

Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στη θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων με αδρανή ανακυκλωμένα συμβατικά δοκίμια

Α.Ε. Σάββα

Επίκουρος Καθηγήτρια. Εργαστήριο Δομικών Υλικών ΔΠΘ.

Λέξεις κλειδιά: Ανακυκλωμένα αδρανή, ανακυκλωμένα σκυροδέματα, έτοιμο σκυρόδεμα, υψηλές θερμοκρασίες, εναπομένουσα αντοχή, έμμεσες μέθοδοι, κρουσίμετρο, ηχώμετρο,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρασκευάζονται σκυροδέματα με δύο είδη τσιμέντων Π42.5N και Π32.5N, στα οποία τα αδρανή τους αποτελούνται εξ ολοκλήρου ή κατά το ήμισυ από θραυσμένα συμβατικά δοκίμια εργοστασιακού σκυροδέματος C12/15, C16/20 και C20/25. Μελετάται η θλιπτική αντοχή σε θερμοκρασίες μέχρι τους 750 °C, τόσο με θραύση δοκιμίων, όσο και με έμμεσες μεθόδους – κρουσίμετρο και ηχώμετρο. Γίνεται η σύγκριση με αντίστοιχα σκυροδέματα από συνήθη πυριτικά θραυστά αδρανή. Δίνονται καμπύλες εναπομένουσας αντοχής καθώς και καμπύλες έμμεσων μεθόδων και αντοχής, τόσο στους 20 °C όσο και μετά την έκθεση στις υψηλές θερμοκρασιακές δράσεις.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξημένη ζήτηση για χώρους ταφής καθώς και η έλλειψη φυσικών πηγών αδρανών ενίσχυσε τη χρήση των αποβλήτων κατασκευής και κατεδάφισης (C&D) σαν πηγή αδρανών, έχουν δε εφαρμοστεί, με επιτυχία, προγράμματα όπου τα μπάζα από κατεδαφίσεις παλιών σκυροδεμάτων χρησιμοποιήθηκαν σε νέα σκυροδέματα (Torcu 1995, Tavakoli 1996). Σε πολλά μέρη του κόσμου, μετά την εισαγωγή ειδικής νομοθεσίας για τα απόβλητα, υπό μορφή κανονισμών και οδηγιών, η τάση προς βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων κατασκευής και κατεδάφισης γίνεται πια νομική απαίτηση. Για το λόγο αυτό, οι διαφορετικοί τομείς του κλάδου των οικοδομικών και τεχνικών έργων στις αναπτυγμένες χώρες αναλαμβάνουν διάφορες πρωτοβουλίες, τόσο για να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή αποβλήτων όσο και για να βελτιωθεί η διαχείρισή τους, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Οι πρωτοβουλίες κινούνται προς την κατεύθυνση της αύξησης της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των οικοδομικών απορριμμάτων (Limbachiya 2006). Πράγματι, σήμερα είναι ευρέως αποδεκτό ότι η ανακύκλωση των μπαζών για την επαναχρησιμοποίησή τους σαν αδρανή σε νέο σκυρόδεμα προσφέρει μια οικονομικά βιώσιμη και φιλική στο περιβάλλον λύση, η οποία θα μετατρέψει αυτό το υλικό σε έναν πολύτιμο πόρο (Dhir 1999, Poon 2002, Sagoe-Crentsil 2001). Ανασκοπήσεις πάνω στα ανακυκλωμένα αδρανή και σκυροδέματα έχει γίνει από πολλούς ερευνητές (Nixon 1978, Hansen 1992, ACI 2002, Torcu 1995). Όμως ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών οι περισσότεροι διστάζουν να χρησιμοποιήσουν ένα σχετικά αδοκίμαστο υλικό που δεν έχει πολλές οδηγίες και προδιαγραφές για τη χρήση του.

Ένα μεγάλο πρόβλημα στην ανακύκλωση των μπαζών της κατεδάφισης είναι η ποικιλία των αδρανών που προκύπτουν και η αστάθεια στις ιδιότητές τους (Katz 2003). Κι αυτό γιατί αν η πηγή των ανακυκλωμένων αδρανών είναι ένα κέντρο ανακύκλωσης μπαζών σκυροδέματος, τα κομμάτια συλλέγονται από διαφορετικές προελεύσεις και οι ιδιότητές τους δεν έχουν ομοιογένεια. Αυτό οδηγεί σε δυσκολίες στη χρήση τους σε νέο σκυρόδεμα (Hansen 2003, Katz 2003). Πρόβλημα επίσης αποτελεί και η μόλυνση των ανακυκλωμένων υλικών, είτε μετά ή κατά τη διάρκεια της κατεδάφισης, με άλλα καταδαφιστέα υλικά πχ ξύλα, χαρτιά, γύψο, λάστιχα κλπ είτε πριν την

κατεδάφιση πχ. ενανθράκωση, ύπαρξη χλωριόντων ή θεικών ιόντων κλπ. Προφανώς δεν θα υπήρχε πρόβλημα να γίνει σκυρόδεμα από μπάζα που προέρχονται από τη βιομηχανία έτοιμου σκυροδέματος.

Το μεγαλύτερο μέρος του σκυροδέματος που παράγεται είναι έτοιμο σκυρόδεμα αλλά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η ποσότητα αποβλήτων που προέρχεται από τη βιομηχανία διότι αν και τα εργοστάσια είναι όμοια σε όλη την επικράτεια, κάθε ένα από αυτά έχει ξεχωριστή πρακτική παραγωγής που εξαρτάται από τις τοπικές διαφοροποιήσεις στην αγορά, στο προσωπικό, στη γεωλογία της περιοχής και στη διεύθυνση της εταιρείας. Ο προσδιορισμός των αποβλήτων που προέρχεται από την βιομηχανία του έτοιμου σκυροδέματος γίνεται πιο δύσκολος, εξαιτίας της ανταγωνιστικότητας των εταιρειών αλλά και του κλίματος μυστικότητας για απόκρυψη των πραγματικών επιπέδων αποβλήτων. Επιπλέον οι βιομηχανίες δεν υποχρεώνονται να καταγράψουν και να αναφέρουν την ποιότητα και την ποσότητα των απορριμμάτων που προκαλούν και επομένως δεν μπορούν να δώσουν ακριβή στοιχεία (Fatta 2003).

Τα απόβλητα των βιομηχανιών έτοιμου σκυροδέματος είναι υγρά και στερεά. Τα υγρά προέρχονται από το πλύσιμο των βαρέλων στο τέλος κάθε εργάσιμης ημέρας, το πλύσιμο των εγκαταστάσεων και από επιστροφές σκυροδέματος, είτε λόγω καθυστερήσεων είτε, κυρίως, λόγω υπερεκτίμησης της απαραίτητης ποσότητας από τους πελάτες, οι οποίοι προτιμούν να παραγγείλουν περισσότερο παρά να υπολογίσουν με ακρίβεια. Έτσι οι βιομηχανίες πρέπει να βρουν χρήση για αυτές τις επιστροφές. Επιπλέον, τα υγρά αυτά απόβλητα είναι αλκαλικά, με $\text{PH} \geq 11.5$ και μπορούν να επιδράσουν στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη ζωή αν δεν διαχειριστούν σωστά (Fatta 2003) αφού μπορεί να μολύνουν τους τοπικούς υδροφόρους ορίζοντες και το οικοσύστημα (Sealey 2001)

