $\kappa = 1$  το άθροισμα  $\lambda + \omega$  ισούται με :

$$\lambda + \omega = ( F_{kr} / b * d * f_c ) + ( A_s * f_s / b * d * f_c ) = [ ( \sigma_{kr} + f_s ) * A_s / b * d * f_c ] \rightarrow$$

$$( A_s * f_{kr} / b * d * f_c ) \quad (17)$$

Επομένως δεν επηρεάζει η προένταση την ροπή διαρροής , όπως ισχύει και στην θεωρία πλαστικότητας για τις αυτεντατικές καταστάσεις. Εφόσον το  $\kappa < 1$  (υπεροπλισμένα στοιχεία) , παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο είναι μεγαλύτερο όταν

ο οπλισμός είναι προεντεταμένος παρά όταν είναι χαλαρός . Η αύξηση αυτή είναι για συνήθους βαθμούς προέντασης  $\lambda=0,10$  έως  $0,40$  μικρότερη από  $10 \%$  και δεν έχει πρακτική σημασία.

### Διάτμηση

Οι διαφορές αντοχής σε περίπτωση χρήσης C100/115 έναντι συμβατικού σκυροδέματος, εμφανίζονται στις περιπτώσεις που ενεργοποιείται η εφελκυστική (διατμητική) αντοχή του μπετόν, δηλαδή σε στοιχεία χωρίς οπλισμό συνδετήρων αφενός (π.χ. σε πλάκες διάτμηση/διάτρηση) και αφετέρου εκεί όπου υπάρχει έντονη θλίψη, (σε στύλους ή σε περιοχές έμμεσης στήριξης ή σε λεπτούς κορμούς).

Συγκεκριμένα στο DIN 1045-1 η αντοχή σε διάτμηση χωρίς συνδετήρες δίδεται από τον τύπο :

$$V_{Rd,ct} / b_w * d = 0,10 * k * ( 100 * \rho_1 * f_{ck} )^{1/3}$$

$$\text{Όπου : } f_{ck} \leq 100 \text{ N / mm}^2$$

$$\rho_1 = A_s / ( b_w * d ) \leq 0,02 \text{ γεωμετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \text{ [mm] συντελεστής μεγέθους}$$

Σε περίπτωση ταυτόχρονης θλίψης ή δύναμης προέντασης ο τύπος γίνεται :

$$V_{Rd,ct} / b_w * d = 0,10 * k * ( 100 * \rho_1 * f_{ck} )^{1/3} - 0,12 * \sigma_{cd}$$

$$\text{όπου : } \sigma_{cd} = N_{sd} / A_c \text{ [N / mm}^2 \text{]}$$

$N_{sd}$  : αξονική δύναμη ( $N_{sd} < 0$  για θλίψη και δυνάμεις προέντασης)

Σε περίπτωση διάτρησης πλακών , χωρίς οπλισμό συνδετήρων ο τύπος γίνεται :

$$V_{Rd,ct} / d * u = V_{Rd,ct} / d = 0,14 * k * (100 * \rho_1 * f_{ck})^{1/3} - 0,12 * \sigma_{cd}$$

Η θλιπτική τάση των διαγωνίων θλιπτήρων εξαρτάται από τη γωνία  $\theta$  του θλιπτικού πεδίου. Δίνεται από τον τύπο (οπλισμός εγκάρσιων συνδετήρων) :

$$\sigma_c = (2 * \tau) / 2 * \sin\theta * \cos\theta = (2 * \tau) / \sin 2\theta \leq \alpha_c * f_{cd}$$

όπου :  $\alpha_c = 0,75$

$$\tau \leq (\alpha_c * f_{cd} * \sin 2\theta) / 2$$

για  $\theta = 27^\circ$   $\tau \leq (0,75 * 0,81 * f_{cd}) / 2 = 0,30 * f_{cd}$

για  $\theta = 45^\circ$   $\tau \leq (0,75 * 1,00 * f_{cd}) / 2 = 0,375 * f_{cd}$

## 4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ως σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (Σ.Υ.Ε.), χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε σκυρόδεμα ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια που προτείνονται προκειμένου να αρθούν οι περιορισμοί των συμβατικών σκυροδεμάτων. Η κατηγορία των σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας περιλαμβάνει σκυροδέματα που παρέχουν βελτιωμένη αντοχή στις περιβαλλοντικές επιρροές, αισθητά αυξημένες αντοχές, ανθεκτικότητα στο χρόνο κλπ. Επίσης περιλαμβάνει σκυροδέματα που μειώνουν σημαντικά το χρόνο κατασκευής και επιτρέπουν την ταχύτερη επισκευή υφιστάμενων στοιχείων. Επομένως δεν είναι δυνατό να δοθεί ένας μοναδικός ορισμός των Σ.Υ.Ε. χωρίς να εξετασθούν όλα τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που καθορίζουν την επιτελεστικότητα του σκυροδέματος.

