

# Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με ελληνικά υλικά

*Κ. Κ. Σίδερης*

*Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης*

*Σ. Κυριτσάς*

*Διπλ. Πολ. Μηχανικός, Προϊστάμενος Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος TITAN*

*Ε. Χανιωτάκης*

*Χημικός, Διευθυντής Τμήματος Έρευνας και Ποιότητας Τσιμέντων TITAN*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα παρασκευής αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με χρήση ελληνικών υλικών (αδρανή υλικά, τσιμέντα, φίλλερ και προσθήκη πυριτικής παιπάλης). Μετρήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η ανθεκτικότητά τους στο χρόνο και συγκρίθηκαν με αυτά αντίστοιχων συμβατικών μειγμάτων της ίδιας κατηγορίας αντοχής. Από τα μέχρι στιγμής διαθέσιμα αποτελέσματα, προκύπτει ότι είναι δυνατή η παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων με ελληνικά υλικά. Τα μείγματα αυτά ανέπτυξαν τις ίδιες αντοχές με τα αντίστοιχα συμβατικά, ενώ παρουσίασαν βελτιωμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας στο χρόνο.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυροδέμα 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. Μία από τις σημαντικότερες ενέργειες κατά τη διαδικασία της διάστρωσης του σκυροδέματος είναι η συμύκνωσή του, η διαδικασία δηλαδή εκείνη που ακολουθείται προκειμένου να απομακρυνθεί ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί στο εσωτερικό της μάζας του υλικού κατά την παραγωγή και τοποθέτησή του. Η σημασία της συμύκνωσης στη διαμόρφωσή της ποιότητας του τελικού προϊόντος είναι πολύ σημαντική, γιατί κατ' αυτό τον τρόπο περιορίζεται το πορώδες του σκυροδέματος, ιδιότητα καθοριστική τόσο για την ανάπτυξη των αντοχών του σκυροδέματος, όσο και για την αύξηση της ανθεκτικότητάς του στο χρόνο.

Ο συνηθέστερος τρόπος συμύκνωσης 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.

Τα τελευταία χρόνια ο καινούριος ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός υπαγορεύει τη χρήση πυκνότερου οπλισμού στα δομικά στοιχεία, γεγονός που δυσκολεύει τη διαδικασία της δόνησης, ενώ επιπλέον προβλήματα ανακύπτουν εξαιτίας των κενών (φωλιές) που δημιουργούνται λόγω ελλιπούς συμύκνωσης τόσο στην επιφάνεια αλλά και κυρίως, στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων.

Τα προβλήματα που ανακύπτουν από τη χρήση δονητών μάζας κατά την συμπύκνωση του σκυροδέματος και κυρίως η ελλιπής συμπύκνωση του διαστρωμένου υλικού ήταν οι αιτίες που οδήγησαν στη δημιουργία ενός νέου είδους σκυροδέματος που ονομάστηκε «αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα» (Self-compacting concrete). Με τον όρο “αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα” ονομάζουμε το σκυρόδεμα εκείνο που σε νωπή κατάσταση έχει την ικανότητα να τοποθετείται στους ξυλοτύπους και να διέρχεται μέσα από τον οπλισμό μόνο με την δύναμη της βαρύτητας, χωρίς τη χρήση δονητών μάζας ή άλλης εξωτερικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ομοιογένειά του [1]. Η τεχνολογία του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στην Ιαπωνία, ενώ τη δεκαετία του 1990 άρχισε η παρασκευή του και σε ευρωπαϊκές χώρες, κυρίως στη Σκανδιναβία. Μέχρι σήμερα (05/2003) μόνο οι Ιάπωνες έχουν θεσπίσει εθνικούς κανονισμούς για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα [2], ενώ σχετικοί κανονισμοί απουσιάζουν σε όλες τις άλλες χώρες, τόσο σε εθνικό όσο και σε κοινοτικό (για τις χώρες μέλη της ΕΕ) επίπεδο. Ειδικότερα στην Ευρώπη, με τη συγκεκριμένη τεχνολογία έχει ασχοληθεί η RILEM [3], ενώ πρόσφατα η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Σκυροδέματος (EFNARC) έχει προχωρήσει στη σύνταξη σχετικών οδηγιών [4].