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης των ιδιοτήτων ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων παρασκευασμένων με μπάζα βιομηχανίας σκυροδέματος, που προέκυψαν κατά τη θραύση δοκιμίων για τον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων της. Επομένως η χαρακτηριστική αντοχή των αρχικών σκυροδεμάτων είναι μεν σταθερή, αλλά η αντοχή τους δεν είναι ίδια, αφού προέρχονται από διαφορετικό σκυροδέματα. Διερευνάται, αν το είδος του τσιμέντου επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων καθώς και η συμπεριφορά τους έναντι υψηλών θερμοκρασιακών δράσεων, τόσο με θραύση δοκιμίων όσο και με έμμεσες μεθόδους. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το κρουσίμετρο και το ηχώμετρο, αφού είναι από τις πιο συνηθισμένες δοκιμές που μπορούν να εφαρμοστούν στο πεδίο εύκολα, αλλά και επιπλέον, οι συσκευές τους είναι σχετικά φθηνές (Qasrawi 2000). Όμως είναι γνωστό ότι τα αποτελέσματα του κρουσίμετρο όσο και του ηχώμετρου επηρεάζονται από το είδος των αδρανών (Amasaki 1991, Neville 1995). Δίνονται καμπύλες αντοχής – έμμεσων σε διάφορες θερμοκρασίες.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Συμβατικά δοκίμια σκυροδέματος C12/15, C16/20 και C16/20, τα οποία είχαν σπάσει στην διάρκεια ενός περίπου έτους για τον έλεγχο της ποιότητας παραγωγής της βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος ΤΕΚΤΩΝ της Ξάνθης, χρησιμοποιήθηκαν σαν αδρανή για την παρασκευή ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων. Τα σπασμένα κομμάτια των δοκιμίων διήλθαν από τους σπαστήρες αδρανών της εταιρείας, διαχωρίστηκαν σε πέντε κοκκομετρικές ομάδες, με $d_{\text{max}} 32$ mm και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όπου έγινε και η κοκκομετρική τους ανάλυση. Παρασκευάστηκαν δύο σειρές δοκιμίων, η πρώτη με τσιμέντο CEM II42.5N και η δεύτερη με CEM II32.5N. Τα μείγματα και των δύο σειρών είχαν τις ίδιες αναλογίες μείξης, δηλαδή ποσότητα τσιμέντου 330 kg/m^3 , λόγο $w = W/C = 0.6$ και κοκκομετρικές καμπύλες εντός των ορίων του ΚΤΣ-97 (Πιν. 1). Για κάθε σειρά παρασκευάστηκαν έξι μείγματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα

αδρανή και ένα μείγμα με καθαρά αμμοχάλικα, σαν μείγμα αναφοράς (κωδική ονομασία N=Normal). Από τα έξι μείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή κάθε σειράς, τα τρία, ένα για κάθε κατηγορία του σκυροδέματος προέλευσης, παρασκευάστηκαν με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα (κωδική ονομασία R = Recycled), ενώ τα άλλα τρία παρασκευάστηκαν με συνήθη πυριτική άμμο (θραυστή και φυσική) και με χονδρόκοκκα τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα (κωδική ονομασία HR= Half recycled). Στον πίνακα 2 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών, ανακυκλωμένων και μη, ενώ στον πίνακα 3 δίνονται οι αναλογίες μείξης των μειγμάτων. Παρατηρείται ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή (αλλά και τα φυσικά) παρουσιάζουν επιφανειακή υγρασία, αντί της συνήθους απορροφητικότητας, διότι, την ημέρα θραύσης τους στους σπαστήρες και μεταφοράς τους, έβρεχε καταρρακτωδώς.

Πίνακας 1. Κοκκομετρικές καμπύλες των παρασκευασθέντων μειγμάτων

Κόσκινα	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
Μείγματα	Διερχόμενα (%)							
R12/15 (R12)	5.5	13.8	23.5	39.7	49.7	58.4	73.8	100
R16/20 (R16)	6.0	14.0	22.8	39.3	49.3	57.9	74.2	100
R20/25 (R20)	4.0	10.4	19.3	38.1	49.1	57.6	72.1	100
HR12/15 (HR12)	7.7	17.3	28.9	41.4	50.5	58.4	73.8	100
HR16/20 (HR 16)	7.7	17.3	28.9	41.4	50.1	57.9	74.2	100
HR20/25 (HR20)	7.7	17.3	28.9	41.5	50.2	57.6	72.1	100
N	7.7	17.6	29.2	42.2	51.7	57.4	61.9	100

Πίνακας 2. Φυσικές ιδιότητες των αδρανών

Αδρανή	Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)			Επιφανειακή Υγρασία (%)		
	Άμμος	Γαρμπίλι	Σκύρα	Άμμος	Γαρμπίλι	Σκύρα
R12/15	2.20	2.38	2.44	1.060	1.030	1.010
R16/20	2.20	2.43	2.44	1.063	1.024	1.015
R20/25	2.20	2.42	2.47	1.069	1.026	1.020
Συνήθη θραυστά	2.63	2.64	2.65	1.032	1.011	1.001

Πίνακας 3. Αναλογίες μείξης των σκυροδεμάτων

Μείγμα	C	A	W	Συνήθη Αδρανή (%)			Ανακυκλωμένα Αδρανή (%)		
				Άμμος	Γαρμπίλι	Σκύρα	Άμμος	Γαρμπίλι	Σκύρα
R12	330	1541.1	198				50	9	41
R16	330	1580.7	198				50	9	41
R20	330	1551.0	198				50	9	41
HR12	330	1683.0	198	50				9	41
HR16	330	1729.2	198	50				9	41
HR20	330	1696.2	198	50				9	41
N	330	1758.9	198	50	9	41			

Για κάθε μείγμα παρασκευάστηκαν 6 κυβικά δοκίμια, με ακμή 15 cm, για το προσδιορισμό της χαρακτηριστικής αντοχής στις 28 ημέρες και κυβικά δοκίμια ακμής 10 cm καθώς και κυλινδρικά δοκίμια (15 × 30 cm) για τον προσδιορισμό και σύγκριση των θλιπτικών αντοχών και των αντοχών σε εφελκυσμό από διάρρηξη αντιστοίχως, στους 20 °C. Τα δοκίμια, ξεκαλουπώθηκαν 24 ώρες μετά την παρασκευή τους και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης (στους 20 ± 2 °C και υγρασία > 95 %), μέχρι την ηλικία των δοκιμών. Μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή στις 7, 28, 90, 180 και 365 ημέρες και η εφελκυστική αντοχή στις 28, 180 και 365 ημέρες.

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, κυβικά δοκίμια ακμής 10 cm, στις 28 ημέρες βγήκαν από το θάλαμο υγρασίας και τοποθετήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου, ώστε κατά την πύρωσή τους να μην περιέχουν πολλή υγρασία. Στους 12 μήνες τα δοκίμια, εισήλθαν σε φούρνο, για πύρωση στους 100°C, 300°C και 550°C βαθμούς, όπου και παρέμειναν για δύο ώρες στη max θερμοκρασία. Κατόπιν τα δοκίμια αφέθηκαν για 24 ώρες ώστε να κατεβεί η θερμοκρασία τους σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μετά έγιναν οι μετρήσεις.

Για τις έμμεσες μεθόδους χρησιμοποιήθηκε το κρουσίμετρο και η συσκευή των υπερήχων. Η κρουσιμέτρηση των δοκιμών έγινε με 10 κρούσεις ανά δοκίμιο, τρία δοκίμια ανά μέτρηση. Τα δοκίμια κρουσιμετρήθηκαν κατακόρυφα και επομένως οι ενδείξεις τους είναι λίγο χαμηλότερες από τις συνήθειες με οριζόντια κρούση. Τα δοκίμια που επρόκειτο να πυρωθούν, κρουσιμετρήθηκαν τόσο πριν την είσοδο στο φούρνο, όσο και μετά την έξοδό τους από αυτόν. Μετά την κρουσιμέτρηση των δοκιμών, έγινε η δοκιμή με το ηχώμετρο, με 2 ηχομετρήσεις ανά δοκίμιο, τρία δοκίμια ανά δοκιμή. Τα δοκίμια ηχομετρήθηκαν τόσο στους 20°C όσο και μετά την έξοδό τους από το φούρνο.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Εφελκυστική αντοχή