Ο Forster (Foster 1994) όρισε το Σ.Υ.Ε. ως «ένα σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με κατάλληλα υλικά που συνδυάζονται σύμφωνα με ένα επιλεγμένο σχέδιο μιγμάτων και αναμιγνύονται κατάλληλα, μεταφέρονται, τοποθετούνται, στερεοποιούνται, και συντηρούνται, έτσι ώστε το προκύπτον υλικό να επιδείξει άριστη απόδοση στην κατασκευή για την οποία προορίζεται και για τα φορτία στα οποία θα υποβληθεί για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής του». Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών το ενδιαφέρον βαθμιαία έχει μετατοπιστεί από τη θλιπτική δύναμη σε άλλες ιδιότητες του υλικού, όπως το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, η υψηλή πυκνότητα, η χαμηλή διαπερατότητα και η αντίσταση σε διάφορες μορφές προσβολής (Aitcin και Neville 1993). Ένας ευρύτερος ορισμός του Σ.Υ.Ε. υιοθετήθηκε από το American Concrete Institute. Το Σ.Υ.Ε. ορίστηκε ως το σκυρόδεμα που καλύπτει τις ειδικές απαιτήσεις απόδοσης και ομοιομορφίας που δεν μπορούν πάντα να επιτευχθούν με τη χρήση μόνο των συμβατικών υλικών.

Οι απαιτήσεις μπορούν να περιλάβουν βελτίωση διάφορων χαρακτηριστικών όπως π.χ. της σκυροδέτησης χωρίς διαχωρισμό, τις μακροπρόθεσμες μηχανικές ιδιότητες, την πρόωρη αντοχή, τη σταθερότητα του όγκου, ή το χρόνο ζωής σε δύσκολες συνθήκες περιβάλλοντος. Τα σκυροδέματα που διαθέτουν πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά επιτυγχάνουν συχνά και την υψηλότερη αντοχή. Επομένως τα

Σ.Υ.Ε. είναι συχνά υψηλής αντοχής, αλλά το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής μπορεί να μην είναι απαραίτητως υψηλής επιτελεστικότητας.

Στο εξωτερικό, τα σκυροδέματα υψηλής επιτελεστικότητας έχουν αποκτήσει ευρύτατη χρήση εδώ και αρκετές δεκαετίες. Στην Ελλάδα, τα πρώτα βήματα για την παραγωγή σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας έχουν ήδη γίνει από την εταιρεία ΑΓΕΤ-Ηρακλής, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που συγχρηματοδοτείται από τη Γ.Γ.Ε.Τ, την ΑΓΕΤ-Ηρακλής και την CUBUS Hellas και υλοποιείται σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το υλικό που αναπτύσσεται στα πλαίσια του προαναφερθέντος προγράμματος είναι ινοπλισμένο κονίαμα θλιπτικής αντοχής της τάξης των 110Μpa και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό. Οι εφαρμογές του θα παρουσιασθούν επιγραμματικά παρακάτω:

- Προκατασκευή λυγηρών στύλων .
- Προκατασκευασμένα στοιχεία με ή χωρίς προένταση.
- Σύμμικτες κατασκευές.
- Ενίσχυση και αποκατάσταση φορέων μέσω εφαρμογής μανδύων μικρών παχών με υψηλή αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, ενίσχυση διατομών ή προσθήκη οπλισμών μέσω συνάφειας και πρόσφυσης.

Επιπροσθέτως το συγκεκριμένο υλικό μπορεί να βρει και άλλες εφαρμογές όπως :

- Σε περιοχές εισαγωγής συγκεντρωμένων δυνάμεων (προένταση) όπου εμφανίζονται υψηλές τάσεις διάρρηξης.
- Σε επικαλύψεις έναντι διαβρωτικών μέσων (σωλήνες, σήραγγες, φρεάτια).
- Σε εφαρμογές προστασίας από εκρηκτικές ύλες όπου απαιτείται υψηλή εφελκυστική αντοχή.



## 4.3 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΠΕΡΙΕΚΤΗΚΟΤΗΤΑ ΤΕΦΡΑΣ

Από την Καθ. κ. **Ι. Παπαγιάννη** και τον κ. **Ε. Αναστασίου**  
Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ως σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (HSC) θεωρείται σήμερα το σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή χαρακτηριστικής αντοχής  $f_{ck}$  από 60 MPa έως 130 MPa με λόγο νερού / τσιμέντου κάτω από 0.40. Υψηλότερες αντοχές της τάξεως των 200MPa αναφέρονται επίσης στη βιβλιογραφία . Το ενδιαφέρον για υψηλής αντοχής σκυρόδεμα εμφανίζεται τις τελευταίες δεκαετίες του παρελθόντα αιώνα όπου συνέβη αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας σκυροδέματος με την εισαγωγή στη βιομηχανία του σκυροδέματος των ρευστοποιητών και των τεχνικών μεταφοράς και διάστρωσης. Τα υψηλά κτίρια, οι παρά τη θάλασσα κατασκευές απαιτούν οικονομικές διατομές και υψηλή ανθεκτικότητα με εγγυημένο ωφέλιμο χρόνο ζωής. Έτσι, το 1960, υψηλής αντοχής εθεωρείτο το σκυρόδεμα αντοχής 40-50MPa. Το 1970 το όριο που επιτεύχθηκε ήταν 60MPa. Σήμερα σκυρόδεμα πάνω από 100MPa προδιαγράφεται σε έργα γεφυροποιίας. Η χρήση HSC επιτρέπει σημαντική μείωση των διαστάσεων των υποστυλωμάτων που αποδίδει μέχρι και 30% επιπλέον διαθέσιμο χώρο στα parking των υψηλών κτιρίων καθώς επίσης και τη μείωση του αριθμού των μεσαίων δοκών στην κατασκευή γεφυρών. Στις παραθαλάσσιες κατασκευές το HSC εξασφαλίζει πάνω από 100 χρόνια ωφέλιμο χρόνο ζωής.

