

# ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΥΠΕΡ-ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Αντώνιος Κανελλόπουλος  
*Μεταδιδασκατορικός Ερευνητής, Πανεπιστήμιο Κύπρου*

Δημήτρης Νικολαΐδης  
*Λέκτορας, Frederick University Cyprus*

Μιχάλης Πέτρου  
*Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κύπρου*

Ιωάννης Ιωάννου  
*Λέκτορας, Πανεπιστήμιο Κύπρου*

*Λέξεις κλειδιά: Σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής επιτελεστικότητας, ενεργές κονίες, υπέρ-ρευστοποιητές, μεταλλικές ίνες, αντοχές*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Τα υπέρ-υψηλής επιτελεστικότητας σκυροδέματα (ΥΥΕΣ) είναι υλικά με βασικό χαρακτηριστικό τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα, εξαιτίας της βελτίωσης της μικροδομής του υλικού καθώς και της εισαγωγής διαφόρων ειδών ινών. Στην παρούσα μελέτη γίνεται διερεύνηση της επίδρασης 3 πληρωτικών υλικών, της *microsilica* (ΜΣ) της *nanosilica* (ΝΣ) και της ασβεστολιθικής πούδρας (ΑΠ), στις μηχανικές ιδιότητες του ΥΥΕΣ.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι απαιτήσεις για υλικά με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αυξημένη ανθεκτικότητα οδήγησαν στη δημιουργία νέων τύπων σκυροδέματος. Η αρχή έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 70 με τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα (ΥΑΣ) και στη συνέχεια είχαμε την εισαγωγή των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων (ΙΠΣ) καθώς και των σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας (ΥΕΣ). Τα τελευταία έκαναν την εμφάνισή τους το 1990 και ήρθαν ως φυσική συνέχεια της έρευνας για τη βελτίωση του σκυροδέματος υψηλής αντοχής (ΥΑΣ). Τα ΥΕΣ σε σχέση με τα ΥΑΣ παρουσιάζουν πολύ καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, αποτέλεσμα της συμπαγούς μικροδομής τους η οποία επιπλέον τους προσδίδει και καλύτερη ανθεκτικότητα, και κατά συνέπεια μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (Aitcin 2003). Ο σχεδιασμός τους βασιζόταν στη χρήση υψηλής δόσης τσιμέντου (450-550 Kg/m<sup>3</sup>) και λεπτόκοκκων πληρωτικών υλικών, τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας τους, με συνέπεια την παρεμπόδιση διείσδυσης ουσιών (π.χ. χλωριόντα, άλατα) στο σκυρόδεμα.

Επιπρόσθετα, τα λεπτόκοκκα αυτά υλικά, λόγω των ποζολανικών τους ιδιοτήτων, αντιδρούν χημικά με το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την παραγωγή επιπρόσθετης ποσότητας ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (C-S-H), το οποίο είναι το κατεξοχήν υπεύθυνο για την αντοχή του σκυροδέματος. Η παραγόμενη ποσότητα του C-S-H αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του πυριτικού οξειδίου ( $\text{SiO}_2$ ) που περιέχει το πληρωτικό υλικό. Η ποζολανική αυτή αντίδραση, σε συνδυασμό με τη μείωση του πορώδους και το χαμηλό λόγο N/T, είχε ως αποτέλεσμα τις αυξημένες αντοχές του ΥΕΣ (Khan & Lynsdale 2002). Εντούτοις, η χρήση λεπτόκοκκων υλικών και χαμηλού λόγου N/T, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της εργασιμότητας, γεγονός που έκανε αναγκαία τη χρήση υπερρευστοποιητών (Aïtcin 1995).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 είχε ξεκινήσει η χρήση ινών ως μέσον οπλισμού του σκυροδέματος δημιουργώντας το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ΙΠΣ), το οποίο εκτός από τσιμέντο, νερό, αδρανή και τυχόν πρόσμικτα ή πρόσθετα, περιείχε και ίνες (Zollo 1997). Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, υπήρξε αυξημένο ενδιαφέρον σε εκτεταμένη μελέτη του ΙΠΣ, προχωρώντας στη χρήση ποικιλίας ινών όπως ίνες από χάλυβα, πολυπροπυλένιο, γυαλί, άνθρακα, αραμίδιο, πολυεστέρα, νάιλον, και φυσικά υλικά όπως το ξύλο (Kanellopoulos 2001). Οι ίνες, μήκους της τάξης των μερικών εκατοστών, και διαμέτρου της τάξης του κλάσματος του χλυστού, διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του, σε ποσοστό της τάξης του 1-3% κατά όγκο (Τριανταφύλλου 2004). Ο βασικός ρόλος των ινών στο ΙΠΣ ήταν η αύξηση της ικανότητας σε παραμόρφωση αστοχίας του υλικού όταν αυτό υπόκειται σε κάμψη και ο περιορισμός γενικά της ρηγμάτωσης. Αποτέλεσμα ήταν 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. Έτσι, ενώ το άοπλο σκυρόδεμα αστοχούσε ψαθυρά σε πολύ μικρή εφελκυστική παραμόρφωση, το ΙΠΣ έχει την ικανότητα ανάληψης φορτίων σε πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ενώ η τελική αστοχία επέρχεται αρκετά μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Η ανάγκη για υψηλή ανθεκτικότητα αλλά και ολκιμότητα, οδήγησε στην δημιουργία ενός συνδυασμού σκυροδεμάτων, το Υπέρ-Υψηλής Επιτελεστικότητας Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα (ΥΥΕΙΠΣ) το οποίο κατά κάποιο τρόπο υιοθετεί τις ιδιότητες του ΙΠΣ και του ΥΕΣ, δηλαδή υψηλή αντοχή, υψηλή ανθεκτικότητα και ολκιμότητα.