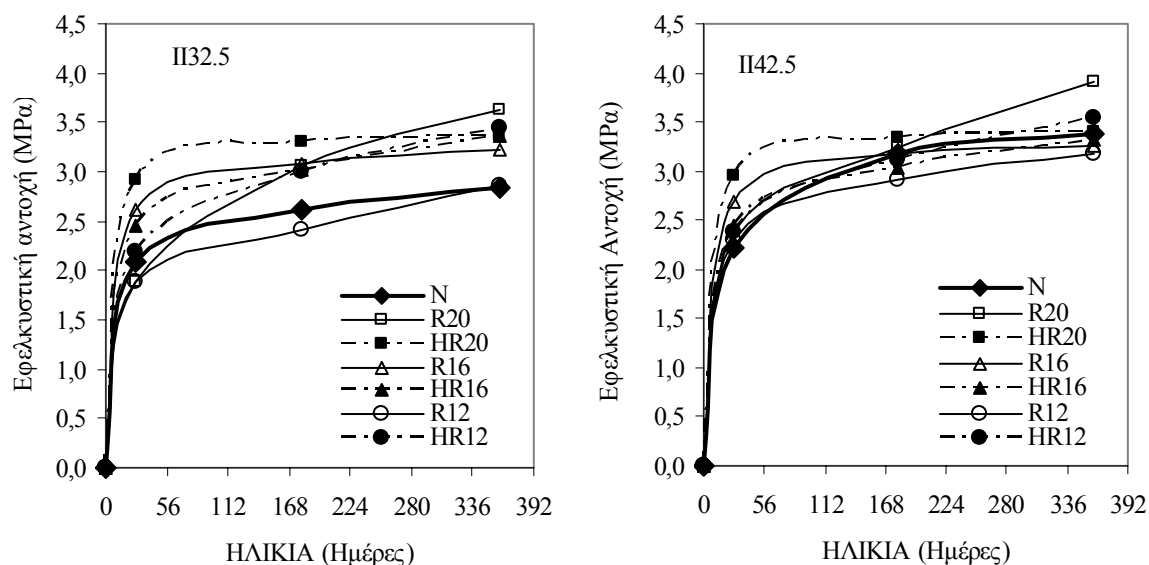
Στον πίνακα 4 και στο σχήμα 1, δίνεται η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη των μειγμάτων, σαν μέσος όρος τριών τιμών

Πίνακας 4. Αντοχή σε διάρρηξη των μειγμάτων

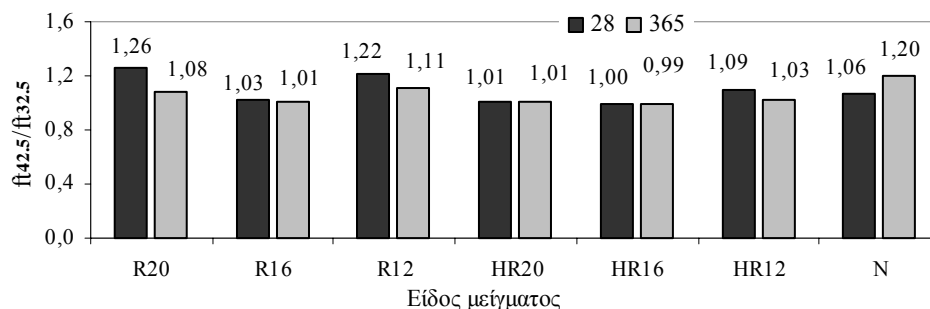
Εφελκυστική Αντοχή σε Διάρρηξη (MPa)							
Μείγμα	N	R20	HR20	R16	HR16	R12	HR12
CEM II 32.5N							
28	2.1	1.9	2.9	2.6	2.4	1.9	2.2
180	2.6	3.1	3.3	3.1	3.0	2.4	3.0
360	2.8	3.6	3.4	3.2	3.4	2.9	3.5
CEM II 42.5N							
28	2.2	2.4	2.9	2.7	2.4	2.3	2.4
180	3.2	3.2	3.3	3.2	3.0	2.9	3.1
360	3.4	3.9	3.4	3.3	3.3	3.2	3.5

Παρατηρείται ότι η εφελκυστική αντοχή των ανακυκλωμένων μειγμάτων με τσιμέντο Π32.5 είναι μεγαλύτερη από την αντοχή του συμβατικού σκυροδέματος σε όλες τις ηλικίες, με εξαίρεση τα μείγματα R20 και R12 που έχουν αντοχές μικρότερες από το συμβατικό μέχρι τις 28 και 180 ημέρες αντίστοιχα. Για τσιμέντο Π42.5N, στις 28 ημέρες όλα τα μείγματα έχουν αντοχή

μεγαλύτερη από το συμβατικό, στον ένα χρόνο όμως, τα περισσότερα μείγματα έχουν αντοχή μικρότερη, εκτός από τα R20 και HR12



Σχήμα 1. Εφελκυστική αντοχή των μειγμάτων, αριστερά με τσιμέντο CEMII32.5N και δεξιά με τσιμέντο CEMII42.5N



Σχήμα 2. Εφελκυστική αντοχή με τσιμέντο CEMII 42.5N ως προς την αντοχή με τσιμέντο CEMII 32.5N

Η χρήση υψηλότερης ποιότητας τσιμέντου αυξάνει την εφελκυστική αντοχή όλων των μειγμάτων έως 26% στις 28 ημέρες και έως 11% στις 365 ημέρες (Σχ 2). Η αντίστοιχη αύξηση για το συμβατικό σκυρόδεμα είναι 6% στις 28 ημέρες και 20% στις 360 ημέρες. Φαίνεται δε ότι στα μείγματα με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα, το τσιμέντο με την μεγαλύτερη αντοχή, δηλ. την υψηλότερη λεπτότητα λειτουργεί αποτελεσματικότερα, βελτιώνοντας ίσως τις διεπιφάνειες αδρανών – τσιμεντόπαστας, με αποτέλεσμα οι αντοχές τους να αυξάνονται πολύ περισσότερο από τις αντοχές των μειγμάτων με μόνο τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα ή το συμβατικό. Έτσι η αντοχή τους αυξάνεται έως 26% στις 28 ημέρες και έως 11% στις 365 ημέρες, όταν οι αυξήσεις στα μείγματα με φυσική άμμο είναι έως 9% και έως 3%, στις 28 και 365 ημέρες αντιστοίχως.

3.2 Χαρακτηριστική αντοχή - Θλιπτική αντοχή στους 20 °C

Η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων από ανακυκλωμένα αδρανή (Πιν. 5) είναι μεγαλύτερη από την αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης και κατά κανόνα μεγαλύτερη από αυτήν του συμβατικού σκυροδέματος, όταν το τσιμέντο είναι 32.5 και ίση με αυτήν όταν το τσιμέντο είναι 42.5. Η χρήση υψηλότερης αντοχής τσιμέντου, κατά κανόνα, αυξάνει τις χαρακτηριστικές αντοχές των μειγμάτων. Υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις, που σημαίνει ότι η αντοχή δεν εξαρτάται μόνο από το τσιμέντο αλλά και από το είδος των αδρανών και το ποσοστό των ανακυκλωμένων στο σκυρόδεμα. Τα σκυροδέματα προέλευσης μπορεί να είχαν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή, αλλά αποτελούνται από παρτίδες που προφανώς δεν είχαν την ίδια συμβατική αντοχή. Την υψηλότερη χαρακτηριστική αντοχή παρουσίασε το μείγμα που προέρχεται από σκυρόδεμα C16/20 και έχει φυσική άμμο στη θέση της ανακυκλωμένης.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστική και θλιπτική αντοχή, ενδείξεις κρουσιμέτρου και ταχύτητας υπερήχων μειγμάτων με τσιμέντο CEMII42.5N

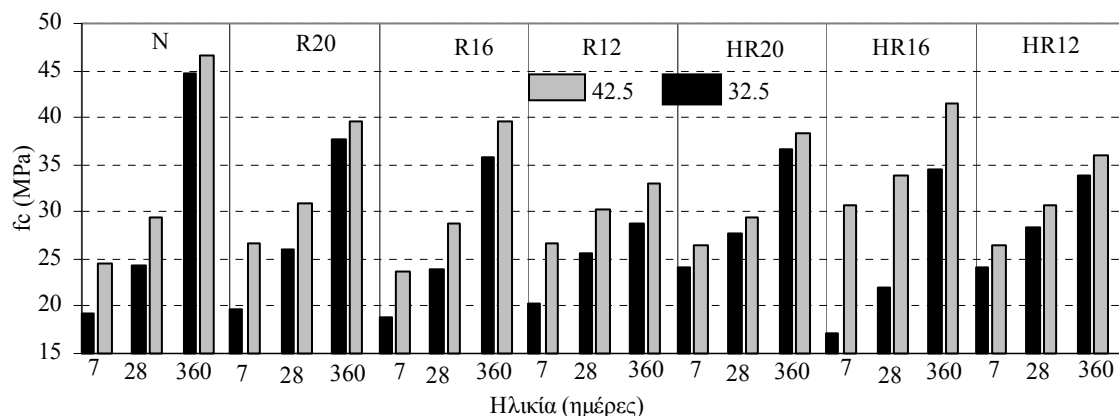
ΜΕΙΓΜΑ	N	R20	HR20	R16	HR16	R12	HR12
ΗΛΙΚΙΑ							
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPα)							
28	30	30	30	25	37	30	25
ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ f_c (MPα)							
7	24.6	26.6	26.4	23.8	30.7	26.7	26.5
28	29.4	30.9	29.5	28.8	33.9	30.2	30.6
90	33.4	35.2	34.6	35.6	37.4	32.3	34.3
180	39.0	38.0	37.8	38.4	39.8	32.7	35.6
365	46.6	39.6	38.4	39.6	41.6	32.9	36.0
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟΥ R							
7	12.0	12.7	14.5	12.1	12.7	10.9	12.0
28	13.8	14.5	15.6	14.9	15.0	14.3	14.8
90	15.0	16.2	17.3	19.2	17.9	16.4	17.2
180	16.7	17.1	18.2	20.8	19.6	16.9	18.1
365	18.9	17.7	18.6	21.9	21.0	17.4	18.6
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ V (km/s)							
7	3.616	3.824	4.046	4.057	3.879	3.535	4.017
28	3.769	3.980	4.165	4.095	4.035	3.900	4.082
90	3.859	4.101	4.330	4.133	4.201	4.119	4.136
180	3.991	4.177	4.420	4.147	4.292	4.143	4.155
365	4.120	4.219	4.447	4.155	4.353	4.184	4.163