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με εγχώρια υλικά. Συγκεκριμένα εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας εναλλακτικές συνθέσεις, οι μηχανικές ιδιότητες και η ανθεκτικότητα στο χρόνο των οποίων εξετάζονται διεξοδικά και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες ενός συνηθισμένου σκυροδέματος (μείγμα αναφοράς). Με βάση τα διαθέσιμα αποτελέσματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η χρήση εγχώριων υλικών για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, οι μηχανικές ιδιότητες και η ανθεκτικότητα στο χρόνο του οποίου είναι εφάμιλλες ή και καλύτερες, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες ενός συμβατικού σκυροδέματος της ίδιας κατηγορίας αντοχής.

## 2. ΥΛΙΚΑ – ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

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 αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος, τα όποια αποτελέσματα όμως πρέπει πάντα να επαληθεύονται με δοκιμαστικά μείγματα πριν τεθούν σε παραγωγή.

Βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του νωπού αυτοσυμπυκνόμενου 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 (ή των 0,125) mm στην Ευρώπη, ενώ στην Ιαπωνία για τον αντίστοιχο προσδιορισμό χρησιμοποιείται το κόσκινο των 0,090 mm.

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 [5].

Γενικά ο σχεδιασμός των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων βασίζεται στο τρίπτυχο: λεπτά υλικά-ισχυρός υπερρευστοποιητής-ρυθμιστής ιξώδους, σε συνδυασμό με υψηλή δόση τσιμέντου και χαμηλή ποσότητα νερού. Οι βασικές αρχές που διέπουν το σχεδιασμό ενός αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος [4] παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ενδεικτικές αναλογίες υλικών αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος [4].

Λόγος νερού/πούδρα: 0.80 – 1.10 κατ'όγκον
Συνολική ποσότητα λεπτού υλικού: 160-240 lt (400-600 Kg) ανά κυβικό μέτρο.
Περιεκτικότητα χονδρόκοκκων αδρανών: 28-35% του συνολικού όγκου του μείγματος
Ποσότητα νερού: Δεν υπερβαίνει τα 200 lt/m <sup>3</sup> (τηρούνται οι περιορισμοί του EN-206)
Περιεκτικότητα άμμου: Ισοροπεί τον όγκο των υπολοίπων συστατικών.

Στην παρούσα εργασία παρασκευάστηκαν συνολικά 9 μείγματα (5 μείγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και 4 μείγματα αναφοράς). Για την παρασκευή όλων των μειγμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο πόρτλαντ I42.5R, ενώ 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 αναλογίες μείξεως καθώς και τα ρεολογικά χαρακτηριστικά όλων των μειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αναλογίες μείξεως (Kg/m<sup>3</sup>) και ρεολογικά χαρακτηριστικά νεπού σκυροδέματος.

	NCC-S	NCC-V	NCC1-S	NCC2-S	SCC	SCC-L	SCC-V	SCC1-S	SCC2-S
Filler	-	-	-	-	300	330	-	-	-
Άμμος θραυστή	389	384	385	406	380	990	1094	960	1008
Άμμος φυσική	583	576	540	565	475	-	-	-	-
Γαμ/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
Υπρ/τής VMA	1.6%	0.65%	2.4%	1%	2.6%	1.64%	3.76%	2.8%	2.4%
	-	-	-	-	-	-	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

Για την παρασκευή όλων των μειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν θραυστά πυριτικά αδρανή, εκτός από το SCC-L στην παρασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκαν ασβεστολιθικά αδρανή. Με τη διαφοροποίηση αυτή εκτιμήθηκε ποιοτικά η επίδραση του είδους των αδρανών στις ιδιότητες των εξεταζόμενων σκυροδεμάτων. Η κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών ικανοποιούσε σε κάθε περίπτωση τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-97.