Σημαντικός παράγοντας στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του ΥΥΕΙΠΣ αποτελούν τα πληρωτικά που χρησιμοποιούνται. Στην παρούσα μελέτη, βασίζόμενοι σε γενικές γραμμές σε σύνθεση ΥΥΕΣ από τη βιβλιογραφία (Farhat et al. 2007), παρασκευάστηκε μια μήτρα ΥΥΕΣ η οποία περιείχε ως πληρωτικό τη *microsilica*. Στη συνέχεια, προστέθηκαν στη συγκεκριμένη μήτρα 2 είδη ινών χάλυβα διαφορετικού μήκους

παρασκευάζοντας ΥΥΕΠΣ, ούτως ώστε να γίνει σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ ΥΥΕΣ και ΥΥΕΠΣ, και να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση των ινών σε συνδυασμό με τα πληρωτικά υλικά στις μηχανικές ιδιότητες. Ακολούθως, παρασκευάστηκαν 2 επιπλέον μήτρες ΥΥΕΣ οι οποίες παρουσιάζουν διαφορές στη σύνθεση τους μόνο ως προς τα πληρωτικά τους υλικά, ούτως ώστε να μελετηθεί η επίδραση των πληρωτικών υλικών στις μηχανικές ιδιότητες του ΥΥΕΣ.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Υλικά

Για την παρασκευή των υπό εξέταση μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο Portland τύπου ΙΙ 52.5 Ν, κοινό νερό από την παροχή του εργαστηρίου, microsilica (ΜΣ), nanosilica (ΝΣ) και ασβεστολιθική πούδρα (ΑΠ) (Πίνακας 1), διαβασικά αδρανή με κοκκομετρική διαβάθμιση 0/4 mm και θραυστός άμμος από ασβεστολιθικά πετρώματα με κοκκομετρική διαβάθμιση 0/2 mm. Το είδος υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε ήταν “Τροποποιημένος Πολυκαρβοξυλικός Εστέρας” (“Modified Polycarboxylic Esther”). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν 2 είδη ινών χάλυβα διαφορετικού μήκους. Το 1<sup>ο</sup> είδος ινών ήταν μήκους 6 mm ενώ το 2<sup>ο</sup> μήκους 13 mm. Το ποσοστό των ινών στο μίγμα ήταν 2% κ.ο.. Η διάμετρος και των 2 ειδών ήταν 0.16 mm.

Πίνακας 1: Βασικά συστατικά και χαρακτηριστικά των πληρωτικών υλικών.