Στους πίνακες 5 και 6 και στο σχήμα 3, δίνονται οι θλιπτικές αντοχές των μειγμάτων στους 20 °C. Παρατηρείται ότι όταν το τσιμέντο είναι II 32.5N, οι αντοχές των ανακυκλωμένων μειγμάτων κυμαίνονται στις 7 ημέρες από 17.2 έως 24.1 MPa, με αντοχή συμβατικού 19.2 MPa, στις 28 ημέρες από 22 έως 28.4 MPa έναντι 24.2 MPa του συμβατικού και στις 365 ημέρες από 28.8 έως 37.8 MPa έναντι 44.6 MPa του συμβατικού. Στις 7 και 28 ημέρες δηλ. τα ανακυκλωμένα

σκυροδέματα παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές από το συμβατικό 3-25% και 7-17% στις 7 και 28 ημέρες αντιστοίχως, με εξαίρεση το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα 16/20 (R16 και HR16) που παρουσιάζει μείωση 1-10%. Στις 365 ημέρες όμως, το συμβατικό σκυρόδεμα παρουσιάζει υψηλότερες αντοχές κατά 15-36%.

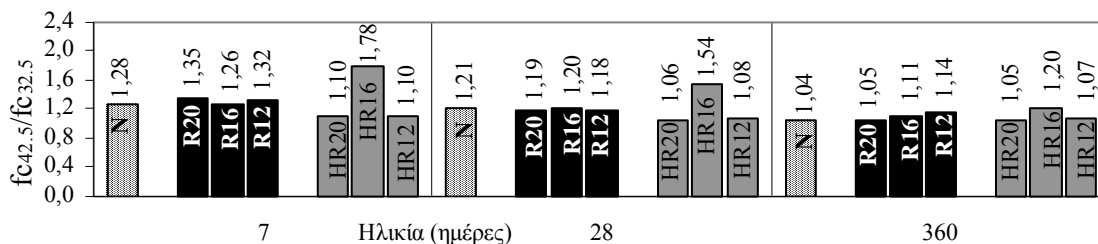
Πίνακας 6. Χαρακτηριστική και θλιπτική αντοχή, ενδείξεις κρουσιμέτρου και ταχύτητας υπερήχων μειγμάτων με τσιμέντο CEMII32.5N

ΜΕΙΓΜΑ	N	R20	HR20	R16	HR16	R12	HR12
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)							
ΗΛΙΚΙΑ							
28	20	25	30	25	25	20	25
ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ f_c (MPa)							
7	19.2	19.7	24.1	18.9	17.2	20.3	24.1
28	24.2	25.9	27.8	23.9	22.0	25.6	28.4
90	30.3	32.1	33.0	30.0	28.4	27.9	33.0
180	36.0	35.4	35.5	32.7	32.3	28.5	33.6
365	44.6	37.8	36.7	35.8	34.6	28.8	33.8
ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΟΥ R							
7	12.0	11.8	11.6	12.4	11.4	13.8	11.0
28	13.5	13.8	13.5	14.0	13.0	15.8	13.9
90	15.2	15.4	15.9	15.8	15.0	16.6	16.8
180	16.6	16.3	17.2	16.6	16.2	16.8	17.2
365	18.4	17.0	17.9	17.5	17.0	16.9	17.7
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ V (km/s)							
7	3.656	3.923	3.778	4.053	3.678	3.822	3.668
28	3.850	4.010	4.023	4.078	3.946	4.065	4.013
90	4.016	4.085	4.298	4.108	4.200	4.157	4.303
180	4.150	4.121	4.421	4.117	4.339	4.176	4.358
365	4.320	4.146	4.481	4.128	4.433	4.189	4.371



Σχήμα 3. Θλιπτική αντοχή όλων των μειγμάτων στους 20°C

Για τσιμέντο Π42.5N, οι αντοχές των ανακυκλωμένων κυμαίνονται από 23.8 έως 30.7 MPa, έναντι 24.6 MPa του συμβατικού στις 7 ημέρες, από 28.8 έως 33.9 MPa έναντι 29.4 MPa και στις 365 ημέρες κυμαίνονται από 32.9 έως 41.6 MPa, έναντι 46.6 MPa του συμβατικού. Οι αντοχές αυτές είναι κατά 8-25% στις 7 ημέρες και κατά 3-15% υψηλότερες του συμβατικού με εξαίρεση το R16 (μείωση έως 3%). Στις 365 ημέρες το συμβατικό έχει αντοχές μεγαλύτερες κατά 11-29% σε σχέση με τα ανακυκλωμένα. Επομένως, ανεξαρτήτως τσιμέντου, τα ανακυκλωμένα έχουν υψηλές πρώιμες αντοχές αλλά αργότερα οι αντοχές τους είναι μικρότερες του συμβατικού. Πιθανόν αυτό οφείλεται σε μια έντονη ενυδάτωση τις πρώτες ημέρες των προσκολλημένων κόκκων, η οποία όμως ολοκληρώνεται μετά τις 28 ημέρες και έτσι η αντοχή των ανακυκλωμένων επιβραδύνεται.

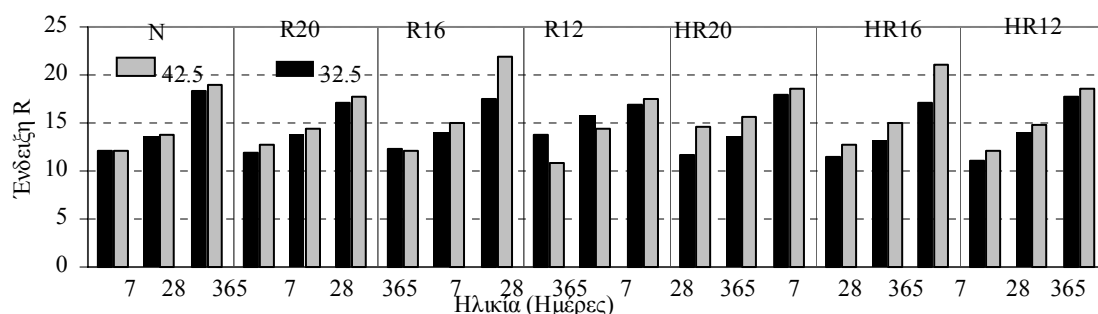


Σχήμα 4. Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων με τσιμέντο CEMII 42.5N, ως προς την αντοχή των αντίστοιχων μειγμάτων με CEMII 32.5N, στους 20°C