Παρασκευάστηκαν δοκίμια κυβικά (150x150x150mm) για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής και κυλινδρικά (150x300mm) για τη μέτρηση του στατικού μέτρου ελαστικότητας και της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως. Παράλληλα παρασκευάστηκαν και δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων (πρισματικά και κυλινδρικά), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές ανθεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

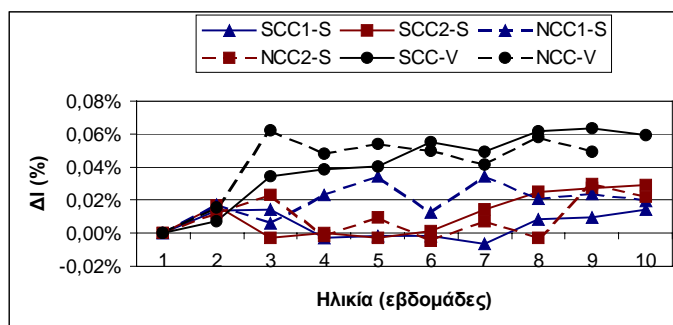
Οι μηχανικές ιδιότητες των παρασκευασθέντων μειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν στις 24 ώρες και στη συνέχεια παρέμειναν σε θάλαμο συντηρήσεως (RH≥95% και T=20±2 °C) μέχρι την ηλικία της δοκιμής. Η θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) μετρήθηκε στην ηλικία των 2 και 28 ημερών και οι τιμές ελήφθησαν ως ο μέσος όρος τριών μετρήσεων. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ) και η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως ( $f_{ct,sp}$ ) μετρήθηκαν στην ηλικία των 28 ημερών και οι τιμές ελήφθησαν ως ο μέσος όρος δύο μετρήσεων.

Πίνακας 3: Μηχανικά χαρακτηριστικά συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

	NCC-S	NCC-V	NCC1-S	NCC2-S	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
$f_{c28days}$ (MPa)	52,0	49,8	69,7	48,0	60,7	53,2	51	68,3
$E_c$ (Gpa)	31,1	29	36,2	33,9	32,5	-	30,2	36,3
$f_{ct,sp}$ (Mpa)	2,6	2,2	2,6	3,1	2,8	-	2,9	3,1

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±3 °C. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν μέχρι την ηλικία των 3 μηνών και τα αποτελέσματα (μέσος όρος τριών μετρήσεων) παρουσιάζονται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Συστολή ξηράσεως 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 στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Υδατοαπορροφητικότητα συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

	NCC-S	NCC-V	NCC1-S	NCC2-S	SCC	SCC-V	SCC1-S	SCC2-S
T10 <sup>3</sup> (g/m <sup>2</sup> )	306	765	308	612	255	561	204	306
T24h (g/m <sup>2</sup> )	4583	5867	3948	5500	4336	5612	3418	4352

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 στη συνέχεια, αφού θραύστηκαν σε διάρρηξη, οι δύο πλευρές κάθε δοκιμίου ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινολοφθαλείνης. Οι τιμές του βάθους ενανθράκωσης (μέσος όρος τεσσάρων δοκιμίων) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Βάθος ενανθράκωσης συμβατικών και αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων.