Πληρωτικό Υλικό	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Σχετική Πυκνότητα	Surface Area (m <sup>2</sup> /g)
Microsilica	0.30	97	2.20	18-22
Nanosilica	-	99	1.10	45-55
Ασβεστολιθική Πούδρα	80	-	2.80	9-15

### 2.2 Σύνθεση

Παρασκευάστηκαν συνολικά 3 μήτρες των 40 lt χωρίς ίνες (Α, Β, Γ) και 1 μήτρα των 40 lt με ίνες χάλυβα με ποσοστό 2% κ.ο. (Δ). Η σύνθεση του κάθε μίγματος παρουσιάζεται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2). Στη μήτρα του μίγματος Α και Δ, χρησιμοποιήθηκε μόνο ΜΣ, ενώ στη μήτρα των μιγμάτων Β και Γ έγινε αντικατάσταση 20% της ΜΣ με ΝΣ και ΑΠ αντίστοιχα. Ο λόγος Ν/Τ και για τα 4 μίγματα διατηρήθηκε σταθερός στο 0.25, ενώ ο μέγιστος κόκκος αδρανών που χρησιμοποιήθηκε ήταν 4 mm.

Πίνακας 2: Σύνθεση μιγμάτων σε αναλογία 1 m<sup>3</sup> σκυροδέματος.

Υλικά	Μίγμα			
	A	B	Γ	Δ
Τσιμέντο Portland 52.5 (kg)	791	791	791	791
Νερό (lt)	198	198	198	198
Microsilica (kg)	209	188	156	209
Nanosilica (kg)	-	21	-	-
Ασβεστολιθική πούδρα (kg)	-	-	53	-
Διαβασικά αδρανή 0/4 (kg)	500	500	500	500
Θραυστός άμμος από ασβεστολιθικά πετρώματα 0/2 (kg)	500	500	500	500
Υπερρυστοποιητής (kg)	45	40	35	35
Ίνες Χάλυβα μήκους 13 mm (kg)	-	-	-	125
Ίνες Χάλυβα μήκους 6 mm (kg)	-	-	-	25

### 2.3 Πορεία Εκτέλεσης Πειράματος

Για κάθε μήτρα ΥΕΣ ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: αρχικά ζυγίστηκαν όλα τα υλικά σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας. Ακολούθως, τοποθετήθηκαν στη μηχανή ανάμιξης το πιο χονδρόκοκκο (εξαιρουμένων των ινών) μαζί με το πιο λεπτόκοκκο υλικό και αναμίχθηκαν για 2 λεπτά. Ακολούθως προστέθηκε το 2<sup>ο</sup> πιο χονδρόκοκκο υλικό, αναμίχθηκαν για 2 λεπτά, προστέθηκε το 2<sup>ο</sup> κατά σειρά πιο λεπτόκοκκο υλικό και αναμίχθηκαν και πάλι για 2 λεπτά κ.ο.κ.. Για την παρασκευή του 1 μίγματος ΥΥΕΠΣ, οι ίνες χάλυβα μπήκαν σε κόσκινο σε 4 ίσες δόσεις, κοσκινίστηκαν και διασκορπίστηκαν στο μίγμα. Αρχικά διασκορπίστηκαν οι ίνες χάλυβα 13 mm και ακολούθως των 6 mm. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε ένα δοχείο όλη η ποσότητα νερού μαζί με τα 2/3 του υπερρυστοποιητή, αναμίχθηκαν και προστέθηκαν στη μηχανή ανάμιξης καθώς αυτή περιστρεφόταν σε 4 ανάλογες δόσεις. Ακολούθως προστέθηκε η υπόλοιπη ποσότητα του υπερρυστοποιητή. Η όλη διαδικασία διαρκούσε 15-20 λεπτά. Στη συνέχεια λήφθηκαν δοκίμια, τα οποία μετά από 24 ώρες αφαιρέθηκαν από τα καλούπια και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή συντήρησης όπου παρέμειναν συνολικά 9 μέρες. Την 1<sup>η</sup> μέρα η θερμοκρασία στη δεξαμενή συντήρησης ήταν 22 °C, σταδιακά ανέβηκε στους 75 °C όπου και έμεινε σταθερή για 7 μέρες. Την τελευταία μέρα η θερμοκρασία κατέβηκε σταδιακά στους 22 °C.

Για τους μηχανικούς ελέγχους των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ισχυρό πλαίσιο φόρτισης δυναμικότητας 5000 kN. Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής κάθε μίγματος, χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια, ενώ για τον υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό από διάρρηξη, χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό δοκίμιο στο οποίο είχαν επικολληθεί 2 ηλεκτρομηκυνσιόμετρα και υποβλήθηκε σε 4 κύκλους φόρτισης με θλιπτικό φορτίο και 4 κύκλους αποφόρτισης.