Μείγματα παρασκευασμένα με τσιμέντο Π42.5 έχουν υψηλότερες αντοχές από τα μείγματα με τσιμέντο Π32.5 (Σχ. 4). Αναλυτικά, τα τσιμέντο 42.5 αυξάνει τις αντοχές των μειγμάτων με όλα τα αδρανή ανακυκλωμένα (μείγματα R) κατά 26-35% στις 7 ημέρες, κατά 18-20% στις 28 και κατά 5-14% στον ένα χρόνο. Όταν η ανακυκλωμένη άμμος αντικατασταθεί με φυσική, οι αυξήσεις λόγω της υψηλής ποιότητας τσιμέντου είναι 10-78% στις 7 ημέρες, 6-54% στις 28 και 5-20% στις 365 ημέρες. Οι αυξήσεις για το συμβατικό είναι 28%, 21% και 4% στις 7, 28 και 365 ημέρες αντίστοιχα. Παρατηρείται δηλ. ότι τα μείγματα με όλα τα αδρανή ανακυκλωμένα αυξάνουν τις αντοχές τους όσο περίπου και το συμβατικό ή μέχρι 10% περισσότερο, όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο υψηλότερης αντοχής, ενώ τα μείγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή (HR) δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το είδος του τσιμέντου αφού οι αυξήσεις φτάνουν μέχρι 10%. Εξαιρέση αποτελεί το μείγμα HR16, που είχε την υψηλότερη χαρακτηριστική αντοχή, το οποίο αυξάνει τις αντοχές του όταν το τσιμέντο έχει υψηλότερες αντοχή, κατά 78%, 54% και 20%, στις 7, 28 και 365 ημέρες αντίστοιχως. Η τάση πάντως των ανακυκλωμένων είναι η ίδια με αυτήν των συμβατικών σκυροδεμάτων, ένα δηλ τσιμέντο υψηλότερης αντοχής αυξάνει τις αντοχές στις μικρές ηλικίες λόγω της ταχύτερης ενυδάτωσης που οφείλεται στη μεγαλύτερη λεπτότητα, μακροπρόθεσμα όμως, οι αντοχές τείνουν να είναι οι ίδιες, ανεξάρτητα από το είδος του τσιμέντου.

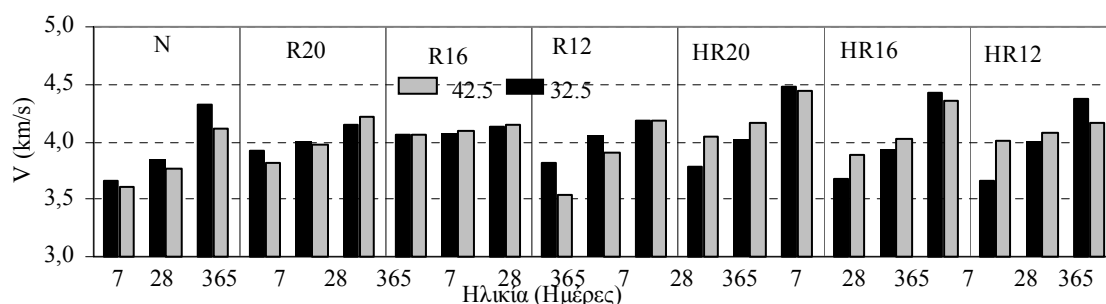
3.3 Έμμεσες μέθοδοι στους 20 °C

Παρατηρείται ότι και οι ενδείξεις του κρουσίμετρου (Σχ. 5) είναι μεγαλύτερες στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα όταν χρησιμοποιείται το τσιμέντο Π42.5N, με ελάχιστες εξαιρέσεις (R12 στις 7 και 28 ημέρες). Οι αυξήσεις είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του συμβατικού σκυροδέματος, ειδικά στα μείγματα όπου χρησιμοποιείται φυσική άμμος στη θέση της ανακυκλωμένης, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής. Και εδώ οι αυξήσεις μειώνονται με τον χρόνο με εξαίρεση πάλι το μείγμα από σκυρόδεμα C16/20 (HR16 και R16) που παρουσιάζει μεγάλες αυξήσεις όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο Π42.5 (24% έναντι 2-5% των υπολοίπων μειγμάτων).



Σχήμα 5. Ενδείξεις R αναπήδησης του κρουσιμέτρου των μειγμάτων στους 20 °C

Στο σχήμα 6 δίνονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας των υπερήχων στα παρασκευασθέντα μείγματα. Παρατηρείται ότι η και ταχύτητα των υπερήχων των ανακυκλωμένων μειγμάτων είναι μεγαλύτερη από του συμβατικού όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο Π42.5. Για τσιμέντο Π32.5, στις 7 και 28 ημέρες, τα ανακυκλωμένα έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από το συμβατικό, αλλά στις 365 ημέρες, τα σκυροδέματα με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα έχουν μικρότερη ταχύτητα, ενώ τα σκυροδέματα με φυσική άμμο στη θέση της ανακυκλωμένης έχουν ταχύτητα μεγαλύτερη από το συμβατικό. Πάντως οι διαφορές δεν είναι πολύ μεγάλες και κυμαίνονται μέχρι 8% στις 365 ημέρες ανεξαρτήτως μείγματος ή τσιμέντου.



Σχήμα 6. Ταχύτητα υπερήχων των μειγμάτων στους 20°C

Η χρήση τσιμέντου υψηλότερης αντοχής επηρεάζει λίγο την ταχύτητα των υπερήχων, η οποία μεταβάλλεται από -8% έως 10% στις 7 ημέρες, ενώ στις 365 ημέρες οι διαφορές είναι της τάξης του 2% με 5%. Πάντως τα μείγματα με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα έχουν μικρότερες ταχύτητες στις 7 και 28 ημέρες με τσιμέντο Π42.5 και ίδιες ή μεγαλύτερες στις 365 ημέρες. Αντίθετα, τα σκυροδέματα με φυσική άμμο, έχουν μεγαλύτερες ενδείξεις στις 7 και 28 ημέρες και μικρότερες στις 365 ημέρες, όταν χρησιμοποιείται το Π42.5. Το συμβατικό σκυροδέμα έχει σε όλες τις ηλικίες μικρότερες ταχύτητες όταν χρησιμοποιείται Π42.5N, αλλά μόνο κατά 1%-5%.

3.4 Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

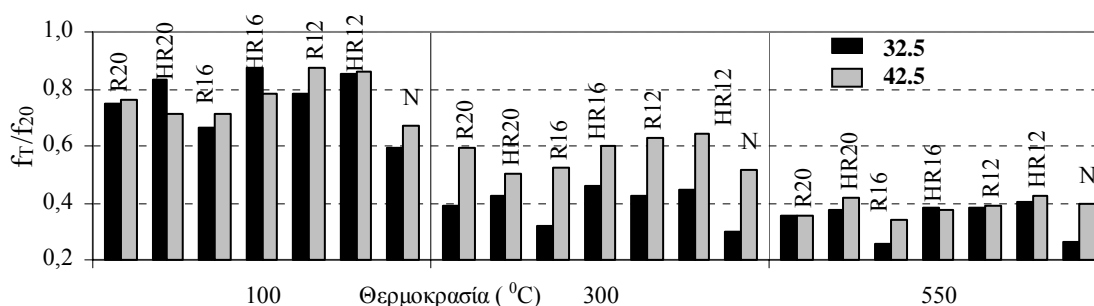
Στον πίνακα και το σχήμα 7 φαίνεται ότι για τσιμέντο Π32.5N, τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα χάνουν το 13-34% της αρχικής αντοχής τους όταν πυρωθούν στους 100 °C, ενώ για το συμβατικό οι αντίστοιχες απώλειες είναι 41%. Στους 300 °C οι απώλειες είναι 54-61% για τα ανακυκλωμένα έναντι 70% του συμβατικού και στους 550 °C, οι απώλειες είναι 59-74% για τα ανακυκλωμένα και

74% για το συμβατικό. Για τσιμέντο Π42.5N, οι αντίστοιχες απώλειες είναι 12-29% έναντι 33% του σκυροδέματος αναφοράς στους 100 °C, 36-50% έναντι 48% στους 300 °C και 57-66% έναντι 60% στους 550 °C.