Χαρακτηριστικό είναι ότι για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα δεν απαιτούνται διαφορετικά από τα συμβατικά υλικά παρά μόνο καλύτερος ποιοτικός έλεγχος όλων των υλικών και όλων των σταδίων παραγωγής και εφαρμογής του σκυροδέματος. Τόσο στον Καναδά όσο και στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη τα σκυροδέματα αυτά παράγονται με τη χρήση συμπληρωματικών του τσιμέντου πουζολανικού χαρακτήρα υλικών όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες, οι σκωρίες, η πυριτική παιπάλη ή και συνδυασμοί αυτών . Τη δεκαετία του '80 αναπτύσσεται από το ερευνητικό κέντρο CANMET το υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα σκυρόδεμα με τουλάχιστον 50% αντικατάσταση τσιμέντου με μη ασβεστούχα τέφρα.

Οι πρώτοι κανονισμοί για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα θεσμοθετούνται στη Νορβηγία NS 3473-1989. Σήμερα η παραγωγή και ο έλεγχος καλύπτονται από

οδηγίες και προδιαγραφές όπως είναι τα CSA Standard A23.3 1994 και οι οδηγίες της ACI Committee ACI 363 2R-98 .

Στόχος της πειραματικής αυτής εργασίας ήταν να επιτευχθεί υψηλής αντοχής εμπορικό σκυρόδεμα που να μπορεί να παραχθεί με συμβατικά υλικά στις βιομηχανίες σκυροδέματος με την προσθήκη υψηλού ποσοστού επεξεργασμένης ασβεστούχας τέφρας της ευρύτερης περιοχής της Πτολεμαΐδας. Επιλέχθηκε ένα επιθυμητό επίπεδο εργασιμότητας S2 (7-9cm) για όλες τις συνθέσεις που θα μπορούσε να εφαρμοσθεί σε βιομηχανία προκατασκευασμένων στοιχείων ή προϊόντων όπως είναι οι σωλήνες από σκυρόδεμα. Στο πρώτο στάδιο της έρευνας μελετήθηκαν τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αυτού υψηλής αντοχής 150MPa με υψηλό ποσοστό τέφρας.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκυροδετήθηκαν 6 διαφορετικές συνθέσεις με συνολικό ποσό συνδετικών κοινών 600-700 kg/m<sup>3</sup>. Για κάθε σύνθεση κατασκευάστηκαν 10 κύλινδροι 15x30 cm, πέντε κύβοι 15x15x15 cm και 5 πρισματικά δοκίμια 10x10x40 cm προκειμένου να γίνει προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σε διάφορες ηλικίες, εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη και κάμψη καθώς και προσδιορισμός του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

Αδρανή Αθροιστικό διερχόμενο (%)	Μέγεθος κόκκων (mm)					
	0,25	1,0	2,0	4,0	8,0	16
Άμμος ποταμού	8,61	62,82	84,60	97,77	100	100
Ρύζι	2,25	2,50	3,00	25,75	100	100
Γαρμπίλι	1,61	1,81	2,47	3,46	32,08	100
Μίγμα						
40% άμμος	3,444	25,128	33,84	39,108	40,00	40,00
20% Ρύζι	0,450	0,500	0,600	5,150	20,00	20,00
40% Γαρμπίλι	0,660	0,724	0,988	1,384	12,832	40,00
Προκύπτουσα καμπύλη	4,55	26,352	35,42	45,642	72,83	100,00
Επιδιωκόμενη καμπύλη	7,00	20,00	30,00	45,00	70,00	100,00