	NCC-S	NCC-V	NCC1-S	NCC2-S	SCC	SCC-V	SCC1-S	SCC2-S
Βάθος Ενανθρ άκωσης (mm)	9,3	9,7	3	15	9,8	6,5	2	12

#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως εξάγεται από τον Πίνακα 3, τα μείγματα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν παρουσιάζουν τις ίδιες ή και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες από τα αντίστοιχα μείγματα αναφοράς. Συγκεκριμένα, η θλιπτική αντοχή της ηλικίας των δύο ημερών

είναι ελαφρώς αυξημένη στα μείγματα SCC, με μόνη εξαίρεση το μείγμα με πυριτική παιπάλη (SCC1-S). Η διαπίστωση αυτή εξακολουθεί να ισχύει και στην ηλικία των 28 ημερών. Η διαφορά πάντως, είναι ελάχιστη και μπορεί κάλλιστα να θεωρηθεί ότι τα μείγματα είναι ισοδύναμα από απόψεως θλιπτικής αντοχής και πάντως σίγουρα όλα εμπίπτουν στην ίδια κατηγορία αντοχής ανά δύο (κάθε μείγμα SCC με το αντίστοιχο μείγμα αναφοράς NCC).

Η ισοτιμία SCC-NCC συνεχίζεται και στις μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας και της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως ( $E_c$  και  $f_{ct,sp}$ ). Στην περίπτωση μάλιστα αυτή φαίνεται ότι τα μείγματα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αναπτύσσουν ελαφρώς καλύτερες αντοχές από τα αντίστοιχα μείγματα αναφοράς, ιδίως στην περίπτωση της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως. Οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων έχουν αποδοθεί από άλλους ερευνητές στην ισχυρότερη συνάφεια μεταξύ τσιμεντόπαστας-αδρανούς, γεγονός στο οποίο συμβάλλει τόσο η μεγαλύτερη περιεκτικότητα των μειγμάτων σε λεπτόκοκκα υλικά όσο και η πληρέστερη συμπίκνωση που επιτυγχάνεται σε αυτά.

Η συστολή ξηράνσεως τριών αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων και των αντίστοιχων μειγμάτων αναφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Παρατηρείται ότι η συστολή ξηράνσεως όλων των μειγμάτων τείνει να σταθεροποιηθεί μετά από 10 εβδομάδες έκθεσής τους στο χώρο του εργαστηρίου, ενώ τα αυτοσυμπυκνούμενα μείγματα (συνεχόμενη γραμμή) αναπτύσσουν σχεδόν την ίδια συστολή ξηράνσεως με τα αντίστοιχα μείγματα αναφοράς τους (διακεκομμένη γραμμή).

Η υδατοαπορροφητικότητα όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. Συγκεκριμένα αναφέρεται η ποσότητα του νερού ( $g/m^2$ ) που προσροφήθηκε μέσω των τριχοειδών πόρων των δοκιμίων μετά από 10 λεπτά (T10') και 24 ώρες (T24h) επαφής τους με την επιφάνεια του νερού. Παρατηρείται η καθολική υπεροχή των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων. Σύμφωνα με αποτελέσματα άλλων ερευνητών [6] το υδατοπερατό πορώδες του σκυροδέματος αντιστοιχεί σε πόρους με διάμετρο 1000 Å. Η μειωμένη υδατοπερατότητα των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων αντιστοιχεί λοιπόν σε μικρότερο υδατοπερατό πορώδες. Η καλύτερη συμπίκνωση η οποία επιτυγχάνεται στα αυτοσυμπυκνούμενα μείγματα είναι προφανώς η κύρια αιτία για τη βελτιωμένη συμπεριφορά που αυτά παρουσιάζουν.

Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5. Παρατηρούμε ότι το βάθος ενανθράκωσης των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων είναι μικρότερο συγκρινόμενο με το βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων αναφοράς. Είναι γνωστό, ότι αιτία της ενανθράκωσης είναι το ανοικτό πορώδες της τσιμεντόπαστας, ιδίως μάλιστα αυτό που αντιστοιχεί στους πόρους με διάμετρο μεγαλύτερη των 800 Å [7]. Η καλύτερη συμπίκνωση των μειγμάτων SCC, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας λιγότερο διαπερατής τσιμεντόπαστας, είναι επίσης υπεύθυνη για την καλύτερη συμπεριφορά των μειγμάτων αυτών και στον τομέα της ενανθράκωσης.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας γίνεται φανερό ότι μπορεί να παρασκευασθεί αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με χρήση ελληνικών υλικών. Τα μείγματα αυτά έχουν βελτιωμένες ρεολογικές ιδιότητες που επιτρέπουν τη δίοδο του σκυροδέματος από τους πυκνούς οπλισμούς των ξυλοτύπων των κατασκευών και την αποτελεσματική συμπίκνωσή του αποκλειστικά και μόνο λόγω του ιδίου βάρους του.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μπορεί να παραχθεί κατόπιν λεπτομερούς σχεδιασμού και τροποποίησης των συμβατικών μειγμάτων. Το μείγμα που προκύπτει ανήκει στην ίδια κατηγορία

αντοχής με το συμβατικό σκυρόδεμα, αλλά παρουσιάζει βελτιωμένα κάποια μηχανικά χαρακτηριστικά του όπως το μέτρο ελαστικότητας και την εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως.

Η καλύτερη συμπίκνωση που επιτυγχάνεται στα αυτοσυμπυκνούμενα μείγματα είναι υπεύθυνη για το μικρότερο πορώδες των τελευταίων. Αυτό αποδεικνύεται και από τις βελτιωμένες ιδιότητες ανθεκτικότητας (υδατοαπορροφητικότητας και ενανθράκωσης) που παρουσιάζουν τα μείγματα αυτά. Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας έχουν προγραμματιστεί και πραγματοποιούνται και άλλες μελέτες ανθεκτικότητας των παρασκευασθέντων μειγμάτων, από τα μέχρι στιγμής διαθέσιμα αποτελέσματα των οποίων γίνεται φανερό ότι τα αυτοσυμπυκνούμενα μείγματα έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας σε σύγκριση με τα αντίστοιχα συμβατικά μείγματα.

Η διαπίστωση αυτή έχει ακόμη μεγαλύτερη σημασία αν αναλογιστεί κανείς ότι τα συμβατικά μείγματα που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή παρασκευάστηκαν και συμπυκνώθηκαν στο εργαστήριο, όπου έγινε επιμελημένη συμπίκνωση σύμφωνα με τους κανονισμούς. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν ισχύει στην πράξη, όπου το τρίπτυχο *δονητή μάζας-τεχνίτη-δυσμενών συνθηκών εργασίας* σε συνδυασμό με την ύπαρξη πυκνού οπλισμού δεν μπορεί να μας εγγυηθεί πλήρη συμπίκνωση. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εκλείπουν με τη χρήση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, αποτέλεσμα της χρήσης του οποίου είναι η αυξημένη ταχύτητα κατασκευής και κυρίως η βελτιωμένη ποιότητα των έργων.

#### BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Okamura H., Ouchi M.: "Self compacting concrete. Development, present use and future", in Proceedings of the First International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm. Sweden, September 1999, pp. 3-14.
2. Japan Society of Civil Engineers. Recommendation for Self Compacting Concrete, Edited by T. Uomoto and K. Ozawa, JSCE Concrete Engineering Series 31, 1999.
3. RILEM Report 23: State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174 SCC "Self Compacting Concrete". RILEM Publications, 2001.
4. EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, February 2002.
5. W. Zhu, P. J. M. Bartos: "Permeation Properties of self-compacting concrete", Cement and Concrete Composites, 2003, in press.
6. Σίδερης Κ., Σάββα Α.: "Πορώδες Σκυροδέματος", Δελτίο Σ.Π.Μ.Ε., τεύχος 211 (Ιαν. – Φεβ. 1993), σελ. 39-48.
7. Wee T. H., Suryavanshi K. A., Logendran D.: "Pore Structure Controlling the the Carbonation of a hardened cement matrix Blended with Mineral Admixture", Advances in Cement Research, Vol. 11, No2, April 1999, pp. 91-96.