Πίνακας 7. Εναπομένουσες αντοχές, ενδείξεις κρουσιμέτρου και ταχύτητας υπερήχων των μειγμάτων

ΜΕΙΓΜΑ	f_T/f_{20}			R_T/R_{20}			V_T/V_{20}			
	100	300 °C	550	100	300 °C	550	100	300 °C	550	
CEMII 32.5N	R12	0.78	0.43	0.38	0.90	0.83	0.78	0.97	0.56	0.30
	R16	0.66	0.32	0.26	0.90	0.81	0.81	0.97	0.57	0.29
	R20	0.75	0.39	0.35	0.96	0.88	0.77	0.98	0.54	0.35
	HR12	0.86	0.44	0.41	0.85	0.78	0.76	0.96	0.59	0.34
	HR16	0.87	0.46	0.38	0.92	0.85	0.78	0.93	0.61	0.36
	HR20	0.83	0.43	0.37	0.96	0.87	0.70	0.96	0.60	0.27
	N	0.59	0.30	0.26	0.97	0.87	0.68	0.94	0.60	0.38
CEMII 42.5N	R20	0.76	0.59	0.35	0.94	0.78	0.66	0.93	0.53	0.19
	HR20	0.71	0.50	0.42	0.79	0.73	0.63	0.85	0.58	0.22
	R16	0.71	0.52	0.34	0.82	0.68	0.54	0.90	0.49	0.24
	HR16	0.78	0.60	0.38	0.84	0.78	0.64	0.91	0.61	0.32
	R12	0.88	0.63	0.39	0.88	0.77	0.64	0.92	0.54	0.24
	HR12	0.86	0.64	0.43	0.89	0.83	0.70	0.93	0.63	0.34
	N	0.67	0.52	0.40	0.91	0.80	0.66	0.96	0.63	0.27

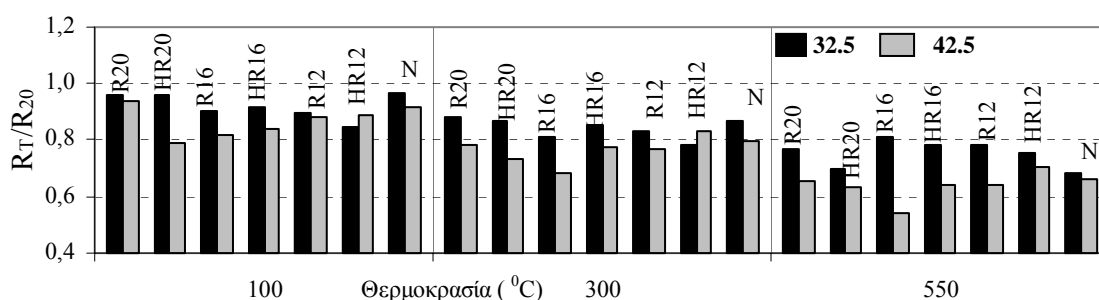
Αναλυτικά, όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο Π32.5N, τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα είναι πιο ανθεκτικά, με απώλειες αντοχών μικρότερες του συμβατικού σκυροδέματος έως και 28% στους 100 °C, έως 26% στους 300 °C και έως 15% στους 550 °C, κυρίως όταν χρησιμοποιείται φυσική άμμος αντί ανακυκλωμένης (μείγματα HR). Το ίδιο συμβαίνει και για τα μείγματα με τσιμέντο Π 42.5N. Οι απώλειες των ανακυκλωμένων είναι μικρότερες του συμβατικού έως 9% στους 100 °C και έως 11% στους 300 °C. Στους 550 °C όμως, το συμβατικό παρουσιάζεται ελάχιστα πιο ανθεκτικό με απώλειες έως 6% μικρότερες των ανακυκλωμένων.



Σχήμα 7. Εναπομένουσα αντοχή των μειγμάτων μετά από πύρωση στους 100 °C, 300 °C και 550 °C

Η προσθήκη φυσικής άμμου στη θέση της ανακυκλωμένης μειώνει τις απώλειες των αντοχών και κάνει τα μείγματα πιο ανθεκτικά, έναντι των μειγμάτων με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα, σε όλες τις θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, όταν το τσιμέντο είναι Π32.5, οι απώλειες των μειγμάτων HR είναι μικρότερες από τις απώλειες των μειγμάτων R, κατά 8-21% στους 100 °C και έως 14% στις άλλες θερμοκρασίες, ενώ για τσιμέντο Π42.5 οι απώλειες είναι μέχρι 8% μικρότερες σε όλες τις θερμοκρασίες, με ελάχιστες εξαιρέσεις (το μείγμα HR στους 100 °C και 300 °C, με μεγαλύτερες απώλειες κατά 5 και 9% αντιστοίχως).

Η χρήση τσιμέντου υψηλότερης αντοχής κάνει όλα τα μείγματα, ανακυκλωμένα ή μη, πιο ανθεκτικά στη φωτιά, στους 550 °C και κυρίως στους 300 °C. Στους 300 °C, η χρήση τσιμέντου 42.5 δίνει απώλειες αντοχών κατά 20% περίπου μικρότερες από εκείνες των αντιστοιχών μειγμάτων με τσιμέντο 32.5, ανεξάρτητα μείγματος ή αντοχής προέλευσης. Στους 550 °C, οι απώλειες των μειγμάτων με 42.5, είναι κατά 2-3% μικρότερες από τις αντίστοιχες με 32.5 στα ανακυκλωμένα και 14% στο σκυρόδεμα αναφοράς. Στους 100 °C, τα μείγματα R και το συμβατικό σκυρόδεμα έχουν ομοίως μικρότερες απώλειες όταν χρησιμοποιείται το τσιμέντο με τη μεγαλύτερη αντοχή, τα R κατά 10% και το συμβατικό κατά 8%, οι διαφορές δε είναι μεγαλύτερες όσο πιο χαμηλή είναι η αντοχή προέλευσης των αδρανών. Τα μείγματα HR όμως, παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες αντοχών, μέχρι 12%, όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο 42.5, οι οποίες είναι μεγαλύτερες όσο πιο υψηλή είναι η αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης.

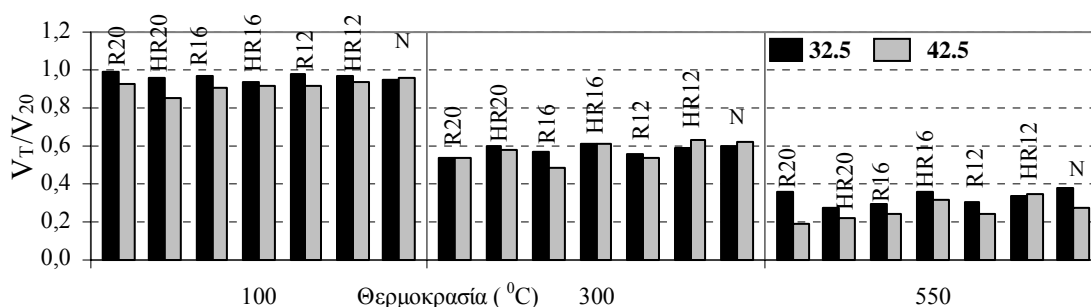


Σχήμα 8. Εναπομένουσα ένδειξη κρουσιμέτρου των μειγμάτων μετά από πύρωση στους 100 °C, 300 °C και 550 °C

Όταν τα μείγματα παρασκευάζονται με τσιμέντο Π32.5N, οι ενδείξεις του κρουσιμέτρου (Σχ. 8, Πιν. 7), δείχνουν ότι τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα χάνουν το 4-15% της αρχικής αντοχής τους, ενώ οι απώλειες του συμβατικού είναι 3%, το 12-22% έναντι 13% του συμβατικού και το 19-23%, έναντι 32% του συμβατικού στους 100 °C, 300 °C και 550 °C αντιστοίχως. Για τσιμέντο Π 42.5N, οι απώλειες είναι 6-21% έναντι 9% του συμβατικού στους 100 °C, 17-32% έναντι 20% του συμβατικού στους 300 °C και 30-46% έναντι 34% του συμβατικού στους 550 °C. Έτσι, τα αποτελέσματα του κρουσιμέτρου αντίθετα με τα αποτελέσματα της αντοχής, δείχνουν ότι τα μείγματα με 42.5 τσιμέντο έχουν μεγαλύτερες απώλειες ενδείξεων από ότι τα αντίστοιχα με τσιμέντο χαμηλότερης ποιότητας, (με εξαίρεση το μείγμα R12 μέχρι τους 300 °C), ότι το συμβατικό σκυρόδεμα είναι πιο ανθεκτικό από τα ανακυκλωμένα (με εξαίρεση τους 550 °C, όταν το τσιμέντο είναι 32.5), ενώ η προσθήκη λεπτόκοκκου υλικού στη θέση της ανακυκλωμένης άμμου κατά κανόνα αυξάνει τις απώλειες για τσιμέντο 32.5 και τις μειώνει για τσιμέντο 42.5

Με το ηχώμετρο (Σχ. 9), οι απώλειες της ταχύτητας των υπερήχων, για τα μείγματα που είναι παρασκευασμένα με τσιμέντο 32.5, είναι 2-7% στους 100 °C στα ανακυκλωμένα, έναντι απώλειας 6% του συμβατικού, 39-46% στους 300 °C έναντι 40% του συμβατικού και 62-72 % στους 550 °C, έναντι 62% του συμβατικού. Για τσιμέντο 42.5, οι απώλειες των ανακυκλωμένων είναι 7-15%

έναντι 4% του συμβατικού στους 100 °C, στους 300 °C είναι 37-51% έναντι 37% και στους 550 °C είναι 66-81% έναντι 73% του συμβατικού.