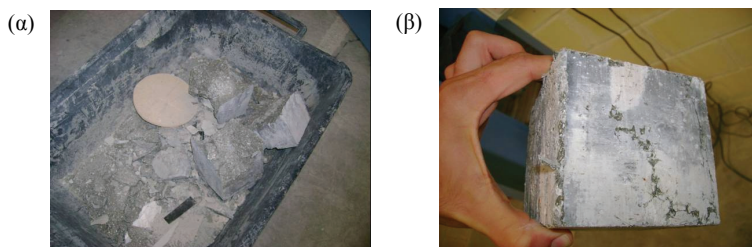
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες των 3 μιγμάτων χωρίς ίνες και του μίγματος με ίνες χάλυβα, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3). Οι τιμές που παρουσιάζονται για κάθε μίγμα είναι ο μέσος όρος κάθε μηχανικής ιδιότητας.

Πίνακας 3: Πειραματικά αποτελέσματα των 3 μιγμάτων χωρίς ίνες (Α, Β, Γ) και μίγματος Δ με ίνες.

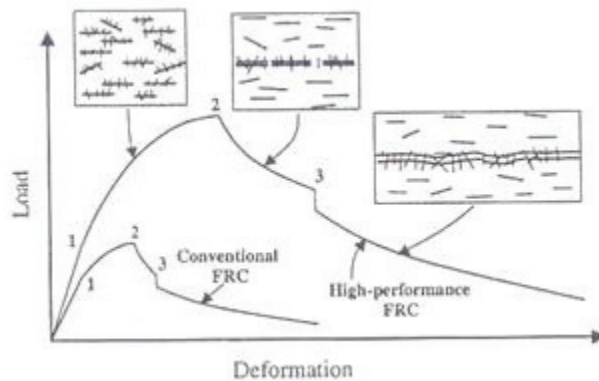
Μηχανικές Ιδιότητες	Μίγμα Α	Μίγμα Β	Μίγμα Γ	Μίγμα Δ
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	113.0	105.7	95.3	141.9
Εφελκυστική Αντοχή από Διάρρηξη (MPa)	11.22	6.11	7.65	12.94
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	33.34	35.21	35.00	37.00
Καμπτική Αντοχή (MPa)	7.46	6.84	6.74	25.58

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ των μιγμάτων Α και Δ, παρατηρούμε ότι το μίγμα Δ παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το Α. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη ινών χάλυβα στο μίγμα Δ. Η επίδραση των ινών στο μίγμα Δ, έγινε αντιληπτή από τον τρόπο όπου αστοχούσαν τα δοκίμια του σε θλίψη. Συγκεκριμένα, η αστοχία των δοκιμίων του μίγματος Δ δεν ήταν καθόλου καταστρεπτική, ούτε θορυβώδης. Επίσης, παρατηρώντας τα δοκίμια του μίγματος Δ μετά την αστοχία, υπήρχαν εξωτερικά μεγάλες ρωγμές ενώ το δοκίμιο διατηρούσε το αρχικό του σχήμα (Εικόνα 1β). Αντιθέτως, η αστοχία των δοκιμίων του μίγματος Α ήταν καταστρεπτική, θορυβώδης, ενώ μετά την αστοχία το δοκίμιο είχε υποδιαιρεθεί σε κομμάτια (Εικόνα 1α).



“Εικόνα 1. Φωτογραφίες μετά από την αστοχία σε θλίψη δοκιμίων (α) του μίγματος Α και (β) του μίγματος Δ.”

Οι ίνες χάλυβα στο μίγμα Δ, του έδωσαν μια όλκιμη συμπεριφορά, η οποία φάνηκε και από τα αποτελέσματα του Ε, το οποίο ήταν μεγαλύτερο από αυτό του μίγματος Α. Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή και την εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη, αυτές ήταν μεγαλύτερες στο μίγμα Δ, λόγω της δράσης των ινών χάλυβα. Οι ίνες, γεφυρώνουν τις μικρορηγματώσεις στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να συγκρατούν το υλικό ενωμένο. Πιο συγκεκριμένα, οι μικρές ίνες αναπτύσσουν “γεφυρωτική δράση” κατά την έναρξη του φαινομένου της μικρορηγματώσης (pre-peak). Όταν οι ρωγμές μεγαλώσουν, τότε αρχίζει η δράση των ινών μεγάλου μήκους, οι οποίες με τη σειρά τους γεφυρώνουν τις μεγάλες ρωγμές που εμφανίζονται μετά το μέγιστο φορτίο απόκρισης του υλικού (post-peak) (Εικόνα 2). Όσον αφορά το ποσοστό των ινών που χρησιμοποιήθηκε, θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο ποσοστό τους στο μίγμα, το οποίο πιθανόν να είχε φέρνει και καλύτερα αποτελέσματα στις μηχανικές ιδιότητες του μίγματος Δ.