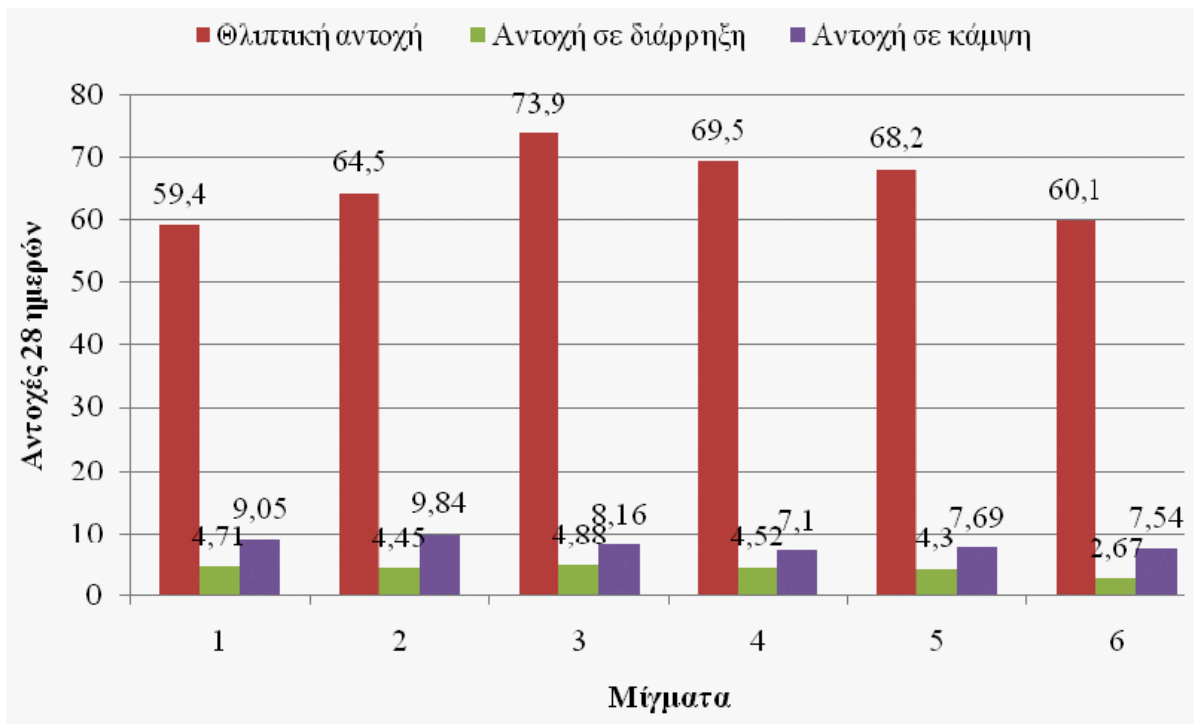
Πίνακας 22. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η επιρροή του συνολικού ποσού κονίας, το ποσοστό της τέφρας και ο λόγος νερού/τσιμέντο για το επιθυμητό επίπεδο εργασιμότητας.

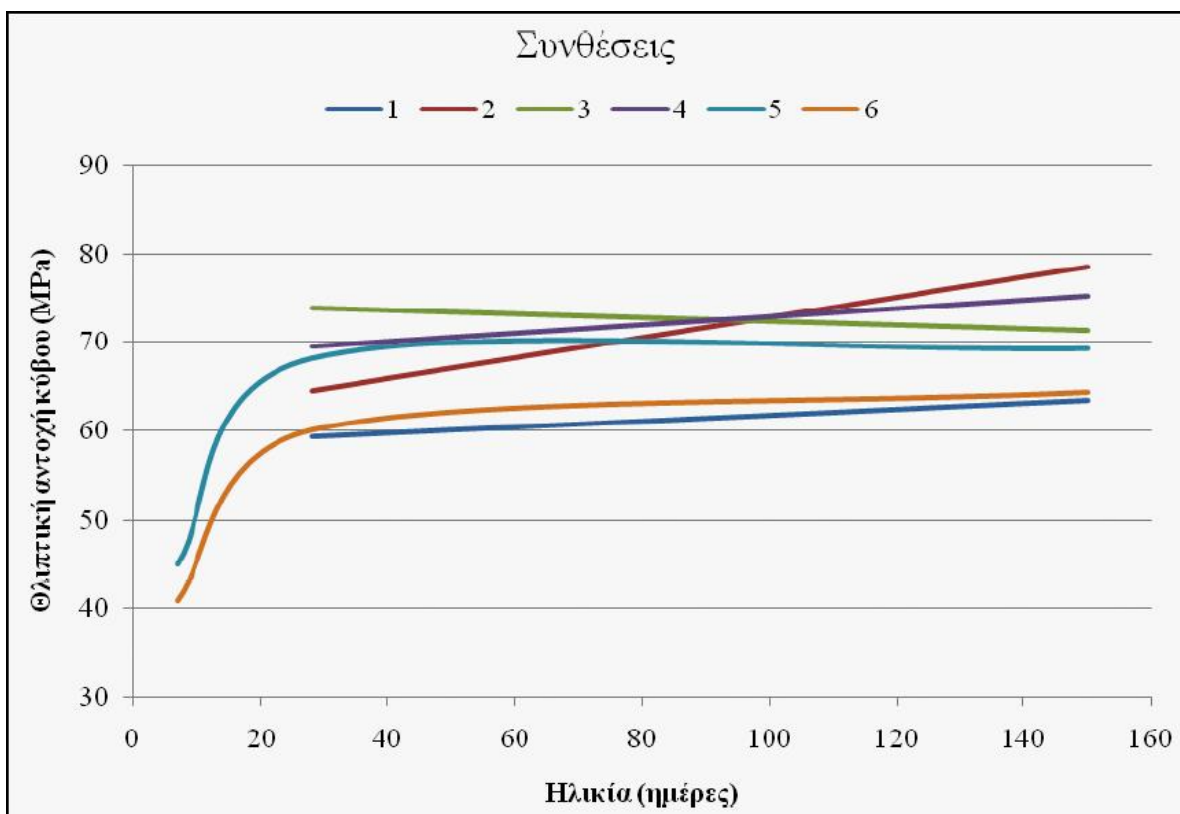
Χρησιμοποιήθηκαν αδρανή εγχώρια με κοκκομετρική διαβάθμιση που φαίνεται στον Πίνακα 22 και προέκυψε από την επιμέρους κοκκομετρική ανάλυση των κλασμάτων των αδρανών 0-4 mm, 4-8 mm και γαρμπίλι 4-12,5 mm. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών φαίνονται στον Πίνακα 23. Ως άμμος χρησιμοποιήθηκε πλυμένη άμμος από Στρυμώνα ποταμό. Ως χονδρόκοκκα θραυστά ασβεστολιθικά λατομείου Δρυμού. Το ποσοστό της υγρασίας των αδρανών ελέγχονταν αμέσως πριν τη σκυροδέτηση για να γίνεται η σχετική διόρθωση εφόσον ο σχεδιασμός βασιζόταν σε κορεσμένης στεγνής επιφάνειας αδρανή.