Σχήμα 9. Εναπομένουσα ταχύτητα υπερήχων μετά από πύρωση στους 100 °C, 300 °C και 550 °C

Επομένως τα συμβατικά σκυροδέματα εμφανίζονται πιο ανθεκτικά από τα ανακυκλωμένα, με εξαίρεση τους 100 °C αν χρησιμοποιείται τσιμέντο 32.5. Η προσθήκη φυσικής άμμου στη θέση της ανακυκλωμένης μειώνει τις απώλειες, ενώ η χρήση τσιμέντου 32.5 είναι καλύτερη για τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, αλλά για τα συμβατικά καλύτερα αποτελέσματα δίνει το 42.5, μέχρι όμως τους 300 °C.

Με λίγα λόγια κρουσίμετρο και ηχώμετρο, αντίθετα με τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής, συμφωνούν ότι το τσιμέντο χαμηλής αντοχής δίνει καλύτερα αποτελέσματα, και ότι τα συμβατικά σκυροδέματα είναι πιο ανθεκτικά από τα ανακυκλωμένα. Αυτό σημαίνει ότι στις υψηλές θερμοκρασίες, οι επιφάνειες των ανακυκλωμένων μαλακώνουν περισσότερο και δημιουργείται μεγαλύτερο δίκτυο μικρορωγμών, λόγω καταστροφής της προσκολλημένης στους κόκκους τσιμεντόπαστας, χωρίς όμως να επηρεάζεται η αντοχή. Οι απώλειες αντοχών που λαμβάνονται από το κρουσίμετρο είναι πολύ μικρότερες από αυτές που δίνει η θλιπτική αντοχή και το ηχώμετρο.

4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΤΟΧΗΣ-ΕΜΜΕΣΩΝ

Με βάση τα αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών και των ενδείξεων των έμμεσων, από τους λόγους εναπομένουσας αντοχής, κρουσιμέτρου και ταχύτητας υπερήχων, δημιουργήθηκαν σχέσεις που συνδέουν την θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων μετά από θερμική δράση με τις ενδείξεις του κρουσιμέτρου και του ηχομέτρου σε θερμοκρασίες μέχρι τους 550. Στον πίνακα 8 δίνονται οι εξισώσεις των σχέσεων αυτών.

Παρατηρείται ότι η σχέση που συνδέει την αντοχή με τις ενδείξεις του κρουσιμέτρου είναι υπερβολικής μορφής, ενώ της ταχύτητας των υπερήχων με την αντοχή εκθετικής μορφής. Στον πίνακα αυτό, όλες οι εξισώσεις στους 20 °C έχουν συντελεστή συσχέτισης $r^2 \geq 0.999$ με εξαίρεση την εξίσωση αντοχής- κρουσιμέτρου για το HR12 με τσιμέντο Π 32.5 και για το R12 με τσιμέντο Π 42.5 που είναι $r^2 = 0.9985$. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες, οι συντελεστές συσχέτισης είναι $r^2 = 1$.

Πίνακας 8 Εξισώσεις αντοχής – ένδειξης κρουσιμέτρου και αντοχής ταχύτητας υπερήχων των μειγμάτων

ΜΕΙΓΜΑ	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ $f_T - R_T$				
	20 °C	100 °C	300 °C	550 °C	
CEMII 32.5N	R12	$f = 0.2253 \times R^{1.7163}$	$f = 0.2113 \times R^{1.7163}$	$f = 0.1328 \times R^{1.7163}$	$f = 0.1313 \times R^{1.7163}$
	R16	$f = 0.1865 \times R^{1.8386}$	$f = 0.1485 \times R^{1.8386}$	$f = 0.0873 \times R^{1.8386}$	$f = 0.0712 \times R^{1.8386}$
	R20	$f = 0.2317 \times R^{1.8002}$	$f = 0.186 \times R^{1.8002}$	$f = 0.1134 \times R^{1.8002}$	$f = 0.1329 \times R^{1.8002}$
	HR12	$f = 4.1008 \times R^{0.7374}$	$f = 3.9559 \times R^{0.7374}$	$f = 2.1834 \times R^{0.7374}$	$f = 2.0415 \times R^{0.7374}$
	HR16	$f = 0.24 \times R^{1.7579}$	$f = 0.2449 \times R^{1.7579}$	$f = 0.1458 \times R^{1.7579}$	$f = 0.1419 \times R^{1.7579}$
	HR20	$f = 2.1558 \times R^{0.9842}$	$f = 1.8676 \times R^{0.9842}$	$f = 1.0568 \times R^{0.9842}$	$f = 1.148 \times R^{0.9842}$
	N	$f = 0.1476 \times R^{1.9588}$	$f = 0.0938 \times R^{1.9588}$	$f = 0.0577 \times R^{1.9588}$	$f = 0.0805 \times R^{1.9588}$
CEMII 42.5N	R12	$f = 8.9277 \times R^{0.4585}$	$f = 8.2816 \times R^{0.4585}$	$f = 6.3424 \times R^{0.4585}$	$f = 4.2825 \times R^{0.4585}$
	R16	$f = 2.761 \times R^{0.8649}$	$f = 2.3219 \times R^{0.8649}$	$f = 1.9915 \times R^{0.8649}$	$f = 1.5915 \times R^{0.8649}$
	R20	$f = 1.3045 \times R^{1.1858}$	$f = 1.0672 \times R^{1.1858}$	$f = 1.0296 \times R^{1.1858}$	$f = 0.7591 \times R^{1.1858}$
	HR12	$f = 4.4916 \times R^{0.7136}$	$f = 4.1988 \times R^{0.7136}$	$f = 3.2826 \times R^{0.7136}$	$f = 2.472 \times R^{0.7136}$
	HR16	$f = 6.7478 \times R^{0.5958}$	$f = 5.8401 \times R^{0.5958}$	$f = 4.6982 \times R^{0.5958}$	$f = 3.3233 \times R^{0.5958}$
	HR20	$f = 0.4189 \times R^{1.5494}$	$f = 0.4305 \times R^{1.5494}$	$f = 0.3414 \times R^{1.5494}$	$f = 0.355 \times R^{1.5494}$
	N	$f = 0.7001 \times R^{1.4281}$	$f = 0.5332 \times R^{1.4281}$	$f = 0.5023 \times R^{1.4281}$	$f = 0.5034 \times R^{1.4281}$
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ $f_T - V_T$					
CEMII 32.5N	R12	$f = 0,5152 \times e^{0,9606V}$	$f = 0,4021 \times e^{0,9862V}$	$f = 0,2203 \times e^{1,7083V}$	$f = 0,197 \times e^{3,1689V}$
	R16	$f = 3E-14 \times e^{8,4263V}$	$f = 2E-14 \times e^{8,6687V}$	$f = 1E-14 \times e^{14,88V}$	$f = 8E-15 \times e^{29,103V}$
	R20	$f = 0,0002 \times e^{2,9162V}$	$f = 0,0001 \times e^{2,9616V}$	$f = 8E-05 \times e^{5,3976V}$	$f = 7E-05 \times e^{8,2572V}$
	HR12	$f = 4,0107 \times e^{0,4883V}$	$f = 3,4293 \times e^{0,5067V}$	$f = 1,7799 \times e^{0,8301V}$	$f = 1,6256 \times e^{1,4414V}$
	HR16	$f = 0,5433 \times e^{0,9395V}$	$f = 0,4749 \times e^{1,0049V}$	$f = 0,2485 \times e^{1,5387V}$	$f = 0,2086 \times e^{2,6251V}$
	HR20	$f = 2,449 \times e^{0,6045V}$	$f = 2,0291 \times e^{0,6284V}$	$f = 1,0424 \times e^{1,0029V}$	$f = 0,9155 \times e^{2,1987V}$
	N	$f = 0,1776 \times e^{1,2793V}$	$f = 0,1056 \times e^{1,3566V}$	$f = 0,0527 \times e^{2,1288V}$	$f = 0,0462 \times e^{3,3924V}$
CEMII 42.5N	R12	$f = 8,419 \times e^{0,3268*V}$	$f = 7,3758 \times e^{0,3558V}$	$f = 5,305 \times e^{0,6041V}$	$f = 3,298 \times e^{1,3455V}$
	R16	$f = 2E-08 \times e^{5,2216V}$	$f = 1E-08 \times e^{5,7732V}$	$f = 1E-08 \times e^{10,726V}$	$f = 7E-09 \times e^{21,821V}$
	R20	$f = 0,5472 \times e^{1,0148V}$	$f = 0,4159 \times e^{1,0902V}$	$f = 0,3238 \times e^{1,9004V}$	$f = 0,1935 \times e^{5,4728V}$
	HR12	$f = 0,0051 \times e^{2,1319V}$	$f = 0,0044 \times e^{2,2841V}$	$f = 0,0033 \times e^{3,3805V}$	$f = 0,0022 \times e^{6,196V}$
	HR16	$f = 2,6422 \times e^{0,6321V}$	$f = 2,0635 \times e^{0,691V}$	$f = 1,5834 \times e^{1,0346V}$	$f = 0,9984 \times e^{1,9848V}$
	HR20	$f = 0,5672 \times e^{0,9491V}$	$f = 0,4029 \times e^{1,1173V}$	$f = 0,2841 \times e^{1,6394V}$	$f = 0,2369 \times e^{4,2963V}$
	N	$f = 0,2463 \times e^{1,271V}$	$f = 0,1649 \times e^{1,3258V}$	$f = 0,1274 \times e^{2,0334V}$	$f = 0,0978 \times e^{4,6856V}$