“Εικόνα 2. Διάγραμμα φορτίου παραμόρφωσης στο οποίο φαίνεται πότε δρουν οι μικρού και μεγάλου μήκους ίνες, καθώς και σύγκριση των ΠΠΣ και ΥΥΕΠΠΣ (Kanellopoulos 2001).”

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ των μιγμάτων Α, Β και Γ, παρατηρούμε ότι το μίγμα Α έχει μεγαλύτερη καμπτική, θλιπτική και εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη από τα μίγματα Β και Γ, ενώ το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζεται μεγαλύτερο στο μίγμα Β από ότι στα μίγματα Α και Γ. Επίσης, το μίγμα Γ παρουσιάζει τη μικρότερη θλιπτική και καμπτική αντοχή, το μίγμα Β παρουσιάζει τη μικρότερη εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη και το μίγμα Α το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (Ε). Όσον αφορά το Ε, η μοναδική διαφορά στη σύνθεση των 3 μιγμάτων όπου επηρεάζει το Ε, είναι το ποσοστό των κενών, αφού η ΝΣ λόγω της μικρότερης διαμέτρου γεμίζει καλύτερα τα κενά του

σκυροδέματος από ότι η ΜΣ και η ΜΣ καλύτερα από την ΑΠ. Οπότε, το γεγονός ότι το μίγμα Β έχει το μεγαλύτερο Ε, είναι αναμενόμενο.

Όσον αφορά τα πειραματικά αποτελέσματα της καμπτικής, θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη των μιγμάτων Α, Β και Γ, οι βασικότερες διαφορές των μιγμάτων που επηρεάζουν τις αντοχές αυτές είναι:

- Η ΝΣ περιέχει υψηλότερα ποσοστά  $\text{SiO}_2$  από τη ΜΣ και την ΑΠ, οπότε αντιδρώντας με το  $\text{Ca(OH)}_2$  του σκυροδέματος παράγει υψηλότερη ποσότητα C-S-H από ότι η ΜΣ και η ΑΠ. Το ίδιο συμβαίνει μεταξύ της ΜΣ και της ΑΠ, αφού η ΜΣ έχει υψηλότερα ποσοστά  $\text{SiO}_2$  από την ΑΠ.
- Η ΝΣ, έχει κόκκους λεπτότερης διαμέτρου από τη ΜΣ και την ΑΠ οπότε γεμίζει μεγαλύτερο ποσοστό των κενών του σκυροδέματος από ότι η ΜΣ και η ΑΠ. Το ίδιο συμβαίνει μεταξύ της ΜΣ και της ΑΠ. Με τη μείωση των κενών έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στις αντοχές του σκυροδέματος.

Συγκρίνοντας τις αντοχές μεταξύ των μιγμάτων Α και Β, το μίγμα Β αναμενόταν να έχει μεγαλύτερες αντοχές από το Α λόγω των ιδιοτήτων της ΝΣ. Εντούτοις το μίγμα Α παρουσίασε υψηλότερες αντοχές από το Β. Πιθανόν, η ποσότητα της ΝΣ που χρησιμοποιήθηκε να μην ήταν αρκετή για να ενεργήσει. Εντούτοις, παρατηρώντας τα κυβικά δοκίμια μετά από τη θραύση τους (Εικόνα 3), παρατηρήθηκε ότι στα δοκίμια όλων των μιγμάτων, υπήρχε συγκέντρωση άσπρης ουσίας στο μέσο τους. Αυτή η άσπρη ουσία, πολύ πιθανόν να είναι σκόνη (πούδρα) η οποία δεν πρόλαβε να ενεργήσει στις 9 μέρες όπου συντηρήθηκε. Οπότε, πιθανόν τα μίγματα να χρειάζονται περισσότερες μέρες συντήρησης ούτως ώστε τα πληρωτικά υλικά να πραγματοποιήσουν πλήρως την ποζολανική αντίδραση με το  $\text{Ca(OH)}_2$  του σκυροδέματος και να δώσουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.