Ως τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε το CEM142.5. Η τέφρα χαρακτηρίστηκε ως τύπου EIT2 με χαρακτηριστικά:  $CaO=2.8<3.0\%$ ,  $SO_3=3.5<5.0\%$ , φαινόμενο ειδικό βάρος 2.42, λεπτότητα άλεσης  $328\text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $R_{45\mu\text{m}}\sim 20\% < 30\%$ .

Χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης σε ποσοστό 1-2%κβ κονιών. Οι συνθέσεις των σκυροδεμάτων που χυτεύθηκαν στα δοκίμια και οι ιδιότητες των νωπών σκυροδεμάτων φαίνονται στον Πίνακα 24. Τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 25. Σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών και του ρυθμού ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 58.



Εικόνα 59.

Τα δοκίμια συμπυκνώθηκαν με δονητική τράπεζα. Ο έλεγχος της συμπυκνωσιμότητας έγινε με προσδιορισμό του υπολογιστικού ειδικού βάρους του σκυροδέματος  $\gamma''$ , του ειδικού βάρους του συμπυκνωμένου  $\gamma'$  και του ασυμπύκνωτου,  $\gamma$ . Οι λόγοι  $\gamma'/\gamma''$  κυμαίνονταν από 0.88 έως 0.93 και κρίθηκε ικανοποιητικός. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν επί ένα μήνα σε θάλαμο συντήρησης με τις προδιαγραφόμενες από τους κανονισμούς συνθήκες και μετά παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Αδρανή	Φαινόμενη ειδική πυκνότητα (kg/dm <sup>3</sup> )	Απορροφητικότητα (%)	Υγρασία (%)
Άμμος	2,564	0,80	8-11
Ρύζι	2,675	0,50	1,4-3,6
Γαρμπίλι	2,680	0,33	1,05-2,6

Πίνακας 23. Χαρακτηριστικά αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν

Υλικά (kg)	1	2	3	4	5	6
Γαρμπίλι	635,85	637,10	632,08	561,3	549,60	549,63
Ρύζι	324,38	323,10	319,67	283,92	274,44	274,21
Άμμος	683,90	676,50	689,83	598,14	565,20	565,24
CEM Ι42,5	450	450	300	350	350	350
Ιπτάμενη τέφρα	150	150	300	350	350	350
	(33%)	(33%)	(50%)	(50%)	(50%)	(50%)
Νερό	182,2	145,8	132,78	167,02	213,40	214,00
Ρευστοποιητής	4,0	6,0	12,0	14,0	14,5	7,00
Λόγος N/T	0,30	0,25	0,22	0,238	0,30	0,30
Κάθιση (cm)	6,9	6,8	8,0	8,5	7,0	7,2
% ρευστοποιητή	0,5	0,65	1,2	1,4	1,0	1,0

Πίνακας 24. Συνθέσεις σκυροδεμάτων με ιπτάμενη τέφρα

Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Θλιπτική αντοχή (MPa)						
7 ημερών κυβ.	-	-	-	-	45,1	40,8
28 ημερών κυλ.	49,5	56,8	65,9	59,9	55,3	50,9
28 ημερών κυβ.	59,4	64,5	73,9	69,5	68,2	60,1
5 μηνών κυβ.	63,5	78,6	71,3	75,2	69,3	64,4
Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (MPa)	4,71	4,45	4,88	4,52	4,30	2,67
Εφελκυστική αντοχή από κάμψη 28 ημ. (MPa)	9,05	9,84	8,16	7,10	7,69	7,54
Στατικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	27,2	32,5	33,6	29,2	27,8	29,2
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	42,9	47,5	47,85	40,9	45,3	44,34
Λόγος $f_{c,κυβ,28}/f_{c,κυλ,28}$	1,20	1,13	1,12	1,17	1,23	1,18
Λόγος $f_{c,διάρρηξη}/f_{c,θλίψη}$ (%)	9,51	7,84	7,40	7,62	7,79	5,21
Λόγος $f_{c,θλίψη}/f_{c,κάμψη}$ (%)	15,2	15,2	11,02	10,2	11,2	12,5
Λόγος $E_{δυν}/E_{στατ}$	1,576	1,462	1,422	1,401	1,631	1,516