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χαρακτηριστική αντοχή των σκυροδεμάτων με τσιμέντο Π42.5 είναι μεγαλύτερη ή ίση των σκυροδεμάτων με τσιμέντο Π32.5 και φαίνεται ότι δεν εξαρτάται μόνο από το είδος του τσιμέντου αλλά και από το είδος (αντοχή σκυροδέματος προέλευσης) και το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών.

Η εφελκυστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων αυξάνεται με τη χρήση τσιμέντου υψηλότερης αντοχής. Η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη για τα μείγματα με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα (R) και μικραίνει με την πάροδο του χρόνου. Κυμαίνεται δε έως 11% στον ένα χρόνο.

Όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο υψηλότερης αντοχής, η τάση στη θλιπτική αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων είναι αρκετά όμοια με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Οι αντοχές αυξάνονται στις μικρότερες ηλικίες, αλλά με τη πάροδο του χρόνου η επίδραση είναι πολύ μικρότερη. Πάντως οι αυξήσεις στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα στον ένα χρόνο είναι μεγαλύτερες του συμβατικού κατά περίπου 10%.

Οι ενδείξεις του κρουσίμετρου και η ταχύτητα των υπερήχων δεν διαφοροποιείται πολύ και επομένως δεν επηρεάζονται πολύ από το είδος του τσιμέντου ή των αδρανών. Οι διαφοροποιήσεις των ενδείξεων, λόγω του είδους του τσιμέντου, είναι της τάξης του 2-5%. Τα αποτελέσματα του κρουσίμετρου ακολουθούν αρκετά τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής, υποδεικνύοντας ότι τα σκυροδέματα με τσιμέντο υψηλότερης αντοχής είναι σκληρότερα από αυτά με τσιμέντο Π32.5N. Στο ηχώμετρο, για τα μείγματα με ανακυκλωμένη άμμο καθώς και το συμβατικό σκυροδέμα, οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες για τσιμέντο Π32.5

Στις υψηλές θερμοκρασίες, τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα είναι πιο ανθεκτικά από το συμβατικό, η προσθήκη φυσικής άμμου στη θέση της ανακυκλωμένης μειώνει τις απώλειες αντοχής, ενώ η χρήση τσιμέντου υψηλότερης αντοχής κάνει τα μείγματα πιο ανθεκτικά κυρίως στους 300 °C.

Το κρουσίμετρο αντίθετα δείχνει ότι το συμβατικό σκυροδέμα είναι πιο ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες, ότι η προσθήκη φυσικής άμμου στη θέση της ανακυκλωμένης επηρεάζει τις απώλειες αντοχής ανάλογα με την αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης και το είδος του τσιμέντου, περισσότερο όμως τις αυξάνει όταν τσιμέντο είναι το 32.5 και τις μειώνει όταν τσιμέντο είναι το 42.5, και ότι κατά κανόνα, το τσιμέντο Π32.5 είναι καλύτερο για τα σκυροδέματα. Το ηχώμετρο αναδεικνύει τα συμβατικά σκυροδέματα ως πιο ανθεκτικά, ότι η προσθήκη φυσικής άμμου στη θέση της ανακυκλωμένης έχει θετική δράση και ότι το τσιμέντο Π32.5N είναι καλύτερο για τα ανακυκλωμένα.

Δίνονται καμπύλες αντοχής-εμμέσων στους 100 °C, 300 °C και 550 °C.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγγραφέας εκφράζει τις πιο θερμές ευχαριστίες της στους Πολιτικούς Μηχανικούς κ.κ. Αβραάμ Ε., Γερμανίδη Π., Γιβαννάκη Φ., Δημητρίου Π., Ζορμπά Π., Καταγή Π., Κοντού Ε., Σιόντα Κ., Τριβέλλα Ε. και Χατζηαγόρου Γ., οι οποίοι συμμετείχαν, ως τελειόφοιτοι σπουδαστές, στην διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών στο πλαίσιο των διπλωματικών τους εργασιών. Επίσης θερμές ευχαριστίες στη Βιομηχανία Έτοιμου Σκυροδέματος ΤΕΚΤΩΝ της Ξάνθης και ιδιαίτερα στον κ. Ε. Σκαρλάτο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amasaki, S. 1991. Estimation of strength of concrete structure by the rebound hammer. *CAJ Proc Cem Conc*, Vol. 45: 345-351
- ASTM C805. 1993. Test for Rebound Number of Hardened Concrete, *ASTM*.
- ASTM C597.1993 Test for Pulse Velocity through Concrete, *ASTM*
- Dhir, R.K. & Limbachiya, M.C. & Leelawat, T. 1999. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings* Vol. 3: 257–274.
- Fatta, D. & Papadopoulou, A. & Avramikos, E. & Sgourou, E. & Moustakas, K. & Kourmoussis, F. & Mentzias, A. & Loizidou, M. 2003. Generation and management of construction and demolition waste in Greece-an existing challenge. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol 40: 81-91
- Hansen, T.C. & Narud, H. 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *ACI Concrete International*, Vol. 5: 79-83
- Hansen, T.C. 1992. *Recycling of demolished concrete and masonry*. London: E & FN Spon
- ACI Committee 555. 2002. Removal and reuse of hardened concrete. *ACI Material Journal*, Vol. 99: 300-325
- Katz, A. 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrate old concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33: 703-711
- Limbachiya, M.C. & Marrocchino, E. & Koulouris, A. 2006. Chemical – mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*, Article in press
- Limbachiya, M.C. 2004. Coarse recycled aggregates for use in new concrete. *Engineering Sustainability, Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Vol. ES2: 99–106.
- Meinhold, U. & Mellmann, G. & Maultzsch, 2001. Performance of high-grade concrete with full substitution of aggregates by recycled concrete. *Proceedings of the 3rd CANMET/ACI International Conference*: 85-96.
- Neville, A. 1995. *Properties of Concrete*, UK: Addison-Wesley Longman.
- Nixon, P.J. 1978. Recycled concrete as aggregate for concrete-a review. *Material and Structure*, Vol. 11: 371-378
- Poon, C.S. & Kou, S.C. & Lam, L. 2002. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, Vol. 16: 281–289.
- Qasrawi, H.Y. 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, Vol 30: 739-746

Sagoe-Crentsil, K.K. & Brown, T. & Taylor, A.H. 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement Concrete Research*, Vol. 31: 707–712

Sealey, B.J. & Phillips, P.S. & Hill, G.J. 2001. Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 32: 321-331

Tavakoli, M. & Soroushian P. 1996. Strength of recycled aggregate concrete made using field demolished concrete as aggregate. *ACI Material Journal*, Vol.93: 182-190

Topçu, I.B. & Günçan , N.F. 1995. Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25: 385-1390