“Εικόνα 3. Φωτογραφία σε δοκίμια των μιγμάτων μετά από τη θραύση σε θλίψη.”

Γενικά, τα αποτελέσματα των αντοχών και για τα 4 μίγματα θεωρούνται ικανοποιητικά. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Ε των 4 μιγμάτων όπου παρασκευάστηκαν με το Ε ενός συμβατικού σκυροδέματος (Πίνακας 4), το Ε στα 4 μίγματα ξεπερνά σε ικανοποιητικό βαθμό αυτό του συμβατικού. Το μέγεθος μέγιστου κόκκου αδρανών που χρησιμοποιήθηκε στα 4 μίγματα ήταν 4 mm, ενώ σε ένα συμβατικό σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται συνήθως αδρανή με μέγιστο κόκκο 20 mm. Στο σκυρόδεμα, η ροή του φορτίου γίνεται κυρίως μέσα από τα αδρανή, οπότε όσο μεγαλύτερο το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αδρανών, τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα μεταφοράς του φορτίου, οπότε και μεγαλύτερο το Ε (Τριανταφύλλου 2004). Εντούτοις, η μείωση του πορώδους των 4 μιγμάτων λόγω χρήσης πληρωτικών υλικών αλλά και η χρήση ινών (μίγμα Δ) είναι αυτά που αύξησαν το Ε στα μίγματα.

Πίνακας 4: Παρουσίαση μηχανικών ιδιοτήτων μιγμάτων Α-Δ και συμβατικού σκυροδέματος.

	Μίγματα Α,Β,Γ	Μίγμα Δ	Συμβατικό Σκυρόδεμα
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	95.00-113.00	141.90	30.00
Εφελκυστική Αντοχή σε διάρρηξη (MPa)	6.00-12.00	12.94	3.00
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	33.00-35.00	37.00	25.00

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής διαδικασίας, μπορούμε να πούμε ότι το ΥΥΕΙΠΣ παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στις μηχανικές του ιδιότητες σε σχέση με το ΥΕΣ, λόγω της δράσης των ινών. Οι ίνες προσφέρουν αύξηση της ολκιμότητας, αύξηση της θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε εφελκυσμό από διάρρηξη και αύξηση του Ε, λόγω της γεφύρωσης του σκυροδέματος και λόγω ελέγχου της ρηγμάτωσης. Όσον αφορά τα πληρωτικά υλικά, και τα 3 έδωσαν σημαντική βελτίωση στις μηχανικές ιδιότητες των 3 μητρών, συγκρίνοντας με το συμβατικό σκυρόδεμα, λόγω των ιδιοτήτων και της λεπτότητας των κόκκων τους. Εντούτοις, η ΝΣ, παρόλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει έναντι της ΜΣ και της ΑΠ, δεν απέδωσε τα αναμενόμενα.



## 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### *Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά*

Aïtcin, P.C., “Developments in the application of high-performance concretes”. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, (1995) Elsevier Science Ltd.

Aïtcin, P.C., “The durability characteristics of high performance concrete”. *Cement and Concrete Research*, 25 (2003) 409-420, Elsevier Science Ltd.

Farhat F.A., Nicolaidis D., Kanellopoulos A. & Karihaloo B.L., “High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) – Performance and application to retrofitting”. *Engineering Fracture Mechanics* 74 (2007) 151-167, Elsevier Science Ltd.

Khan, M.I. & Lynsdale C.J., “Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete”. *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 123-131, Elsevier Science Ltd.

Zollo, R.F., “Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development”. *Cement and Concrete Composites* 19 (1997) 107-122, Elsevier Science Ltd.

### *Βιβλία*

Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, *ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ*, 6<sup>η</sup> Έκδοση, Πάτρα 2004.

### *Διδακτορικές διατριβές και διπλωματικές / μεταπτυχιακές εργασίες*

Kanellopoulos A., “*Influence of Superplasticiser on the Workability of HPCFRCC Matrix*”, MSc Dissertation, Cardiff University, 2001.