Πίνακας 25. Μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδεμάτων με τέφρα

Οι έλεγχοι των μηχανικών χαρακτηριστικών έγιναν σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM C496 για εφελκυσμό από διάρρηξη, ASTM C293 για εφελκυσμό από κάμψη και ASTM C469 για το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων απ' όπου υπολογίσθηκε το μέτρο ελαστικότητας. Ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έγινε με σονόμετρο κατά ASTM C586 σε πρισματικά δοκίμια.

## ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κατ' αρχήν επιτεύχθηκαν επίπεδα 28 ημερών θλιπτικής αντοχής πάνω από 60MPa για κύβους με ένα συνολικό ποσό κονιών από 600 έως 700 kg/m<sup>3</sup>. Συγκρίνοντας τα μίγματα 1-3 και 4-6 δεν φαίνεται να είναι εμφανής κάποια διαφοροποίηση λόγω του μεγαλύτερου (700 kg/m<sup>3</sup>) ποσοστού κονιών των 4-6 μιγμάτων. Μια τάση χαμηλότερων αντοχών εφελκυσμού και μέτρων ελαστικότητας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καλύτερα συμπεριφέρονται ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα μίγματα με 600 kg/m<sup>3</sup> συνολικής κονιάς. Η παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει τις αντοχές είναι ο λόγος νερού/τσιμέντου. Σε λόγους νερού/τσιμέντου κάτω από 0.30 οι τιμές που επιτεύχθηκαν είναι υψηλότερες. Φαίνεται επίσης ότι αυξημένα ποσοστά της ασβεστούχας τέφρας οδηγούν σε υψηλότερες δόσεις ρευστοποιητή. Υπάρχει ένας καλός ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής και φαίνεται πως στις 7 ημέρες ένα επίπεδο αντοχής 40-50MPa είναι εφικτό.

Η εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη κυμαίνεται από 2.6 έως 4.8% της θλιπτικής ενώ η εφελκυστική αντοχή από κάμψη κυμαίνεται από 7 έως 9% της θλιπτικής. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 27 έως 33.5GPa. Εάν συγκριθούν οι τιμές αυτές με τις υπολογιζόμενες (βάσει του τύπου  $E_{cm} =$

$9,5 (f_{ck}+8)^{1/3}$ ) τιμές Ε στατικού συμβατικών σκυροδεμάτων φαίνεται ότι οι τιμές στα σκυροδέματα με τέφρα είναι λίγο χαμηλότερες (33,5GPa αντί 37GPa). Πρέπει επίσης να λεχθεί ότι παρ' όλο που τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά προΐδεάζουν για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στο χρόνο απαιτείται περαιτέρω έλεγχος σε βασικές δοκιμασίες ανθεκτικότητας που να έχουν σχέση με τη χρήση του τελικού προϊόντος προκειμένου να αποφασισθεί ο σχεδιασμός υψηλής αντοχής σκυροδέματος με μεγάλη περιεκτικότητα σε τέφρα.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Είναι δυνατό να επιτευχθεί εμπορικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με επεξεργασμένη τέφρα που εμπίπτει στην κατηγορία EIT2 σε υψηλό ποσοστό 30 έως 50% του συνόλου της συνδετικής κονίας.

Προτείνεται το χαμηλότερο δυνατό ποσό συνολικής κονίας στο ανάμιγμα, που στην έρευνα ήταν  $600 \text{ kg/m}^3$ . Περαιτέρω έρευνα ίσως ελαχιστοποιήσει ακόμα περισσότερο το ποσό αυτό. Η πιο σημαντική παράμετρος για την επίτευξη υψηλής αντοχής φαίνεται ότι είναι ο λόγος N / τσιμέντου + Ιπτ. Τέφρα.

Τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής με μεγάλο ποσοστό τέφρας έχουν σχετικά χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά σκυροδέματα.

Εικόνα 1. Γέφυρα κατασκευασμένη με σκυρόδεμα υπερυψηλής αντοχής.....	10
Εικόνα 2. Λόγος αντοχής προς αντοχή 28 ημερών.....	19
Εικόνα 3. Ονοματολογία Τσιμέντων .....	29
Εικόνα 4. Γέφυρα Akashi-Kaikyo( Απρίλιος 1998) .....	46
Εικόνα 5.Γέφυρα Ritto (Shiga Prefecture Nature Park)	Σχήμα Κολώνας
Γέφυρας.....	47
Εικόνα 6. Βαρσοβία –Πολωνία ( Ιούνιος 2005) .....	48
Εικόνα 7. Βασικά σημεία σχεδιασμού.....	53
Εικόνα 8. Συσκευή μέτρησης του μέτρου εξαπλώσεως αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. .....	56
Εικόνα 9. Συσκευή V-funnel για τη μέτρηση της ροής και της αντίστασης του μείγματος στο διαχωρισμό των συστατικών του. ....	57
Εικόνα 10. Συσκευή L-Box για τη μέτρηση της ικανότητας διέλευσης του σκυροδέματος μεταξύ των οπλισμών. ....	58
Εικόνα 11.....	63
Εικόνα 12. Συστολή ξηράνσεως παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων .....	64
Εικόνα 13. Υδατοαπορροφητικότητα συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων .....	64
Εικόνα 14. Βάθος ενανθράκωσης συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων .....	65
Εικόνα 15. Βασικά στάδια σχεδιασμού μείγματος ΑΣΣ. ....	67
Εικόνα 16. Υποστυλώματα σε κλίμακα ψηλά και κοντά .....	74
Εικόνα 17. Ζημιές των υποστυλωμάτων .....	75
Εικόνα 18. Επισκευή και ενίσχυση των υποστυλωμάτων .....	76
Εικόνα 19. Γέφυρα Wynaco, King.....	77
Εικόνα 20. Προϋπάρχουσα στήριξη της γέφυρας.....	78
Εικόνα 21. Προτεινόμενη ενίσχυση για τη στήριξη της γέφυρας.....	79
Εικόνα 22. Βλάβη .....	80
Εικόνα 23. Μετά την επισκευή με ενισχυμένο ΑΣΣ .....	80
Εικόνα 24. Προκατασκευασμένο τοίχωμα πριν την αποκατάσταση.....	82
Εικόνα 25.Προκατασκευασμένο τοίχωμα μετά την αποκατάσταση.....	83
Εικόνα 26. Καλουπωμένη δοκός πριν την σκυροδέτηση με ΑΣΣ.....	84
Εικόνα 27. Τμήματα από τις Scajaquada Expressway Bridges που πρέπει να προστατευθούν από το νερό του ποταμού έναντι διάβρωσης.....	84
Εικόνα 28. Εξοπλισμός – Γραμμή παραγωγής σκυροδέματος. ....	97
Εικόνα 29. τυπικές μορφές ινών χάλυβα .....	99



Εικόνα 30. Σημαντικά χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτίου- μετατόπισης υπό κάμψη κατά το πρότυπο ASTM C 1018-89 .....	102
Εικόνα 31. Ορισμός δεικτών σύμφωνα με τον κανονισμό JCI-SF4 .....	104
Εικόνα 32. Απορρόφηση ενέργειας κατά το γερμανικό πρότυπο.....	105
Εικόνα 33. Επίδραση ποσοστού ινών και λόγου μήκους προς διάμετρο στο χρόνο Vebe .....	107
Εικόνα 34. Επίδραση α )ποσοστού ινών χάλυβα και β) λόγου l/d στη θλιπτική αντοχή .....	112
Εικόνα 35. Επίδραση ινών στη συμπεριφορά σε κάμψη.....	112
Εικόνα 36. Εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος. ....	115
Εικόνα 37. Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ποσότητας των ινών και της γεωμετρίας τους αναπτύχθηκε ένα τριγωνικό ομαλοποιημένο διάγραμμα....	117
<b>Εικόνα 38.</b> το τριγωνικό ομαλοποιημένο διάγραμμα και ξεχωρίζονται οι τρεις .....	118
Εικόνα 39. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος .....	120
<b>Εικόνα 40.</b> θεωρητικές εκτιμήσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.....	121
Εικόνα 41. Προσθήκη μεταλλικών ινών στο σκυρόδεμα.....	122
Εικόνα 42. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού των παρθενικών δοκιμών M1, M2, M3, O1 και W1 (διαστάσεις σε m). ....	126
Εικόνα 43. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου HSFM1 (σε m). ....	127
Εικόνα 44. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου HSFM2 (σε m). ....	129
Εικόνα 45. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου HSFM3 (σε m). ....	130
Εικόνα 46. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου SO1 (σε m).....	131
Εικόνα 47. Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του ενισχυμένου δοκιμίου FW1 (σε m).....	132
<b>Εικόνα 48.</b> Υστερητικοί βρόχοι φορτίου – μετατόπισης δοκιμών M1, HSFM1, HSFM2, HSFM3, SO1 και FW1 .....	134
Εικόνα 49. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών HSFM1 και M1. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. ....	135
Εικόνα 50. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμών HSFM1 και HSFM2. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. ....	136
Εικόνα 51. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμών HSFM1 και HSFM3. Άνω	

αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. ....	137
Εικόνα 52. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμών HSFM1 και SO1. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. ....	138
Εικόνα 53. Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς δοκιμών HSFM1 και FW1. Άνω αριστερά: σύγκριση αντοχών. Άνω δεξιά: σύγκριση δυσκαμψιών. Κάτω: σύγκριση ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. ....	139
Εικόνα 54. Φωτογραφίες από εργοτάξιο που χρησιμοποιούν ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	142
Εικόνα 55. Τάση σκυροδέματος $\sigma_{cd}$ [N/mm <sup>2</sup> ] συναρτήσει της βράχυνσης σκυροδέματος $\epsilon_c$ [‰] .....	144
Εικόνα 56. Τάσεις και παραμορφώσεις διατομής .....	145
Εικόνα 57. Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων προεντεταμένου οπλισμού.....	147
Εικόνα 58.....	156
Εικόνα 59.....	156

Πίνακας 1. Κατηγορίες σκυροδέματος και οι τιμές αντοχής τους.....	12
Πίνακας 2. Ποσότητα τσιμέντου ανά κατηγορία σκυροδέματος σε 1 κ.μ.....	18
Πίνακας 3. Μέγιστος λόγος βάρους w/z για m <sup>3</sup> σκυροδέματος ανά κατηγορία.....	21
Πίνακας 4. Μέγεθος κόκκων ανά κατηγορία αδρανών .....	22
Πίνακας 5. Βασικοί τύποι τσιμέντου .....	27
Πίνακας 6. Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές	28
Πίνακας 7. Διαφορές αντοχών .....	29
Πίνακας 8. Σχέση αντοχών μεταξύ κυβικού και κυλινδρικού δοκιμίου.....	31
Πίνακας 9. Οι ενδεικτικές αναλογίες υλικών ΑΣΣ.....	44
Πίνακας 10. Κριτήρια αποδοχής των ιδιοτήτων νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος . .....	55
Πίνακας 11. Δοκιμές για το ΑΣΣ.....	59
Πίνακας 12. Αναλογίες μείξεως (Kg/m <sup>3</sup> ) και ρεολογικά χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος με πυριτικά αδρανή .....	61
Πίνακας 13. Αναλογίες μείξεως (Kg/m <sup>3</sup> ) και ρεολογικά χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή. ....	61
Πίνακας 14. Μηχανικά χαρακτηριστικά συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με πυριτικά αδρανή .....	62
Πίνακας 15. Μηχανικά χαρακτηριστικά συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή . ....	62
Πίνακας 16. Μίγματα Α1 – Γ2.....	91
Πίνακας 17. Δείγματα Δ1 - Ζ2 .....	92
Πίνακας 18. Τυπικές ιδιότητες ινών.....	99
Πίνακας 19. Ενδεικτικές αναλογίες σύνθεσης χαλυβο-ινοπλισμένου σκυροδέματος .....	108
Πίνακας 20. Συγκριτική σύνθεση ινοπλισμένου και άοπλου σκυροδέματος (kg/m <sup>3</sup> ) .....	109
Πίνακας 21. Εφαρμογές Ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	114
Πίνακας 22. Κοκκομετρική διαβάθμιση ανδρανών.....	154
Πίνακας 23. Χαρακτηριστικά αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν.....	157
Πίνακας 24. Συνθέσεις σκυροδεμάτων με ιπτάμενη τέφρα .....	157
Πίνακας 25. Μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδεμάτων με τέφρα .....	158

- ✚ ΣΗΜΕΙΩΣΗΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΧΗΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ» ,  
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ» Κ. ΜΑΤΣΟΥΚΗ ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΤΕΙ , 1999 .
- ✚ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ
- ✚ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΜΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ κ. **Ι. Παπαγιάννη** , κ. **Ε. Αναστασίου** .*Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*
- ✚ ΣΕΜΗΝΑΡΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛ. ΕΛΛΑΔΟΣ
- ✚ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛ. ΕΛΛΑΔΟΣ
- ✚ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ Ε.Α.Π ΠΑΤΡΩΝ.
- ✚ ΒΙΒΛΙΟ «ΧΗΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ», Α' ΕΞΑΜΗΝΟΥ
- ✚ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΧΟΛΗΣ Ε.Μ.Π , ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ .
- ✚ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΤΕΦΡΑΣ ΕΙΤ2 ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ  
*Από την Καθ. κ. Ι. Παπαγιάννη και τον κ. Ε. Αναστασίου*  
*Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*
- ✚ 9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003 10-1 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ SFRC ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΩΝ(ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΘΡΑΥΣΕΩΝ) Ν.Μαρκαντωνάτος - Κ.Δεμαρτίνο
- ✚ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΡΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ ΠΑΣΤΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ – ΑΥΤΟΣΥΜΠΙΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
- ✚ ΒΙΒΛΙΟ: CONCRETE ΤΩΝ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ Ρ.ΚUMAR ΜΕΝΤΑ, PAULO G.M. MONTEIRO

Συμμετείχαν οι : *Μ. Μπεάζη – Κασιώτη*<sup>1</sup> , *Ν. Διαμαντόνης*<sup>1</sup> , *Α. Σακελλαρίου*<sup>2</sup> , *Α. Παπαθανασίου*<sup>2</sup> , *Μ. Κασιώτης*<sup>1</sup> , *Β. Καλοϊδάς*<sup>3</sup> , *Ι. Μαρίνος*<sup>4</sup>